



Princípios da extração sem solvente e tecnologias potenciais para obtenção de óleos vegetais



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroenergia
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 43

Princípios da extração sem solvente e tecnologias potenciais para obtenção de óleos vegetais

*Simone Palma Favaro
Cesar Heraclides Behling Miranda
Karine Quaresma Lima
Nathália Setsu Uemura Shinzato
Iago Felipe Cardoso dos Santos Leal
Rossano Gambetta
Dasciana de Sousa Rodrigues*

Embrapa Agroenergia
Brasília, DF
2022

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Agroenergia
Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
CEP 70770-901, Brasília, DF
Fone: +55 (61) 3448-1581
Fax: +55 (61) 3448-1589
www.embrapa.br/agroenergia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Agroenergia

Presidente
Patrícia Verardi Abdelnur

Secretária-Executiva
Lorena Costa Garcia Calsing

Membros
*Alexandre Nunes Cardoso, Betulia de Moraes
Souto, João Ricardo Moreira de Almeida,
Leonardo Fonseca Valadares, Melissa Braga,
Patrícia Abrao de Oliveira Molinari, Priscila
Seixas Sabaini*

Supervisão editorial e revisão de texto
Luciane Chedid Melo Borges

Normalização bibliográfica
Iara Del Fiaco Rocha (CRB-1/2169)

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica e tratamento das
ilustrações
Maria Goreti Braga dos Santos

Foto da capa
Simone Palma Favaro

1ª edição
Publicação digital (2022): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa, Secretaria-Geral

Princípios da extração sem solvente e tecnologias potenciais para obtenção de
óleos vegetais / Simone Palma Favaro ... [et al]. – Brasília, DF : Embrapa
Agroenergia, 2022.

PDF (38 p.) : il. color – (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-
4439 ; 43)

1. Óleo vegetal. 2. Extração aquosa. 3. Extração enzimática. I. Miranda,
Cesar Heraclides Behling. II. Lima, Karine Quaresma. III. Shinzato, Nathália Setsu
Uemura. IV. Leal, Iago Felipe Cardoso dos Santos. V. Gambetta, Rossano. VI.
Rodrigues, VII. Dasciana de Sousa. Título. VIII. Série.

CDD (21. ed.) 665.3

Autores

Simone Palma Favaro

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência de Alimentos, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Cesar Heraclides Behling Miranda

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Biologia e Bioquímica do Solo, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Karine Quaresma Lima

Engenheira química, graduada pela Universidade de Brasília, DF.

Nathália Setsu Uemura Shinzato

Engenheira química, graduada pela Universidade de Brasília, DF.

Iago Felipe Cardoso dos Santos Leal

Engenheiro químico, graduado pela Universidade de Brasília, DF.

Rossano Gambetta

Engenheiro químico, doutor em Engenharia Química, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Dasciana de Sousa Rodrigues

Química industrial, doutora em Engenharia Química, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

Apresentação

A pesquisa por processos de extração de óleos sem uso de solventes tem sido constante, objetivando o desenvolvimento de tecnologias limpas, eficientes, bem como economicamente viáveis. Para o azeite de oliva e a palma de óleo, são comuns métodos físicos que englobam extração com prensas contínuas, com posterior separação por centrifugação. Entretanto, não há alternativa semelhante para substituir o uso tradicional de hexano para extração em oleaginosas, muito embora vários pesquisadores tenham descrito a viabilidade da chamada extração aquosa, com eficiências de extração variadas, mas significativas. Nesse método, a água é o solvente, e a separação baseia-se na insolubilidade do óleo nesse meio. O processo pode ser melhorado com adição de enzimas hidrolíticas, que aumentam a desagregação dos tecidos vegetais e a consequente liberação da fração lipídica de forma mais eficiente. Alternativas como o pré-tratamento com ultrassom também estão sendo estudadas.

Nesta publicação é apresentada revisão de literatura sobre alguns processos comumente usados na indústria de óleos vegetais e gorduras, bem como alguns outros processos que estão sendo desenvolvidos atualmente visando baixo impacto ambiental e maior qualidade dos produtos finais.

Diante do que foi exposto, desenvolvimentos como os aqui propostos contribuem de forma significativa com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, os quais têm nos últimos anos impulsionado desde políticas públicas até ações práticas adotadas em todos os níveis da sociedade. Entre os 17 ODS propostos, há grande aderência com o ODS 7, que se refere a energia limpa e acessível, assim como com os ODS 9, 11 e 12, que se ligam, respectiva-

mente, à temática da indústria, inovação e infraestrutura, cidades e comunidades sustentáveis, e consumo e produção sustentáveis. Ações como essas são importantes para o futuro da humanidade e, dessa forma, reconhecidas e apoiadas pela Embrapa.

Alexandre Alonso Alves
Chefe-Geral da Embrapa Agroenergia

Sumário

Introdução.....	9
Extração aquosa	13
Extração de azeite de oliva	16
Extração do óleo de palma.....	18
Extração aquosa assistida por enzimas	21
Pré-tratamento	24
Relação sólido-líquido no sistema.....	25
pH.....	25
Temperatura	26
Tempo.....	27
Concentração Enzimática	27
Métodos combinados para aprimorar a eficiência de extração aquosa	30
Extração aquosa assistida por ultrassom	30
Micro-ondas.....	31
Extração aquosa assistida pela adição de sais.....	32
Considerações finais	32
Referências	33

Introdução

Os óleos vegetais são utilizados nas indústrias alimentícias, farmacêuticas, de cosméticos, lubrificantes, oleoquímica e de biocombustíveis. Na safra 2020/2021 a produção mundial dos principais óleos vegetais, como o de palma (também conhecido no Brasil como dendê), soja, canola, coco e oliva, foi de 206 milhões de toneladas (Estados Unidos, 2022). Para garantir a elevada produtividade, a indústria constantemente busca meios para aprimorar a eficiência da extração (Nde; Foncha, 2020). Entende-se por eficiência de extração a razão percentual entre a massa de óleo extraída e a massa total de óleo na biomassa.

Os três métodos convencionais utilizados na indústria para a extração de óleos vegetais são: prensagem mecânica em prensa hidráulica, prensagem mecânica em prensa contínua (*expeller*) e a extração com solventes orgânicos (Gaonkar; Rosentrater, 2019). Para oleaginosas com alto teor de óleo, utiliza-se um processo de dois estágios de extração, iniciando com a prensagem e, a seguir, a extração por solvente (Rosenthal et al., 1996). Existe ainda a extração por fluido supercrítico, principalmente com utilização de CO₂, mas, devido ao alto custo dos equipamentos, está restrita a óleos de alto valor agregado e não é aplicada para commodities (Temelli, 2009). Mais recentemente, tem se buscado desenvolver tecnologias para a chamada extração aquosa, a qual se baseia no uso da água como solvente e na insolubilidade do óleo nesse meio de extração. Após a maceração do tecido vegetal com a água, o óleo é separado fisicamente por processos de centrifugação. A eficiência do processo de extração aquosa pode ser melhorada pela aplicação de pré-tratamentos, como ultrassom e micro-ondas, ou assistida por enzimas hidrolíticas e alguns tipos de sais.

A extração mecânica por prensagem, muito usada na indústria alimentícia, é uma operação unitária de separação líquido-sólido, por meio da utilização de forças de compressão. Geralmente, é necessário o uso de procedimentos de despolpamento, diminuição de tamanho e aquecimento, antes da extração para elevar o rendimento (Brennan et al., 1990). A prensagem hidráulica é o método de extração mais antigo e consiste em um sistema em batelada em que o pistão, hidráulicamente acionado, comprime o material, e o óleo é extraído (Rittner, 1996). Ao longo dos anos, seu uso foi substituído gradati-

vamente pela prensa contínua do tipo *expeller* (Gaonkar; Rosentrater, 2019). Na prensa do tipo *expeller*, ocorre alimentação contínua de frutos ou sementes, em parafusos tipo rosca sem fim, onde eles são comprimidos e o óleo liberado (Ramalho; Suarez, 2013). Esse tipo de maquinário apresenta vantagens quando comparado à extração por solvente orgânico, uma vez que é um procedimento simples, adaptável a diferentes tipos de oleaginosas, contínuo e que demanda pouco tempo de processo. Em contrapartida, a extração não é muito eficiente, deixando cerca de 8% a 14% de óleo nas tortas residuais (Singh; Bargale, 2000). Na Figura 1, são apresentados dois exemplos de equipamentos: a prensa hidráulica e a prensa contínua.

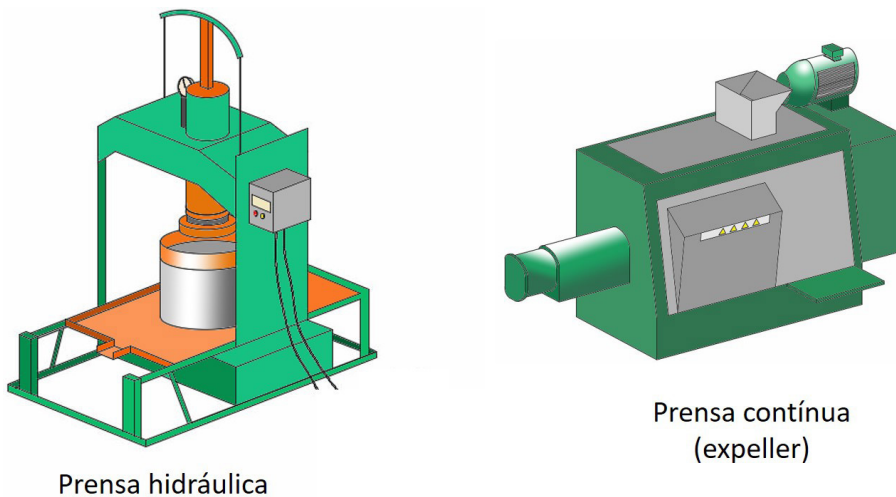


Figura 1. Exemplos de prensas para extração mecânica de óleo.

