
Subprodutos e resíduos da indústria de alimentos: fontes estratégicas de compostos bioativos

Hugo José Martins Carvalho, Sandra de Oliveira Silva, Adelaine Camargos Batista, Lucas Henrique Ramos de Oliveira, Gabriel Júnio Silva Souza, Raquel Guidetti Vendruscolo

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-21-3.c3>

Resumo

Este capítulo explora o potencial dos subprodutos e resíduos da indústria de alimentos como fontes estratégicas de compostos bioativos, que possuem múltiplas aplicações em áreas como alimentos funcionais, nutracêuticos, farmacêuticos e cosméticos. Diversas frações alimentares, muitas vezes descartadas, contêm compostos bioativos valiosos, como compostos fenólicos, pigmentos, vitaminas e ácidos graxos, que podem desempenhar funções benéficas, como propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e anticancerígenas. A recuperação desses compostos representa uma abordagem econômica e sustentável, alinhada com a implementação da economia circular, uma vez que reduz a geração de resíduos e agrega valor aos subprodutos.

Palavras-chave: compostos fenólicos, vitaminas, carotenoides, ácidos graxos poli-insaturados, tecnologias emergentes

1. INTRODUÇÃO

Evidências científicas atuais têm identificado inúmeros compostos bioativos em quantidades substanciais em frações alimentares geralmente consideradas não comestíveis, as quais são classificadas como subprodutos ou

até mesmo resíduos. Esses compostos podem ser rentabilizados devido às suas múltiplas aplicações, incluindo alimentos funcionais, nutracêuticos, farmacêuticos e cosméticos (Socas-Rodríguez et al., 2021). A recuperação de compostos bioativos a partir de subprodutos ou resíduos alimentares é um tema relevante na ciência de alimentos, representando uma estratégia econômica e sustentável, especialmente quando aplicadas abordagens de valorização adequadas (Kumar et al., 2017; de la Luz Cadiz-Gurrea et al., 2020).

Compostos bioativos são moléculas orgânicas ou inorgânicas naturalmente presentes nos alimentos, que vão além do fornecimento de energia e nutrição, pois possuem a capacidade de alterar vias ou processos metabólicos de forma positiva. Conseqüentemente, ao serem incorporados à dieta, atuam de forma eficaz na prevenção e no tratamento de doenças (Dixit et al., 2023). Entre as moléculas bioativas destacam-se aminoácidos, compostos fenólicos, esteróis, pigmentos, vitaminas, polissacarídeos e ácidos graxos. As principais atividades relatadas incluem propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, anticancerígenas, antimicrobianas, imunomoduladoras e antidiabéticas (Gil et al., 2020; Omachi et al., 2024).

Se extraídos e isolados adequadamente, esses compostos representam um valioso conjunto de moléculas de elevado valor agregado (Gil-Chávez et al., 2013). Os resíduos de frutas e vegetais, que em 2019 representaram mais de 38% dos resíduos totais gerados pela indústria de alimentos, contêm concentrações consideráveis de compostos bioativos, configurando-se como uma fonte promissora dessas moléculas. Entre as vantagens desse aproveitamento destacam-se a abundante disponibilidade, o menor custo, a redução da geração de subprodutos e resíduos, a agregação de valor, a promoção da sustentabilidade e o apoio à implementação da economia circular (García e Raghavan, 2022; Liu et al., 2023).

A extração é a etapa crucial para a obtenção de moléculas bioativas. Ressalta-se que as condições de temperatura, pressão, tipo de solvente e técnica empregadas influenciam significativamente a quantidade e o tipo de compostos bioativos recuperados (Bar et al., 2022). A extração por solventes é a técnica convencional amplamente utilizada para obter esses compostos. Contudo, tem sido complementada por tecnologias como ultrassom e micro-

ondas, devido à redução do tempo de processamento aliada ao aumento do rendimento. Além disso, técnicas alternativas, como extração com fluido supercrítico e campo elétrico pulsado, têm substituído com eficiência os métodos convencionais (Candioti et al., 2014; Jha e Sit, 2022; Usman et al., 2022).

Diante do exposto, o objetivo central deste capítulo é condensar e apresentar, por meio de uma análise abrangente da literatura científica, o potencial dos subprodutos e resíduos da indústria de alimentos como fontes de compostos bioativos, destacando a relevância e aplicabilidade dessas moléculas, bem como os processos extrativos mais adequados para sua recuperação.

2. COMPOSTOS BIOATIVOS

Os Compostos Bioativos (CBA) são substâncias que não se enquadram na categoria de nutrientes tradicionais. Diferentemente dos nutrientes, que têm funções bem definidas e cuja ausência pode levar a deficiências ou doenças específicas, os CBA não possuem tais mecanismos totalmente estabelecidos (Hamzalioglu & Gökmen, 2016). Entretanto, pesquisas recentes têm evidenciado que eles desempenham funções benéficas quando consumidos como parte integrante dos alimentos (Anvisa, 2018).