O processo de extração com solvente se fundamenta em um sistema contracorrente de um solvente orgânico, principalmente o hexano, e do material vegetal previamente floculado, triturado ou prensado. Dessa forma, o óleo é solubilizado no solvente com alta eficiência (Serrato, 1981). Entretanto, o solvente é inflamável e tóxico, o que requer equipamentos e práticas de segurança bastante criteriosos (Boss, 2000; Mpagalile et al., 2006). Além dis-

so, as altas temperaturas, em alguns estágios, causam efeitos indesejados na qualidade do produto, como o aumento do índice de acidez do óleo e a desnaturação de proteínas presentes nas tortas/farelos residuais, reduzindo seus respectivos valores econômicos e nutricionais (Domínguez et al., 1994; Koubaa et al., 2016).

Atualmente, as preocupações com os impactos ambientais e os reflexos na saúde humana provocaram a busca por mudanças na indústria. Uma das ferramentas que pode ser utilizada para avaliação dos processos industriais é a Análise do Ciclo de Vida (ACV), que possibilita entender integralmente as entradas e saídas de materiais, o consumo de energia e as possíveis alterações ambientais em todas as etapas do processo produtivo. Essa avaliação se inicia pelas matérias-primas e contabiliza cada dispêndio de energia, materiais e produto, uso e reciclagem, até os produtos chegarem ao seu destino final (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009). Utilizando-se a ferramenta de ACV, pode-se avaliar com métricas assertivas os procedimentos industriais e apontar alternativas para tornar a produção de óleos vegetais mais eficiente, segura e sustentável.

Cheng et al. (2018) realizou um estudo de ACV para três diferentes abordagens do processo de extração do óleo de soja: a extração com prensagem contínua, a extração com hexano e a extração aquosa assistida por enzimas (EAE). O pré-tratamento consistiu na limpeza dos grãos de soja, seguida de procedimento de floculação. Para a extração com prensa contínua e a EAE, também se utilizou a extrusão, uma técnica que permite o aumento da superfície de contato dos flocos de soja com o objetivo de aprimorar a eficiência e a inativação de fatores antinutricionais. Após a etapa de extração, foi realizado o refino dos óleos obtidos. Para a prensa contínua, usou-se a técnica da degomagem para a retirada de impurezas do óleo. Já a extração com hexano, foi preciso realizar a dessolventização, para remoção do hexano do óleo, e a degomagem. E, por fim, para a EAE, ocorreu a centrifugação e a desemulsificação a fim de separar o óleo livre. A Figura 2 apresenta de forma sintetizada as etapas envolvidas no processo de extração de óleo de soja, juntamente com as três abordagens adotadas pelos autores no estudo de ACV. Foi incluída nesta figura a indicação da presença de proteínas nas diferentes frações resultantes do processo, considerando a relevância que este produto tem na cadeia produtiva da soja.

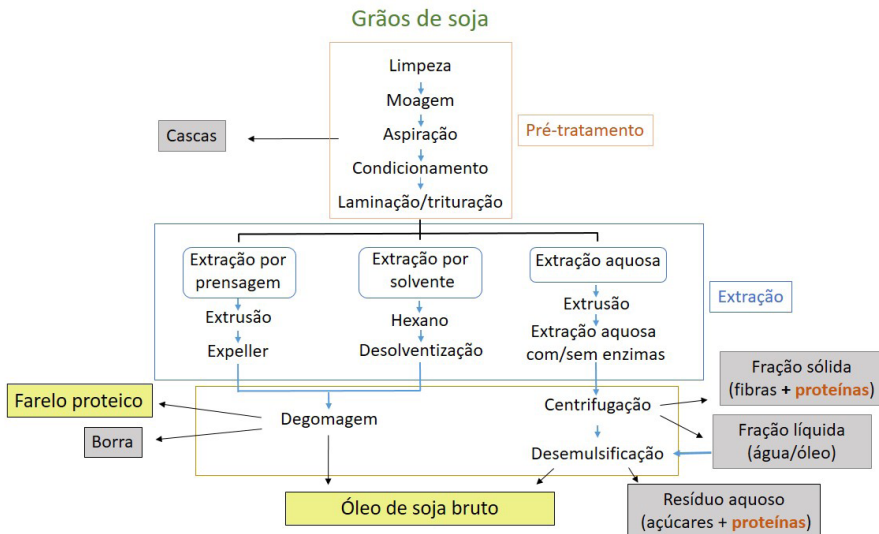


Figura 2. Fluxograma dos processos de extração do óleo de soja.

Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2018).

O impacto ambiental da EAE foi menor do que o do hexano, uma vez que este apresenta risco térmico, toxicidade aguda e crônica, além de ecotoxicidade (Cheng et al., 2018). Deve ser ressaltado que o uso de hidróxido de sódio na EAE, para ajuste de pH necessário à atividade enzimática, é ainda menos danoso do que o hexano. Em relação às emissões dos gases de efeito estufa (GEE) e de poluentes, como dióxido de carbono, NO_x e SO_x , a extração aquosa assistida por enzimas apresentou menores índices de emissão que a prensa contínua, apesar de requerer muita energia na etapa da extrusão (Cheng et al., 2018).

Portanto, os cuidados com o ambiente, a segurança e o bem-estar dos colaboradores e consumidores levam à necessidade de buscar procedimentos de extração de óleos vegetais mais eficientes e ambientalmente limpos. Outro fator que tem levado à busca por processos mais brandos é o aumento da demanda por óleos com características intrínsecas preservadas, sem o

uso de processos adicionais de refino, além de proteínas com propriedades funcionais e nutricionais que atendam ao padrão não somente para ração animal, mas também como alimento humano (Latif; Anwar, 2011). No caso das proteínas, a demanda crescente por proteínas de base vegetal, tem impulsionado ainda mais a busca por tecnologias inovadoras de alta eficácia e ambientalmente amigáveis. O processo de extração aquosa tem se desenvolvido como uma alternativa promissora para atender a esses requisitos. No processo aquoso obtêm-se óleos vegetais de alta qualidade e demais frações da biomassa com características físico-químicas bastante preservadas.

O objetivo deste documento é apresentar processos de extração sem solvente e discutir aspectos de extração aquosa e seu potencial como um método que proporciona alta eficiência e menor impacto ambiental na extração dos óleos de frutos e grãos oleaginosos.

Extração aquosa

Os óleos arranjam-se nas plantas principalmente na forma de triglicerídeos, os quais se encontram em maior quantidade em tecidos vegetais de sementes e frutos. Nas sementes, os óleos são armazenados nos cotilédones ou no endosperma, enquanto nos frutos, esses triglicerídeos localizam-se no mesocarpo (Sasaki, 2008). Isso acontece porque muitas espécies vegetais utilizam esse óleo como reserva energética para seu desenvolvimento e germinação (Taiz; Zeiger, 2004; Sasaki, 2008).

Na soja, por exemplo, os óleos acumulam-se, sobretudo, nas células dos cotilédones (Figura 3), que possuem como principal característica organelas ricas em proteínas e óleos, denominadas, respectivamente, corpos proteicos e corpos lipídicos (Wolf; Baker, 1975). Os corpos lipídicos, também conhecidos como glóbulos de óleo ou esferossomos, ocupam o espaço entre os corpos proteicos no interior da célula vegetal e ficam emaranhados em uma rede citoplasmática dificultando o processo de extração do óleo (Wolf; Baker, 1975).

O glóbulo de óleo (Figura 4) é delimitado por proteínas estruturais, majoritariamente, as oleosinas, seguidas de uma camada fosfolipídica que engloba o óleo ou os triglicerídeos (Tzen et al., 1993). Assim, no processo de extração do óleo, é necessário romper a parede celular – constituída por celulose, he-

micelulose, pectina – e a membrana lipoproteica do vegetal, além da camada externa do glóbulo de óleo (Rosenthal et al., 1996).

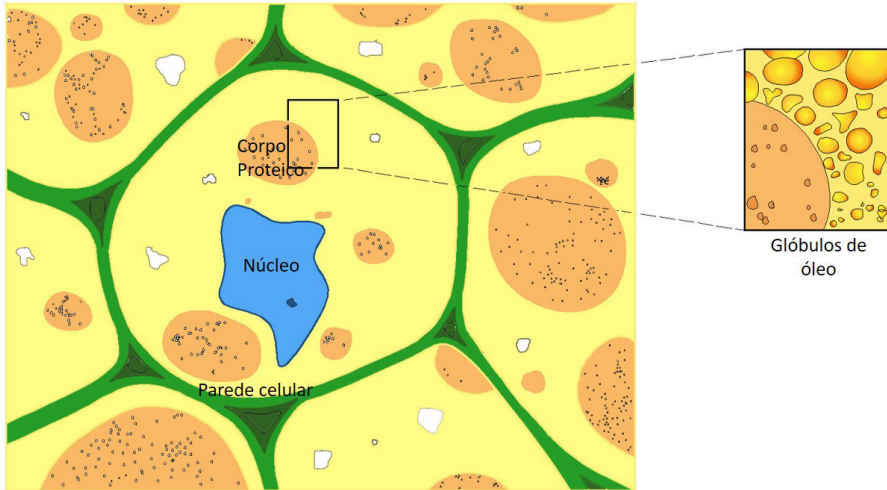


Figura 3. Representação esquemática de célula de cotilédone da soja.

Fonte: Adaptado de Wolf e Baker (1975).

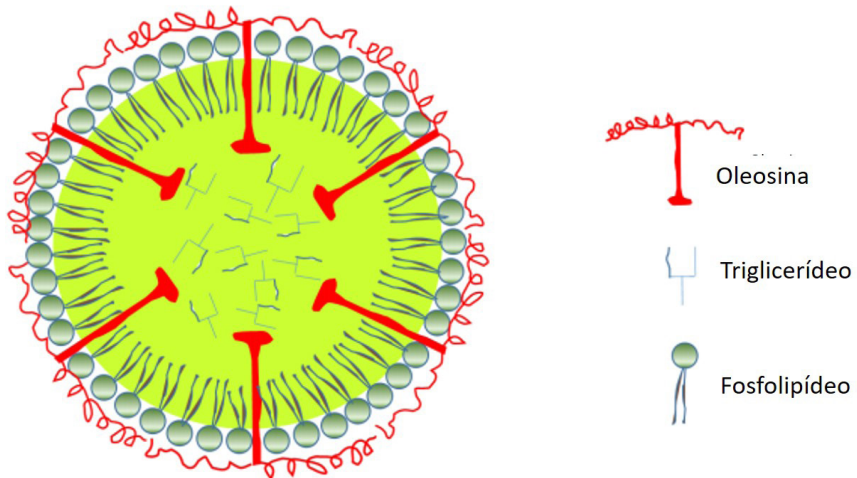


Figura 4. Estrutura do glóbulo de óleo.

Fonte: Adaptado de Favaro et al. (2018).

Dessa forma, o primeiro estágio da extração aquosa consiste na ruptura da parede e membrana celulares das oleaginosas, por meio de uma operação unitária mecânica, como a moagem e a prensagem, proporcionando a liberação dos glóbulos de óleo. A seguir, realiza-se a etapa de malaxação, na qual ocorre a agitação lenta da matéria-prima homogeneizada, levando à coalescência dos glóbulos de óleo e à formação de uma fase contínua que auxilia na separação do óleo (Figura 5).

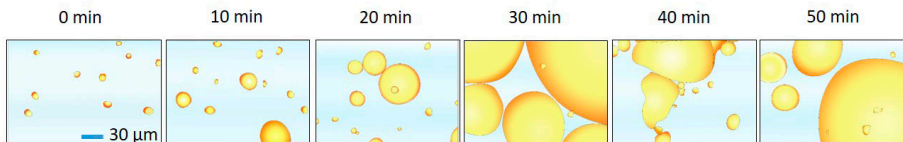


Figura 5. Evolução do tamanho dos glóbulos de óleo durante a malaxação a 22 °C.

Fonte: Adaptado de Trapani et al. (2017)

O próximo estágio é a centrifugação para separar a fração líquida, rica em substâncias solúveis em água; o óleo livre ou a emulsão de óleo em água que está estabilizada por proteínas e fosfolipídios; e a fração sólida que contém sólidos insolúveis (Campbell et al., 2011). Caso ocorra a formação da emulsão, tem-se uma última etapa, a chamada desemulsificação, para retirada do óleo livre. A desemulsificação pode ser feita por meio de aquecimento do sistema, de adição de sais e de alteração do pH. Ou, ainda, por equipamentos específicos, como a centrifuga de pratos. Na Figura 6, apresenta-se um fluxograma do processo de extração aquosa com a formação de emulsão.

Em larga escala, dois processos de extração de óleo vegetal de frutos sem o uso de solvente estão consolidados: a do azeite de oliva e a do óleo de palma. O óleo de palma e o azeite de oliva estão entre os óleos mais consumidos mundialmente, sendo o primeiro o mais produzido (Estados Unidos, 2022). No entanto, esforços têm sido feitos para ampliar a diversidade de espécies, incluindo grãos oleaginosos, beneficiados por meio da extração aquosa. Também o uso de tecnologias auxiliares, como enzimas e pré-tratamentos com ultrassom e micro-ondas, tem sido investigado para melhorar a eficiência de extração aquosa. A seguir, apresentam-se algumas dessas tecnologias já em uso e outras ainda no campo do desenvolvimento.

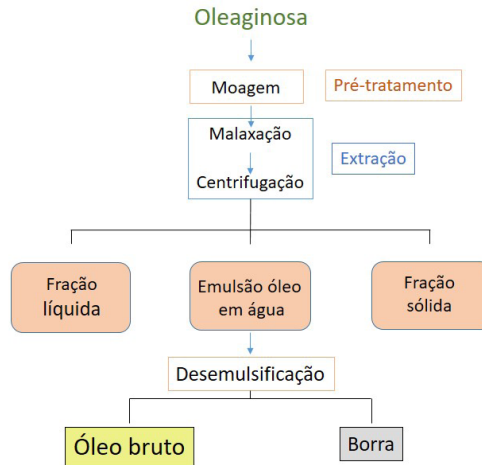


Figura 6. Fluxograma do processo de extração aquosa com formação de emulsão.

Extração de azeite de oliva

Para a produção do azeite de oliva, o primeiro estágio consiste na limpeza e lavagem das azeitonas para retirada de impurezas, como poeira, folhas e pedras. Essa etapa é fundamental para evitar a deterioração de equipamentos do processo, como o moinho e a centrífuga, zelando pelo seu tempo de utilização. Em seguida, com a utilização de moinhos ou trituradores, as azeitonas são transformadas em uma pasta, causando a desestruturação da parede celular e da membrana para a liberação dos glóbulos de óleo (Uceda et al., 2006).

A próxima etapa é a malaxação, em que ocorre uma movimentação branda da polpa desestruturada. Para aumentar a eficiência da extração, pode ocorrer o aquecimento do sistema, que diminui a viscosidade do óleo, e a adição de água, que atua como solvente para retirada do óleo (Uceda et al., 2006). Porém, condições de operação dos equipamentos e proporção de água e pasta inadequadas podem provocar a formação de emulsões.

Depois, com o uso de centrífuga, remove-se o óleo obtido. As centrífugas podem ser de três fases, separando o óleo, a água e os sólidos (tridecanter),

ou de duas fases (decanter), separando o óleo e a borra. Por fim, ocorre a separação líquido-líquido com a utilização de decantação natural ou centrifugação verticais, mais usadas atualmente, para retirada da água residual do azeite (Uceda et al., 2006). Outros processos podem ser utilizados para refino do produto, como a clarificação, a deceragem, a desodorização e a neutralização (Brasil, 2012). Na Figura 7, tem-se um esquema com os equipamentos utilizados na extração do azeite extra virgem.

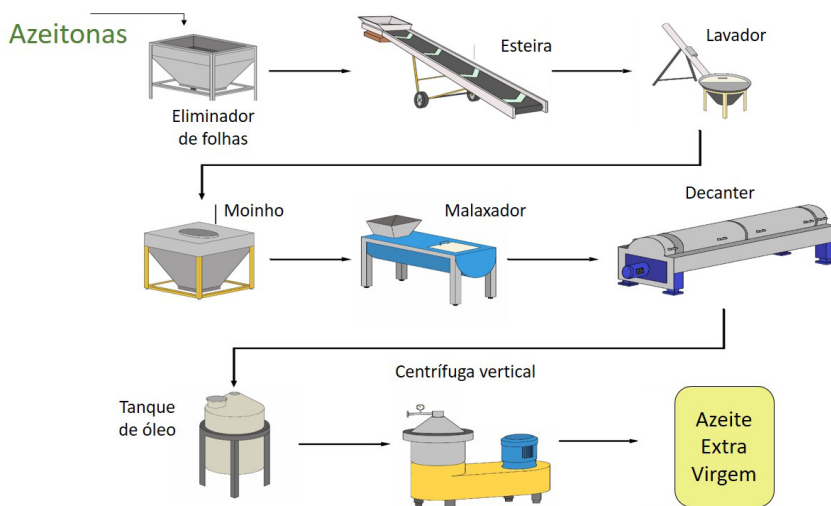


Figura 7. Esquema demonstrativo dos equipamentos usados na extração de azeite extra virgem.

De acordo com a análise do ciclo de vida (ACV) do azeite de oliva, a etapa da lavoura apresenta os maiores impactos ambientais (alterações climáticas, acidificação terrestre e eutrofização de água doce e marinha), devido à produção e utilização de fertilizantes, consumo energético e o uso de pesticidas. Dessa forma, algumas medidas podem ser tomadas para diminuir esses impactos, como a escolha da melhor variedade de oliveira, a utilização eficiente de herbicidas e da água, o uso dos resíduos vegetais para fertilização dos solos e a qualificação profissional dos agricultores (Figueiredo et al., 2014). Em relação à etapa de extração, os impactos estão relacionados, majoritariamente, às variações climáticas e à eutrofização. Para diminuir o consumo de energia e água e manter a eficiência do processo, recomendam-se: a

reutilização de água da lavagem na limpeza de equipamentos; a utilização do decanter e de equipamentos mais eficientes de separação; o aproveitamento do material sólido residual como combustível ou para produção de óleo; e o uso de iluminação natural nas fábricas (Figueiredo et al., 2014).

A eficiência da extração do azeite de oliva depende de distintos fatores, como a variedade da oliveira, as condições climáticas e do solo, o uso de adjuvantes agrícolas, o tempo de espera para o processamento após a colheita, a temperatura e o tempo de malaxação da pasta e as particularidades dos equipamentos. Em 2020, a empresa brasileira Azeite Batalha, localizada em Pinheiro Machado, no Rio Grande do Sul, reportou eficiência de extração de 85,3%, em azeitonas cujo teor inicial de óleo era de 17%, restando ao final do processo 2,5% de óleo residual no bagaço. No ano anterior, essa empresa havia conseguido rendimento maior, alcançando 90,6% de eficiência de extração. Outro estabelecimento, a Olivae – Azeite de oliva, situado no 2º Distrito de Piratini do Rio Grande do Sul, apresentou, nas últimas safras, rendimento de óleo entre 10% e 15% em relação à massa inicial de frutos, restando em torno de 1% a 3% de azeite no bagaço, o que dá uma média de eficiência de extração de 88%.¹

Extração do óleo de palma

A palma de óleo contém óleo tanto na polpa quanto na amêndoa. Portanto, são produzidos industrialmente dois tipos de óleo oriundos do fruto da palma. O óleo da polpa é denominado de óleo de palma, e o da amêndoa é denominado óleo de palmiste, ou *palm oil* e *kernel oil* em inglês, respectivamente. O fruto da palma de óleo apresenta elevada atividade de lipase na polpa, cujo resultado é a rápida acidificação do óleo após a colheita. A prática usual para contornar esse problema é iniciar o processamento do fruto em até 24 horas após a colheita (Poku, 2002; Basiron, 2005). Como os frutos da palma de óleo são indeiscentes, ou seja, não caem do cacho, a colheita é feita retirando o cacho inteiro e transportando-o para a planta industrial, onde ocorre a primeira etapa do processamento, que consiste na esterilização do cacho (Figura 8). A esterilização acontece a uma pressão de vapor de, aproximada-

¹ Informação pessoal.

mente, 3 kg/cm² (143 °C) por 60 minutos (Basiron, 2005). Esse processo tem como funções (Poku, 2002; Basiron, 2005):

- Inativação de enzimas que provocam o aumento de ácidos graxos livres.
- Auxílio no procedimento da debulha.
- Condicionamento da polpa, o que facilita a liberação dos glóbulos de óleo.
- Desidratação dos frutos, o que funciona como um pré-tratamento dos caroços para a recuperação das amêndoas e ajuda a extração do óleo da polpa no processo de prensagem.