Essas substâncias são encontradas em fontes de animal, mas principalmente em fontes de origem vegetal, destacando-se os alimentos funcionais, os quais são caracterizados por conterem concentrações mais elevadas destes compostos em comparação aos alimentos convencionais (Vilas-Boas et al., 2021). A presença desses compostos contribui significativamente para a promoção da saúde, além de desempenhar um papel crucial na prevenção e tratamento de diversas doenças.

Os compostos bioativos demonstram uma variedade de mecanismos de atuação, abrangendo a interação com proteínas, DNA e outras moléculas biológicas, o que resulta em respostas específicas no organismo, além de possuírem a capacidade de interromper a oxidação, através da inativação de radicais livres. Vale destacar também seu potencial de modular a microbiota intestinal, acarretando em melhoria na saúde digestiva, fortalecimento do sistema imunológico, redução de inflamação sistêmica, melhora da saúde mental

(eixo intestino-cérebro) e prevenção de doenças crônicas (Bastos et al., 2009; Reguengo et al., 2022).

Os compostos bioativos desempenham papéis cruciais na modulação de diversas funções celulares, esses compostos podem se ligar diretamente a proteínas, alterando sua conformação e, conseqüentemente, sua atividade enzimática (Moraes et al., 2022). Os flavonoides, por exemplo, podem inibir enzimas como a ciclooxygenase, reduzindo a inflamação (Bastos et al., 2009). Além disso, compostos como os polifenóis podem interagir com o DNA, protegendo-o contra danos oxidativos ao atuar como antioxidantes, neutralizando radicais livres (Furlan & Rodrigues, 2016).

Outro mecanismo importante é a modulação da expressão gênica, onde compostos bioativos podem ativar ou inibir vias de sinalização celular, influenciando a transcrição de genes específicos. Por exemplo, esses compostos podem ativar a via de sinalização do fator nuclear eritroide 2 relacionado ao fator 2 (Nrf2), que regula a expressão de genes envolvidos na resposta antioxidante (Bastos et al., 2009; Vomund et al., 2017).

O mecanismo de ação dos compostos bioativos para interromper a oxidação, envolve a doação de elétrons aos radicais livres, neutralizando-os e impedindo que causem danos às moléculas biológicas, como lipídios, proteínas e DNA (Verruck et al., 2018). Por exemplo, os flavonoides, encontrados em frutas cítricas, chá e vinho tinto, possuem grupos hidroxila que podem doar elétrons para neutralizar radicais livres, transformando-os em moléculas estáveis (Middleton et al., 2000; Moraes et al., 2022).

Os polifenóis, presentes em alimentos como uvas, maçãs e chocolate amargo, também atuam como antioxidantes potentes, protegendo as células contra o estresse oxidativo ao sequestrar radicais livres e interromper reações em cadeia que poderiam levar a danos celulares (Scalbert et al., 2005). Outro exemplo são os terpenoides, encontrados em plantas como o cúrcuma, que não só neutralizam radicais livres, mas também modulam a expressão de genes envolvidos na resposta antioxidante (Dinkova-Kostova & Talalay, 2008). Esses compostos bioativos, ao protegerem as células contra o estresse oxidativo, desempenham um papel vital na prevenção de doenças crônicas (Halliwell & Gutteridge, 2015).

Os CBAs que não são absorvidos podem ter efeitos biológicos no estômago ou intestino. Como o intestino é fundamental para a resposta imune, a atividade desses compostos no trato digestivo pode impactar a saúde de forma direta ou indireta. Quando chegam ao cólon, os compostos bioativos conjugados (CBAs) são quebrados pela microbiota intestinal, gerando diversos produtos que podem ser responsáveis pelos benefícios à saúde atribuídos aos CBAs originais. Um exemplo desse processo é o equol, uma isoflavona produzida a partir da daidzeína (encontrada na soja) pela microbiota intestinal, que possui uma atividade biológica muito maior do que seu precursor (Teixeira & Melo, 2021; Oliveira et al., 2020; Bastos et al., 2009).

Dentro do vasto espectro de bioativos, podemos destacar diversas classes, cada uma com propriedades específicas. Entre as principais classes estão os carotenoides, vitaminas e polifenóis, bem como ácidos graxos insaturados de cadeia longa (Georganas et al., 2020).

2.1. Vitaminas

As vitaminas, micronutrientes essenciais, desempenham um papel fundamental como reguladores de processos metabólicos no contexto da nutrição humana. Elas atuam na ativação de enzimas específicas e como agentes antioxidantes, sendo indispensáveis para assegurar o funcionamento adequado do organismo humano. Vale ressaltar que tais vitaminas não podem ser sintetizadas pelo corpo humano, tornando-se crucial obtê-las por meio da alimentação (Macedo & Matos, 2015).