Em seguida, ocorre a debulha, que é o processo de retirada dos frutos esterilizados dos cachos. Para isso, utiliza-se um debulhador e um longo tambor rotativo com paredes vazadas, que permitem a passagem dos frutos soltos, impedindo a passagem dos cachos vazios que são conduzidos ao final do tambor. O diâmetro e o comprimento desses equipamentos variam, respectivamente, de 1,8 m a 2 m e de 3 m a 5 m, com rotação entre 20 rpm e 25 rpm (Basiron, 2005). Os cachos vazios podem ser utilizados como fertilizantes nas plantações (Poku, 2002).

A próxima etapa é a digestão, que tem como finalidade romper as membranas e paredes celulares para a liberação dos glóbulos de óleo. Normalmente, o digestor (cozinhador) utilizado é um equipamento cilíndrico com uma camisa de vapor acoplada, que possibilita aquecimento, e braços radiais no eixo central, proporcionando a digestão, isto é, a maceração da polpa. As condições ótimas de operação são alcançadas com a mistura dos frutos a uma temperatura de 95 °C a 100 °C por cerca de 20 minutos (Basiron, 2005).

A seguir, ocorre a extração do óleo por prensagem. Nessa etapa, separam-se o óleo bruto – que é uma mistura de óleo, água e sólidos – da torta residual, que contém fibras e as amêndoas dos frutos. As prensas utilizadas são as contínuas, que regulam a pressão por meio da abertura ou fechamento de um cone em sua saída (Ramalho; Suarez, 2013). Pressões muito elevadas podem provocar a oxidação do óleo, diminuindo sua qualidade (Poku, 2002).

O óleo bruto de palma é então submetido à clarificação para remover impurezas (Poku, 2002). O óleo bruto percorre um caminho através de uma tela vibratória para retirada de sólidos finos e grossos até um decanter de duas ou

três fases (tridecanter), que é uma centrífuga horizontal contínua que apresenta um segmento cilíndrico para a separação do óleo e dos resíduos (uma fase líquida pesada), um segmento cônico, onde ocorre a secagem dos sólidos recuperados, e uma seção espiral, que possibilita o deslocamento dos sólidos, removendo-os do equipamento. O resíduo, chamado de Pome, sigla em inglês de *Palm Oil Mill Effluent*, é conduzido ao tratamento de efluentes, e os sólidos recuperados são incorporados à torta residual da prensagem. Já o óleo clarificado é purificado com o auxílio de uma centrífuga, seguido de secagem em secador a vácuo para a retirada da água residual (Dorsa; Caranti, 2016; Fernández et al., 2016).

Por fim, o óleo de palma seco é encaminhado aos tanques de armazenamento, que mantêm uma temperatura entre 32 °C e 40 °C para evitar danos ao produto (Basiron, 2005). Esse óleo pode ser distribuído ou refinado com os processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização (Ramalho; Suarez, 2013). Na Figura 8, tem-se um esquema com os equipamentos utilizados na extração do óleo de palma. Na Figura 9, são apresentadas fotos de um processo de extração de óleo de macaúba com utilização de celulases.

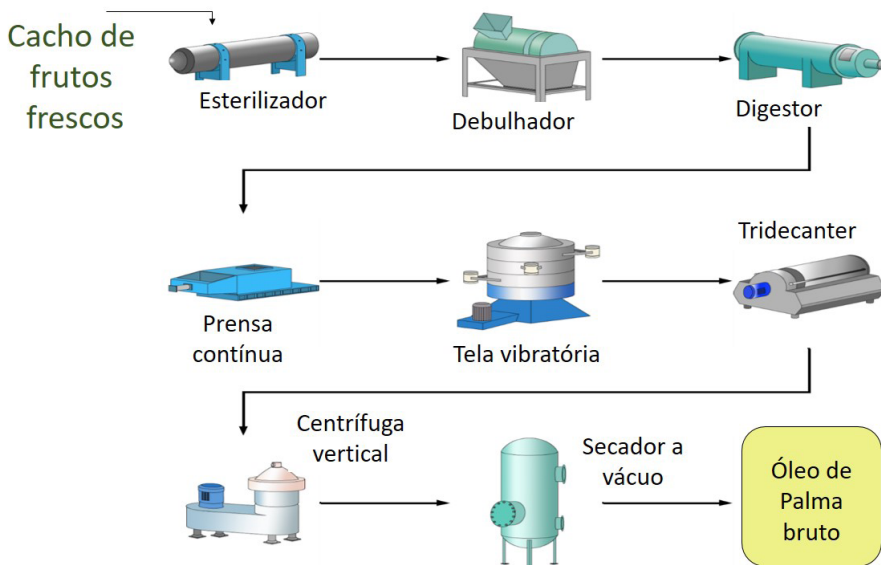


Figura 8. Esquema demonstrativo dos equipamentos usados na extração do óleo de palma.

Para a extração do óleo de palmiste, o endocarpo recoberto com as fibras que saem da prensa contínua segue para outra linha de processo. A primeira etapa ocorre no desfibrador, para a separação das fibras e das nozes (endocarpo + amêndoa). A seguir, as nozes são quebradas em moinhos de martelo. O endocarpo e a amêndoa são separados por via seca, em ciclones, ou por via úmida (Halim et al., 2016). No caso da via úmida, a mistura de endocarpo e amêndoas é colocada num tanque com argila ou em hidrociclones, e as porções são separadas em função da diferença de densidade (Agu et al., 2017). Amêndoas separadas por via úmida são lavadas e secas antes da etapa de extração.

Atualmente, em larga escala, não se utiliza a via úmida. As amêndoas são quebradas e preparadas para a extração por meio de laminação e condicionamento (cozimento) antes da extração em prensa expeller.

Em relação ao rendimento da extração, a empresa brasileira Denpasa, localizada em Santa Bárbara do Pará, em média, obtém entre 19% e 22% de óleo de palma em relação ao peso bruto dos cachos, dependendo da qualidade da matéria-prima. O óleo de palmiste representa cerca de 1% a 2%. Em termos de eficiência, a empresa consegue atingir, aproximadamente, 94%, perdendo 6% de óleo.²

Extração aquosa assistida por enzimas

Os procedimentos da extração aquosa convencional e a assistida por enzimas são similares, porém, na enzimática, necessitam-se de controles rígidos de temperatura e pH do processo, uma vez que a atividade da enzima está fortemente relacionada a esses fatores. Na extração aquosa enzimática, são utilizadas enzimas hidrolíticas que degradam e auxiliam no rompimento da parede celular, membrana plasmática e desestabilização da emulsão formada durante a extração. A desestruturação do tecido vegetal facilita a liberação do óleo e, conseqüentemente, aumenta a eficiência da extração. As enzimas celulase, hemicelulase, pectinase, protease, glucanase, fosfolipase e amilase têm sido aplicadas nesse processo (Fullbrook, 1984; Domínguez et al., 1994; Munder et al., 2020). Alguns produtos comerciais à base de enzimas são: Lecitase®

² Informação pessoal.

Ultra, Quara® Boost, Purifine®, Alcalase®, Alcalase 2.4 L, Flavourzyme® 1000 L, Multifect Neutral®, Papain, Protamex, Lipomod 699 L and LysoMax™, Termamyl 120 L, entre outros.

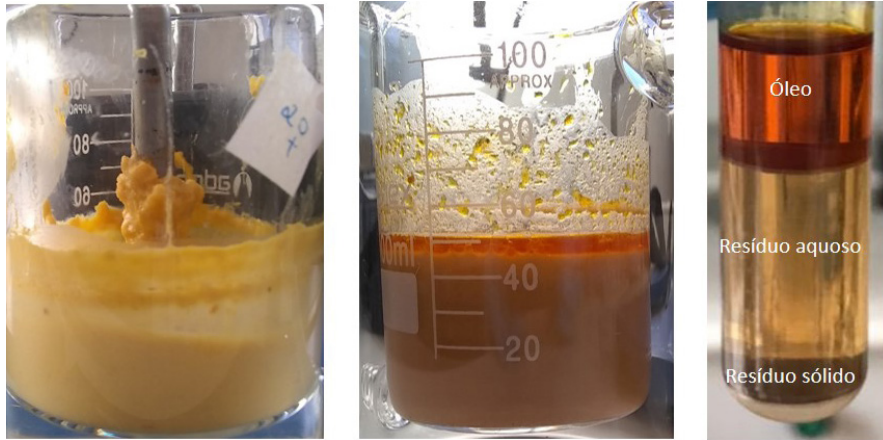
A Figura 9 apresenta um fluxograma geral de um processo de extração aquosa assistida por enzimas. Parte do processo, em escala de bancada, é ilustrado na Figura 10 para a extração aquosa de óleo de polpa de macaúba.



Figura 9. Esquema do processo da extração aquosa assistida por enzimas.

As enzimas fundamentais para aumentar a eficiência da extração de óleos vegetais (celulases, proteases e amilases) são consideradas enzimas técnicas, ou seja, já são comercializadas atualmente em grandes volumes, baixo grau de pureza e custo relativamente baixo. Portanto, isso não seria um impeditivo para o desenvolvimento de processos enzimáticos para a extração de óleos. O principal desafio nesse campo seria o aprimoramento dos processos já em desenvolvimento a fim de garantir que uma quantidade mínima de enzimas seja utilizada e que isso proporcione menor gasto de água e energia, mantendo a qualidade e eficiência de extração de processos estabelecidos industrialmente.

Para oleaginosas com alto teor de proteínas, como a soja, que contém cerca de 40%, a extração assistida por proteases pode favorecer a obtenção simultânea em condições brandas do óleo e da proteína a partir de farinha de



A) Controle (sem adição de enzimas).

B) Após tratamento com enzimas.

C) Separação de fases após tratamento com enzimas.

Fotos: Dasciana de Souza Rodrigues.

Figura 10. Etapas do processo de extração aquosa de óleo de polpa de macaúba assistida por celulases.

soja tratada termicamente (Rosenthal, 2001). Processos como precipitação isoeletrica, cromatografia de troca iônica e a ultrafiltração foram estudados por Campbell e Glatz (2009b) para isolar essas proteínas da fração líquida da extração aquosa de óleo de soja.

A seleção das enzimas, o desempenho destas e as condições ótimas de extração variam de acordo com a composição e estrutura do vegetal oleaginoso e são determinantes para o custo do processo. Portanto, fatores técnicos e econômicos devem ser considerados para o estabelecimento do processo enzimático. Dados das propriedades intrínsecas da enzima (pH e temperatura ótimos de atuação, suscetibilidade à inibição, estabilidade em determinadas condições operacionais) e do óleo a ser extraído (estabilidade frente pH, temperatura e agentes oxidantes) devem ser considerados em conjunto para o estabelecimento do processo de extração. Do ponto de vista econômico, por exemplo, o ideal seria que nenhum composto químico precisasse ser adicionado à mistura vegetal-água para que a enzima funcionasse, dessa maneira uma enzima que atuasse em uma ampla faixa de pH poderia ser selecionada para o processo, a fim de evitar ajustes de pH. O tipo e a severidade do pré-tratamento aplicado ao vegetal também exercerão forte influência, positiva

ou negativa, sobre a ação da enzima. Logo, é necessária a seleção de enzimas que funcionem bem sobre o vegetal pré-tratado, ou que o pré-tratamento seja ajustado para que a enzima mantenha um elevado desempenho. Nesse último caso, deve-se verificar se as condições de pré-tratamento não irão degradar o óleo quimicamente. Após a escolha da enzima e definição das condições operacionais de pré-tratamento, outros ajustes, como a relação sólido-líquido, pH, temperatura, tempo de reação e concentração enzimática, podem ser realizados para a obtenção do melhor rendimento e eficiência de extração (Rosenthal et al., 1996; Casas; Domínguez González, 2017).

Alguns estudos concluíram que a utilização de um coquetel enzimático, em vez de uma única enzima, melhora a eficiência da extração do óleo devido a atividades sinérgicas da formulação, garantindo a degradação das paredes celulares e membranas. Para o óleo de karité, por exemplo, a combinação de protease, glucanase, celulase e hemicelulase resultou em uma maior eficiência de extração do óleo (Tano-Debrah; Ohta, 1994). Da mesma forma, em sementes de acácia branca ocorreu aumento da eficiência com a utilização combinada das enzimas protease neutra, pectinase, celulase e alfa amilase (Abdulkarim et al., 2006).

A Tabela 1 apresenta uma compilação de relatos de literatura com as condições de trabalho e os resultados de eficiência de extração de óleo com utilização de enzimas em diferentes espécies vegetais.

Pré-tratamento

O pré-tratamento tem como objetivo afrouxar a estrutura da célula vegetal para facilitar a liberação do óleo contido e permitir que o solvente ou enzima tenham contato com as respectivas moléculas-alvo. Pode ser também feito mecanicamente, por meio de solventes, ou em combinação com enzimas.

Nos tratamentos enzimáticos, a biomassa rica em óleo é triturada ou moída previamente, para aumentar a área de contato entre a enzima e a matriz vegetal (Casas; Domínguez González, 2017). Esse pré-tratamento pode ser combinado com tratamentos térmicos e termofísicos, extrusão e processos pressurizados, para a extração simultânea de óleo e proteínas (Rosenthal et al., 2001; Lamsal et al., 2006; Jung; Mahfuz, 2009).

A extrusão é um processo mecânico que submete o material a alta temperatura e força de cisalhamento em um curto período. A área superficial de contato é aumentada nessas condições, o que melhora a ação das enzimas sobre os componentes celulares, além de promover desnaturação proteica. Esses dois efeitos da extrusão resultam em aumento da eficiência da extração do óleo, dado o maior acesso das enzimas aos substratos e à desestabilização das emulsões, respectivamente (Lamsal et al., 2006).

Nos estudos de Jung e Mahfuz (2009), foram utilizados processos de extrusão e pressurização antes da adição de enzimas para extração do óleo e das proteínas da soja floculada, obtendo-se eficiência de 90% e 82%, respectivamente. Alta eficiência (88%) também foi observada por Lamsal et al. (2006) com a utilização, somente, da extrusão.

Outros pré-tratamentos como ultrassom e micro-ondas têm sido explorados para aumentar a eficiência de extração e serão explicados com mais detalhes na seção “Métodos combinados”.

Relação sólido-líquido no sistema

A quantidade de água no sistema é um fator fundamental, visto que a digestão enzimática acontece em meio aquoso. Dessa forma, em baixas quantidades de água, ocorre a formação de uma suspensão espessa que dificulta o contato da enzima e do substrato. Por outro lado, elevadas quantidades de água proporcionam diminuição da interação das enzimas com a matriz vegetal e geram aumento no volume de resíduos e emulsão, ocasionando altos custos para o tratamento de resíduos e para a desemulsificação (Zhang et al., 2007; Casas; Domínguez González, 2017). Exemplos de relação sólido-líquido em extração aquosa de óleos vegetais estão apresentados na Tabela 1.

pH

O pH da solução é ajustado de acordo com a atividade ótima da enzima que vai ser utilizada e mantida pelo tampão durante todo o processo, ou é fixado no início do processo e pode variar durante a incubação e extração (Casas; Domínguez González, 2017). Vale ressaltar que em condições de pH muito distintas do ótimo para a atividade da enzima em uso, será necessária a adi-

ção de maior quantidade da mesma para assegurar a eficiência da extração de óleos, o que pode impactar no custo final de produção.

Além disso, muitas enzimas apresentam faixas de pH ótimas no mesmo intervalo do ponto isoelétrico das proteínas da estrutura celular da oleaginosa. No ponto isoelétrico, as proteínas são insolúveis no meio aquoso, o que pode dificultar a extração do óleo. Dessa forma, o intervalo de pH utilizado deve ser adequado à máxima atividade enzimática e, ao mesmo tempo, não coincidir com o ponto isoelétrico da proteína (Rosenthal et al., 1996; Tabtabaei; Diosady, 2013). Para os processos de extração assistidos por proteases, o problema da insolubilidade das proteínas estruturais das células vegetais em função do pH é minimizado, visto que essas enzimas são capazes de dividir grandes aglomerados proteicos em fragmentos menores e solúveis no meio aquoso.

Outros aspectos que devem ser tomados em conta na escolha do pH incluem o custo do agente químico utilizado para o ajuste ao valor desejado (ácidos, sais, álcali), o tratamento da fração líquida residual e possíveis alterações químicas causadas em outros componentes da biomassa, os quais poderiam ter sua aplicação comprometida em outros processos. Para exemplos de valores de pH aplicados a diferentes condições de extração aquosa de óleos vegetais, Ver Tabela 1.

Temperatura

A temperatura é determinada em função da atividade enzimática, das implicações sobre a qualidade do óleo e da facilitação de extração. Em geral, busca-se aproximar o processo da temperatura na qual a enzima apresenta atividade máxima, sem comprometer reações de acidificação e oxidação dos lipídeos. Temperatura muito elevada pode causar a desnaturação proteica, com conseqüente inativação enzimática, além de promover o escurecimento do óleo e a degradação de bioativos e proteínas de interesse (Casas; Domínguez González, 2017).

A necessidade de um ajuste fino para a temperatura foi evidenciado num estudo realizado por Sharma et al. (2002). Reportou-se que, com o decréscimo de 3 °C no processo de extração do óleo de amendoim, o valor de

rendimento da extração foi reduzido em 10% devido à menor atividade do coquetel de proteases utilizado.

Tempo

De maneira geral, quanto maior o tempo de reação, maior a degradação das estruturas celulares pelas enzimas e, conseqüentemente, maior o rendimento de extração do óleo. Assim, o tempo é selecionado conforme a enzima ou o coquetel de enzimas e a matriz vegetal utilizados (Tabela 1).

Em extração aquosa de óleo de soja empregando-se protease (0,5%), observou-se que em períodos de incubação entre 1 hora e 1 hora e 25 minutos, a 50 °C alcançou-se 90% de eficiência da extração (Jung; Mahfuz, 2009). Para óleo da semente de acácia branca extraído em meio aquoso e com assistência de proteases, não houve diferença entre os tempos 1 hora, 12 horas e 5 minutos e 24 horas, atingindo em torno de 75% de eficiência (Mat Yusoff et al., 2016). Já para o amendoim tratado com proteases, relatou-se aumento expressivo a partir 5 horas de reação até 18 horas, o qual foi considerado como o tempo ótimo, atingindo eficiência de extração de 86% a 92%. (Sharma et al., 2002).

Concentração Enzimática

A relação entre as quantidades de enzima e substrato é um fator que afeta significativamente a eficiência de extração e os custos do processo. Concentrações enzimáticas de 0,5% a 5% do peso da biomassa, por exemplo, foram selecionados para a extração do óleo de vários grãos e frutos como a soja (Jung; Mahfuz, 2009), a semente de mostarda amarela (Tabtabaei; Diosady, 2013) e o buriti (Silva, 2016). A eficiência da extração do óleo da semente do damasco foi reduzida em concentrações de enzima (pectinase e celulase na proporção de 1:1) maiores que 0,3% a 0,4% devido à formação de emulsões óleo em água, prejudicando a liberação do glóbulo de óleo (Bisht et al., 2013). Por outro lado, em concentrações muito inferiores, a hidrólise das estruturas celulares acontece de maneira pouco efetiva, afetando a eficiência da extração. Exemplos de concentração de enzimas e respectivas eficiências de extração de óleo podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1. Eficiência e condições de processos de estudos de extração aquosa assistida por enzimas.

Biomassa	Enzimas	Pré-tratamento	Condições de operação					Eficiência	Referência
			pH	Relação líquido-sólido (v/m)	Temperatura	Tempo (h)	Enzimal/ Substrato (m/m)		
Soja	Protease (Protex 7L)	Extrusão e pressurização	7 e 8	10:1	50°C	1,25	0,5%	90%	Jung e Mahfuz (2009)
Soja	Protease (Alcalase 2.4L)	Moagem e térmico	9	20:1	50°C	0,5	0,1%	74,64%	Rosenthal et al. (2001)
Soja	Protease (Multifect neutral)	Extrusão	7	10:1 m/m	50°C	1	5%	88%	Lamsal et al. (2006)
Amendoim	Protease (Protizyme)	Moagem	4	2:1	40°C	18	3%	86-92%	Sharma et al. (2002)
Colza	Pectinase, celulase, b-glucanase	Moagem e térmico	5	5:1	48°C	4	2,5%	73-76%	Zhang et al. (2006)
Amêndoa selvagem iraniana	Protease e celulase (Alcalase 2.4L e Celluclast 1.5)	Moagem	5	4:1	50°C	4	1%	77,80%	Balvardi et al. (2015)
Semente de acácia branca	Protease e celulase	Moagem	4.5	6:1	40°C	12,5	2%	72,75%	Mat Yusoff et al. (2016)
Semente de mostarda amarela	Protease, celulase e pectinase (Celluclast 1.5L, Visozyme L, Pectinex Ultra SP-L)	Moagem	4,8-5	4:1	40-42°C	3	3%	76,30%	Tabatabaei e Diosady (2013)
Semente de gergelim	Protease (Alcalase 2.4L)	Moagem e térmico	NI	6:1	45°C	2	2%	57,40%	Latif e Anwar (2011)

Continua...

Tabela 1. Continuação..

Biomassa	Enzimas	Pré-tratamento	Condições de operação					Eficiência	Referência
			pH	Relação líquido-sólido (v/m)	Temperatura	Tempo (h)	Enzimal/ Substrato (m/m)		
Farelo de arroz	Protease, amilase e celulase (Protizyme e Palkodex)	NI	7	4:1	65°C	18	2%	77%	Sharma et al. (2002)
Buriti	Celulase, pectinase e Alcalase	NI	NI	1:1	55°C	3	4%	95,91%	Silva (2016)
Coco	Hemicelulase (Gamanase 1.0L)	Moagem e secagem	4,5	10:1	50°C	20	2%	84%	Chen e Diosady (2003)
Palma	Celulase, pectinase e tanase	Térmico e esmagamento	4,7	2:1	50°C	0,5	4%	81,15%	Teixeira et al. (2013)
Pequi	Pectinase e carboximetilcelulase	Moagem (fracionado)	NI	3:1	45°C	1,5	1%	22%	Mariano (2008)
Semente de pinhão manso	Protease (Protizyme)	Moagem e ultrassom	9	6:1	50°C	6	5%	74%	Shah et al. (2005)
Sementes de romã	Pectinase (Peclyve V)	Moagem e ultrassom	5	6:1	55°C	0,167 min	2%	95,8%	Goula et al. (2016)
Semente de karité	Protease, glucanase, celulase, hemicelulase	Moagem	NI	4:1	50°C	4	NI	74,1%	Tano e Otha (1994)
Semente de acácia branca	Protease, alfa amilase, celulase e pectinase.	Moagem	7,5	6:1	45°C	36	2%	74%	Abdulkarim et al. (2006)

NI: Valores não informados.

Métodos combinados para aprimorar a eficiência de extração aquosa

Além da utilização de enzimas na extração aquosa de óleos vegetais, outras técnicas podem assistir o processo para melhorar a sua eficiência, como a utilização de ultrassom e de micro-ondas e a adição de sais, que podem ser usadas separadamente ou combinadas.

Extração aquosa assistida por ultrassom

O ultrassom é uma forma de energia associada à faixa de sons com frequência acima do intervalo audível do ouvido humano, acima de 20 kHz (Young; Freedman, 2008). Devido à baixa energia relacionada à alta frequência da onda, não há interação da energia com as moléculas de forma direta, mas ocorre interação de forma indireta pelo fenômeno de cavitação (Lavilla; Bendicho, 2018). Na cavitação, ocorre a formação e o crescimento de bolhas, seguido de seu colapso, que leva ao rompimento da matriz celular, favorecendo a liberação dos componentes de interesse, como o óleo, e facilitando a penetração do solvente no material intracelular (Gutte et al., 2015).

As principais vantagens dessa técnica são o baixo tempo de processo, seletividade, reprodutibilidade, utilização de condições brandas durante a operação e economia de energia. Os dois últimos aspectos caracterizam essa técnica como uma tecnologia verde ou sustentável (Lavilla; Bendicho, 2018).

Em estudos de otimização para a melhoria da extração de óleo em vegetais, o ultrassom é aplicado como tratamento combinado com solventes orgânicos, extração aquosa e extração aquosa assistida por enzimas. A extração de óleo de farelo de arroz realizada com o pré-tratamento de ultrassom, 70 minutos a 25 °C, seguida da extração aquosa a 45 °C por 15 minutos em pH 12, resultou em eficiência de extração similar àquela obtida com solvente orgânico (Khoei; Chekin, 2016).

A extração aquosa de óleo de pinhão-mansão assistida por enzimas ou apenas tratada com ultrassom alcançou valor similar de 74% de eficiência. Já o uso combinado de ambas as técnicas apresentou uma importante vanta-

gem, que foi a redução do tempo do processo em cerca de 12 horas (Shah et al., 2005).

A mesma tendência de redução no tempo de processo foi observada para a extração aquosa assistida por enzimas de óleo de romã com o pré-tratamento de ultrassom (Goula et al., 2018). Verificou-se um aumento de 18,4% na eficiência e redução de 91,7% no tempo de extração do óleo, em relação à extração sem a utilização do ultrassom. A combinação das enzimas e ultrassom resultou em uma eficiência de 95,8% em 10 min de extração.

Micro-ondas

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas, geradas pela oscilação perpendicular de um campo elétrico e um campo magnético, que apresentam comprimentos de ondas que variam de 1 m a 1 mm e frequências de 0,3 a 300 GHz. Por não ter energia suficiente para ionização de átomos, as micro-ondas não têm ação nas estruturas moleculares e são utilizadas na extração devido ao processo de conversão de energia eletromagnética em energia térmica. Ademais, essas ondas podem provocar o aumento da temperatura com base nas propriedades dielétricas dos materiais, tornando o aquecimento mais seletivo (Rodríguez et al., 2018). Essa seletividade confere maior agilidade à transferência de calor, ocasionando diminuição do tempo de extração e do volume de equipamentos utilizados (Li et al., 2013; Rodríguez et al., 2018). O equipamento de micro-ondas, ao ser associado à extração aquosa e a outros processos auxiliares, como ultrassom e adição de enzimas, pode favorecer a separação de compostos bioativos, como flavonoides e polissacarídeos (Chan et al., 2011; Hu et al., 2018, 2020).

A utilização das micro-ondas e do ultrassom, como pré-tratamentos na extração aquosa assistida por enzimas do óleo das sementes de cereja, proporcionou eficiência de extração de 84% no tempo de 38 minutos (Hu et al., 2018). Ainda, esse conjunto de procedimentos propiciou maior recuperação de compostos bioativos, quando comparado ao óleo extraído por solvente. Eficiência de extração próxima (85,23%) também foi observada para noz de tigre tendo como pré-tratamentos micro-ondas e ultrassom (Hu et al., 2020).

Extração aquosa assistida pela adição de sais

Como já citado, na extração aquosa pode ocorrer formação de emulsão rica em óleo após o processo de separação por centrifugação. Uma estratégia para superar essa dificuldade é a utilização de solução de carbonato ou bicarbonato de sódio, no lugar da água pura para maceração do tecido vegetal. Estudos têm demonstrado que esses sais podem evitar ou diminuir a formação de emulsão e, conseqüentemente, facilitar a liberação do óleo e aumentar a eficiência de extração (Yu et al., 2013; Gao et al., 2015; Liu et al., 2017).

A extração aquosa do óleo da linhaça alcançou a maior eficiência, 87,55%, quando realizada com solução de carbonato de sódio 2 M e com a relação biomassa/solução de 10 m/g e temperatura de 60 °C (Gao et al., 2015). Óleo de semente de camélia foi extraído com 88,4% de eficiência com o uso de solução de carbonato de sódio 1,4 M e não foi observada a formação de emulsão (Yu et al., 2013).

Na extração aquosa de óleo de amêndoa amarga, foi utilizado o bicarbonato de sódio na concentração de 0,4 M. Apesar de a solução não evitar totalmente a emulsificação, a eficiência do processo foi de 90,9% contra 55% do tratamento apenas com água. Imagens de microscopia eletrônica do material residual da extração mostraram menor quantidade de glóbulos de óleo na biomassa tratada com o bicarbonato de sódio e que os glóbulos remanescentes coalesceram (Liu et al., 2017).

Considerações finais

A extração de óleos de grãos como soja e canola, importantes fontes em nível global, se dá majoritariamente empregando o hexano como solvente. Por outro lado, a extração é feita de forma eficiente para outras commodities oleaginosas, nas quais o óleo é encontrado nos frutos, como o óleo de palma e de oliva, sem o uso de solvente orgânico. Considerando-se as problemáticas envolvendo os solventes orgânicos, tem-se buscado desenvolver tecnologias alternativas também para os grãos oleaginosos.

Um processo promissor é a extração em meio aquoso, para o qual já se tem obtido boas taxas de eficiência, embora em escala experimental. Existem desafios a serem superados neste tipo de processo, destacando-se a formação de emulsões e baixa liberação dos glóbulos de óleos. Ferramentas auxiliares estão sendo agregadas à extração aquosa, como a adição de enzimas, uso de ultrassom e micro-ondas, bem como uso de solução salina, para melhorar a eficiência do processo.

Outro aspecto relevante é a necessidade de se desenvolver formas de aproveitamento dos resíduos gerados, para minimizar possíveis impactos ambientais e como forma de se agregar valor à cadeia produtiva. Por exemplo, a extração aquosa assistida por enzimas do óleo de soja resulta numa fração sólida que é correspondente ao farelo proteico obtido na extração por solvente. Esta fração proteica deve ser avaliada quanto ao melhor aproveitamento das suas propriedades nutricionais e funcionais. Em paralelo, é necessário estudar a fração líquida, considerando-se o reuso da água e a separação de compostos que podem ser transformados em bioprodutos de interesse comercial. Por fim, para que estas novas abordagens sejam incorporadas no meio produtivo, é fundamental que se tenha viabilidade econômica para aplicação em larga escala.

Referências

ABDULKARIM, S. M.; LONG, K.; LAI, O. M.; MUHAMMAD, S. K. S.; GHAZALI, H. M. Use of enzymes to enhance oil recovery during aqueous extraction of *Moringa oleifera* seed oil. **Journal Food Lipids**, v. 13, p. 113-130, May 2006. DOI: 10.1111/j.1745-4522.2006.00038.x.

AGU, R. S.; EZE P. C.; OMEJE C. U. Separation of oil palm kernel and shell mixture using soil and palm ash slurries. **Nigerian Journal of Technology**, v. 36, n. 2, p. 621-627, Apr. 2017. DOI: 10.4314/njt.v36i2.38.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 10 p.

BALVARDI, M.; MENDIOLA, J.A.; CASTRO-GOMEZ, P.; FONTECHA, J.; REZAEI, K.; IBANEZ, E. Development of pressurized extraction processes for oil recovery from Wild Almond (*Amygdalus scoparia*). **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 92, n. 10, p.1503-1511, Oct. 2015. DOI: 10.1007/s11746-015-2708-2.

BASIRON, Y. Palm Oil. In: BASIRON, Y. **Bailey's industrial oil and fat products**. 6th Edition. [New York]: John Wiley & Sons, 2005. p. 333-423

- BISHT, T.; SHARMA, S. K.; SATI, R. C.; RAO, V. K.; YADAV, V. K.; DIXIT, A. K.; SHARMA, A. K.; CHOPRA, C. S. Improvement of efficiency of oil extraction from wild apricot kernels by using enzymes. **Association of Food Scientists and Technologist**, v. 52, p. 1543-1551, Aug. 2013. DOI: 10.1007/s13197-013-1155-z.
- BOSS, E. A. **Análise do desempenho de plantas de extração de óleos convencionais e de processos supercríticos**. 2000. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 1, de 30 de janeiro de 2012. [Estabelece o Regulamento Técnico do Azeite de Olive e dos Óleos de Bagaço de Oliva]. **Diário Oficial da União**: seção 1, ano 2012, p. 5-8, 1 fev. 2012 Disponível em: <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=237204>. Acesso em: 26 jan. 2022.
- BRENNAN, J. G.; BUTTERS, J. R.; COWELL, N. D.; LILLEY, A. E. V. **Food engineering operations**. Linton Road: Elsevier Applied Science, 1990. 706 p.
- CAMPBELL, K. A.; GLATZ, C. E. Mechanisms of aqueous extraction of soybean oil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, p. 10904-10912, Nov. 2009a. DOI: 10.1021/jf902298a.
- CAMPBELL, K. A.; GLATZ, C. E. Protein recovery from enzyme-assisted aqueous extraction of soybean. **Biotechnology Progress**, v. 26, p. 488-495, Nov. 2009b. DOI: 10.1002/btpr.341.
- CAMPBELL, K. A.; GLATZ, C. E.; JOHNSON, L. A.; JUNG, S.; MOURA, J. M. N. de; KAPCHIE, V.; MURPHY, P. Advances in aqueous extraction processing of soybeans. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 88, p. 449-465, Dec. 2011. DOI: 10.1007/s11746-010-1724-5.
- CASAS, M. P.; DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ, H. Enzyme-Assisted Aqueous Extraction Processes. In: DOMINGUEZ GONZÁLEZ, H.; GONZÁLEZ MUÑOZ, M. J. (ed.). **Water extraction of bioactive compounds: from plants to drug development**. Netherlands: Elsevier, 2017. p. 333-368.
- CHAN, C.-H.; YUSOFF, R.; NGOH, G.-C.; KUNG, F. W. L. Microwave-assisted extractions of active ingredients from plants. **Journal of Chromatography A**, v. 1218, n. 37, p. 6213-6225, Sept. 2011. DOI: 10.1016/j.chroma.2011.07.040.
- CHEN, B.-K.; DIOSADY, L. L. Enzymatic aqueous processing of coconuts. **International Journal of Applied Science and Engineering**, v. 1, n. 1, p. 55-61, Mar. 2003.
- CHENG, M.-H.; SEKHON, J. J. K.; ROSENTRATER, K. A.; WANG, T.; JUNG, S.; JOHNSON, L. A. Environmental impact assessment of soybean oil production: Extruding-expelling process, hexane extraction and aqueous extraction. **Food and Bioproducts Processing**, v. 108, p. 58-68, Mar. 2018. DOI: 10.1016/j.fbp.2018.01.001.
- DOMÍNGUEZ, H.; NÚÑEZ, M. J.; LEMA, J. M. Enzymatic pretreatment to enhance oil extraction from fruits and oilseeds: a review. **Food Chemistry**, v. 49, n. 3, p. 271-286, 1994. DOI: 10.1016/0308-8146(94)90172-4.
- DORSA, R.; CARANTI, J. C. **Óleo de palma: o processo de extração**. 2016. Disponível em: <http://dorsa-caranti.com.br/wp-content/uploads/2016/08/Extrac%CC%A7a%CC%83o-O%CC%81leo-de-Palma.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2022.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **World markets and trade circular series. Oilseeds. PSD Reports. Table 3.** Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>. Acesso em: 26 jan. 2022.

FAVARO, S. P.; MIRANDA, C. H. B.; MACHADO, F.; SOARES, I. P.; JENSEN, A. T.; MEDEIROS, A. M. M. S. Oleaginous biomass for biofuels, biomaterials, and chemicals. In: VAZ, J. S. (ed.). **Biomass and green chemistry: Building a Renewable Pathway.** [S.l.]: Springer, 2018. p. 31-68.

FERNÁNDEZ, C.; GARCÍA, H. RAMÍREZ CONTRERAS, N.; GARCÍA NÚÑEZ, J. A. Impacto de la clarificación dinámica sobre el proceso de extracción y recuperación de aceite de palma crudo (estudio de caso). **Revista Palmas**, v. 37, n. 3, p. 47-64, 2016.

FIGUEIREDO, F.; CASTANHEIRA, E.; MARQUES, P.; RAMOS, A.; ALMEIDA, A.; RAMALHOSA, E.; PERES, F.; CARNEIRO, J.; PEREIRA, J. A.; FELICIANO, M.; GOMES, P.; FREIRE, F. **Avaliação de ciclo de vida do azeite e óleos vegetais: eco-eficiência e a eco-gestão no sector agro-industrial (Ecodeep).** [Coimbra], 2014. 88 p. Relatório técnico. Disponível em: http://www2.dem.uc.pt/CenterIndustrialEcology/projects/Outputs%20Ecodeep/Relatorios/Ecodeep_relatorio%20fileira%20azeite%20e%20oleos%20vegetais.pdf. Acesso em: 26 jan. 2022.

FULLBROOK, P. D. **Extraction of vegetable oils.** GB 2127 425A. UK, n. 8227661, 28 Sept. 1982. 11 Apr.1984.

GAO, Y.; WANG, N.; XU, LI-RONG; XIU-ZHU, YU. A novel process for the aqueous extraction of linseed oil based on nitrogen protection. **Advance Journal of Food Science and Technology**, v. 9, n. 8, p. 606-613, Sept. 2015.

GAONKAR, V.; ROSENTRATER, K. A.; Soybean. In: PAN, Z.; ZHANG, R.; ZICARI, S. (ed.). **Integrated processing technologies for food and agricultural by-products.** Massachusetts: Academic Press, 2019.p. 73-104.

GOULA, A. M.; PAPTAEODOROU, A.; KARASAVVA, S.; KADERIDES, K. Ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from pomegranate seeds. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, p. 1-11, Oct. 2018. DOI: 10.1007/s12649-016-9740-9.

GUTTE, K. B.; SAHOO, A. K.; RANVEER, R. C. Effect of ultrasonic treatment on extraction and fatty acid profile of flaxseed oil. **Oilseeds & fats Crops and Lipids**, v. 22, n. 6, article n. D606, Nov.-Dec. 2015. DOI: 10.1051/ocl/2015038.

HALIM, R. M.; RAMLI, R.; MAT, C. R. C.; MAY, C. Y.; BAKAR, N. A.; HADI, N. A. Dry separation of palm kernel and palm shell using a novel five-stage winnowing column system. **Technologies**, v. 4, n.13, Apr. 2016. DOI: 10.3390/technologies4020013.

HU, B.; LI, Y.; SONG, J.; LI, H.; ZHOU, Q.; LI, C.; ZHANG, Z.; LIU, Y.; LIU, A.; ZHANG, Q.; LIU, S.; LUO, Q. Oil extraction from tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) using the combination of microwave-ultrasonic assisted aqueous enzymatic method - design, optimization and quality evaluation. **Journal of Chromatography A**, v. 1627, n. 461380, Sept. 2020. DOI: 10.1016/j.chroma.2020.461380.

HU, B.; WANG, H.; HE, L.; LI, Y.; LI, C.; ZHANG, Z.; LIU, Y.; ZHOU, K.; ZHANG, Q.; LIU, A.; LIU, S.; ZHU, Y.; LUO, Q. A method for extracting oil from cherry seed by ultrasonic-microwave assisted aqueous enzymatic process and evaluation of its quality. **Journal of Chromatography A**, v. 1587, n. 22, p. 50-60, Feb.2019. DOI: 10.1016/j.chroma.2018.12.027.

JUNG, S.; MAHFUZ, A. A. Low temperature dry extrusion and high-pressure processing prior to enzyme-assisted aqueous extraction of full fat soybean flakes. **Food Chemistry**, v. 114, n. 3, p. 947-954, June 2009. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.10.044.

KHOEI, M.; CHEKIN, F. The ultrasound-assisted aqueous extraction of rice bran oil. **Food Chemistry**, v. 194, p. 503-507, Mar. 2016. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.08.06.

KOUBAA, M.; MHEMDI, H.; BARBA, F. J.; ROOHINEJAD, S.; GREINER, R.; VOROBIEV, E. Oilseed treatment by ultrasounds and microwaves to improve oil yield and quality: An overview. **Food Research International**, v. 85, p. 59-66, Jul 2016. DOI: 10.1016/j.foodres.2016.04.007.

LAMSAL, B. P.; MURPHY, P. A.; JOHNSON, L. A. Flaking and extrusion as mechanical treatments for enzyme-assisted aqueous extraction of oil from soybeans. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 83, n. 11, p. 973-979, Nov. 2006. DOI: 10.1007/s11746-006-5055-5.

LATIF, S.; ANWAR, F. Aqueous enzymatic sesame oil and protein extraction. **Food Chemistry**, v. 125, n. 2, p. 669-684, mar. 2011. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.09.064.

LAVILLA, I.; BENDICHO, C. Fundamentals of ultrasound-assisted extraction. In: GONZÁLEZ, H. D.; MUÑOZ, M. J. G. (ed.). **Water Extraction of Bioactive Compounds**. [Amsterdam]: Elsevier, 2018. p. 291-316.

LI, Y.; FABIANO-TIXIER, A. S.; VIAN, M. A.; CHEMAT, F. Solvent-free microwave extraction of bioactive compounds provides a tool for green analytical chemistry. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 47, p. 1-11, June. 2013. DOI: 10.1016/j.trac.2013.02.007.

LIU, L.; XIUZHU, YU; ZHAO, Z.; LIRONG, XU; ZHANG, R. Efficient salt-aided aqueous extraction of bitter almond oil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, n. 11, Aug. 2017. DOI: 10.1016/j.trac.2013.02.007.

MARIANO, R. G. B. **Extração do óleo da polpa de pequi (*Caryocar brasiliense*) por processos convencionais combinados com tecnologia enzimática**. 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

MAT YUSOFF, M.; GORDON, M. H.; NIRANJAN, K. Aqueous enzymatic extraction of *Moringa oleifera* oil. **Food Chemistry**, v. 211, n. 15, p. 400-408, Nov. 2016. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.05.050.

MPAGALILE, J. J.; HANNA, M. A.; WEBER, R. Design and testing of a solar photovoltaic operated multi-seeds oil press. **Renewable Energy**, v. 31, n. 12, p. 1855-1866, Oct. 2006. DOI: 10.1016/j.renene.2005.09.025.

MUNDER, S.; LATIF, S.; MULLER, J. Enzyme-assisted aqueous oil extraction from high oleic sunflower seeds in a scalable prototype reactor. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 899-908, Aug. 2020. DOI: 10.1007/s12649-018-0418-3.

NDE, D. B.; FONCHA, A. C. Optimization methods for the extraction of vegetable oils: a review. **Processes**, v. 8, n. 209, Jan. 2020. DOI: 10.3390/pr8020209.

POKU, K. Small-scale palm oil processing in Africa. **FAO Agricultural Services Bulletin 148**, 2002. Disponível em: <http://www.fao.org/3/y4355e/y4355e00.htm#Contents>. Acesso em: 26 jan. 2022.

RAMALHO, H. F.; SUAREZ, P. A. Z. A química dos óleos e gorduras e seus processos de extração e refino. **Revista Virtual Química**, v. 5, n. 1, p. 2-15, 2013.

RITTNER, H. **Óleo de mamona e derivados**. São Paulo: H. Rittner, 1996. 559 p.

RODRÍGUEZ, S. P.; FLÓREZ-FERNÁNDEZ, N.; CONDE P. E.; DOMÍNGUEZ, G. H. Microwave-Assisted Water Extraction. In: GONZÁLEZ, H. D.; MUÑOZ, M. J. G. (ed.). **Water extraction of bioactive compounds** - 2018. p. 163-198.

ROSENTHAL, A.; PYLE, D. L.; NIRANJAN, K. Aqueous and enzymatic processes for edible oil extraction. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 19, n. 6, p. 402-420, Nov. 1996. DOI: 10.1016/S0141-0229(96)80004-F.

ROSENTHAL, A.; PYLE, D.; NIRANJAN, K.; GILMOUR, S.; TRINCA, L. Combined effect of operational variables and enzyme activity on aqueous enzymatic extraction of oil and protein from soybean. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 28, n. 6, p. 499-509, Apr. 2001. DOI: 10.1016/S0141-0229(00)00351-3.

TRAPANI, S.; GUERRINI, L.; MASELLA, P.; PARENTI, A.; CANUTI, V.; PICCHI, M.; CARUSO, G.; GUCCI, R.; ZANONI, B. A kinetic approach to predict the potential effect of malaxation time-temperature conditions on extra virgin olive oil extraction yield. **Journal of Food Engineering**, v. 195, p. 182-190, Feb. 2017. DOI: 10.1016/j.foodeng.2016.09.032.

SASAKI, M. **Lipídios, carboidratos e proteínas de sementes de leguminosas do Cerrado**. 2008. 75 f. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SERRATO, A. G. Extraction of oil from soybeans. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 58, p. 157-159, Mar. 1981. DOI: 10.1007/BF02582327.

SHAH, S.; SHARMA, A.; GUPTA, M. N. Extraction of oil from *Jatropha curcas* L. seed kernels by combination of ultrasonication and aqueous enzymatic oil extraction. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 1, p. 121-123, Jan. 2005. DOI:10.1016/j.biortech.2004.02.026.

SHARMA, A.; KHARE, S. K.; GUPTA, M. N. Enzyme-assisted aqueous extraction of peanut oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 79, p. 215-218, Mar. 2002. DOI: 10.1007/s11746-002-0463-0.

SILVA, J. P. P. **Extração aquosa de óleo do buriti (*Mauritia flexuosa*) assistida por enzimas**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA.

SINGH, J.; BARGALE, P. C. Development of a small capacity double stage compression screw press for oil expression. **Journal of food engineering**, v. 43, n. 2, p. 75-82, Feb. 2000. DOI: /10.1016/S0260-8774(99)00134-X.

TABTABAEI, S.; DIOSADY, L. L. Aqueous and enzymatic extraction processes for the production of food-grade proteins and industrial oil from dehulled yellow mustard flour. **Food Research International**, v. 52, n. 2, p. 547-556, July. 2013. DOI: 10.1016/j.foodres.2013.03.005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 274 p.

TANO-DEBRAH, K.; OHTA, Y. Enzyme-assisted aqueous extraction of fat from kernels of the shea tree, *Butyrospermum parkii*. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 71, n. 9, p. 979-983, Sept. 1994. DOI: 10.1007/BF02542265.

TEIXEIRA, C. B.; MACEDO, G. A.; MACEDO, J. A.; SILVA, L. H. M. da. RODRIGUES, A. M. da C. Simultaneous extraction of oil and antioxidant compounds from oil palm fruit (*Elaeis guineensis*) by an aqueous enzymatic process. **Bioresource Technology**, v. 129, p. 575-581, Feb. 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.11.057.

TEPELLI, F. Perspectives on supercritical fluid processing of fats and oils. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 47, n. 3, p. 583-590, Jan. 2009. DOI: 10.1016/j.supflu.2008.10.014.

TZEN, J. T. C.; CAO, Y. Z.; LAURENT, P.; RATNAYAKE, C.; HUANG, A. H. C. Lipids, proteins, and structure of seed oil bodies from diverse species. **Plant Physiology**, v. 101, n. 1, p. 267-276, Jan. 1993. DOI: 10.1104/pp.101.1.267.

UCEDA, M.; JIMÉNEZ, A.; BELTRÁN, G. Olive oil extraction and quality. **Grasas y aceites**, v. 57, n. 1, p. 25-31, 2006. DOI: 10.3989/gya.2006.v57.i1.19.

WOLF, W.; BAKER, F. Scanning electron microscopy of soybeans, soy flours, protein concentrates, and protein isolates. **Cereal Chemistry**, v. 52, n. 3, p. 387-396, 1975.

YOUNG, H.; FREEDMAN, R. **Física II-termodinâmica e ondas**. 12. ed.. São Paulo: Pearson, 2008.

YU, X.; LI, Q.; SHUANG-KUI, DU; ZHANG, R.; XU, C. A novel process for the aqueous extraction of oil from *Camellia oleifera* seed and its antioxidant activity. **Grasas y Aceites**, v. 64, n. 4, p. 407-414, Sept. 2013.

ZHANG, S. B.; WANG, Z.; XU, S. Y. Optimization of the Aqueous Enzymatic Extraction of Rapeseed Oil and Protein Hydrolysates. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 84, n.1, p. 97-105, 2006. DOI: 10.1007/s11746-006-1004-6.

Embrapa

Agroenergia