Essas vitaminas podem ser classificadas em dois grupos distintos com base em sua solubilidade. O primeiro grupo compreende as vitaminas lipossolúveis, caracterizadas por sua solubilidade em gordura, vitaminas A, D, E e K. O segundo grupo abrange as vitaminas hidrossolúveis, composto pela vitamina C e pelas vitaminas do complexo B. Essa divisão em grupos reflete as propriedades físico-químicas dessas vitaminas, influenciando não apenas na sua absorção e transporte no organismo, mas também suas funções específicas no suporte à saúde (Bittencourt, 2018; Catania et al., 2009).

Nos resíduos vegetais, predominam as vitaminas hidrossolúveis devido ao baixo teor lipídico da maioria dos vegetais, os quais possuem maior teor de água. Isso é comum em folhas, tubérculos e frutos menos oleosos, onde o conteúdo de lipídios é insuficiente para a presença significativa de vitaminas lipossolúveis, assim, resíduos como cascas, polpas e folhas são ricos em vitaminas do complexo B e vitamina C (Macedo & Matos, 2015). No entanto, vegetais e frutos com maior teor lipídico, como abacate e oleaginosas, que possuem mais lipídios, ocorre maior incidência de vitaminas lipossolúveis (Silva, 2018).

Portanto, enquanto a maioria dos resíduos vegetais concentra vitaminas hidrossolúveis, subprodutos de vegetais ricos em lipídios oferecem uma combinação de vitaminas lipossolúveis e hidrossolúveis. Esses subprodutos são valiosos para a recuperação de nutrientes, contribuindo para a sustentabilidade e redução de desperdícios na cadeia alimentar (Georganas et al., 2020).

2.2. Carotenoides

Na natureza, encontram-se amplamente difundidos pigmentos conhecidos como carotenoides, responsáveis por conferir tons que variam entre o amarelo, o laranja e o vermelho em uma variedade de vegetais, microrganismos e alguns animais, os quais são caracterizados por sua estrutura química formada por cadeias de hidrocarbonetos altamente insaturados, que podem ser lineares ou cíclicas. Quimicamente, os carotenoides podem ser classificados em duas categorias principais: carotenos, compostos puramente hidrocarbonetos, e xantofilas, que contêm átomos de oxigênio em sua estrutura (Uenojo et al., 2007; Gomes, 2007).

Entre os carotenos mais conhecidos está o β -caroteno, pigmento alaranjando encontrado em elevadas concentrações em cenoura, abóbora, manga, mamão e também em vegetais verdes como espinafre, couve, brócolis e acelga, apesar das clorofilas mascararem a presença do carotenoide. Junto ao β -caroteno, destaca-se também o caroteno licopeno, de presença abundante em tomates, melancias e goiabas vermelhas (Ortega-Regules, Anaya de Parrodi & Lozada-Ramírez, 2023). Já dentre as xantofilas mais recorrentes estão a luteína

e zeaxantina, presentes, principalmente, em vegetais de folhas verdes, como espinafre e couve (Ben-Othman et al., 2020).

Os carotenoides possuem importantes propriedades anti-inflamatória e fotoprotetora, assim como antioxidante, uma vez que possuem elevada capacidade de neutralizar radicais livres, reduzindo o estresse oxidativo e contribuindo para a prevenção de doenças crônicas, como câncer, doenças cardiovasculares e neurodegenerativas. Vale mencionar que no organismo humano, os carotenoides β -caroteno, α -caroteno e β -criptoxantina são precursores da vitamina A, nutriente essencial na manutenção da saúde ocular, fortalecendo a visão e prevenindo condições como a degeneração macular. Ademais, foi evidenciado que o licopeno está associado à redução do risco de câncer de próstata e à melhoria da saúde cardiovascular. Essas propriedades bioativas tornam os carotenoides componentes-chave na promoção da saúde humana, com aplicações em alimentos funcionais, suplementos e cosméticos (Elvira-Torales, García-Alonso & Periago-Castón, 2019; Poojary, Naidu & Lee, 2021).

Georganas *et al.* (2020), ressaltam que o reaproveitamento de carotenoides presentes nos resíduos alimentares para a produção de ração animal pode contribuir para uma nutrição mais sustentável dos animais, aproveitando subprodutos que, de outra forma, seriam desperdiçados. A incorporação de carotenoides na ração animal, além de promover uma abordagem sustentável, também pode resultar em benefícios para a saúde dos animais, incluindo melhorias na qualidade da carne e dos ovos produzidos.

2.3. Polifenóis

Os polifenóis são compostos naturais encontrados principalmente nas plantas, caracterizados por sua estrutura que contém múltiplos anéis fenólicos. Esses compostos possuem pelo menos dois grupos fenol, o que lhes confere propriedades antioxidantes, sendo capazes de interagir com diversas moléculas biológicas. A diversidade estrutural dos polifenóis é vasta, e eles podem ser divididos em várias subclasses, dependendo da sua configuração química (Liga et al., 2023).

Entre as subclasses mais conhecidas estão os flavonoides, que incluem compostos como quercetina, catequinas, antocianinas e flavonóis. Esses compostos têm uma estrutura básica de 15 átomos de carbono organizados em três anéis benzênicos e podem ser encontrados em alimentos como frutas, vegetais, chá e vinho. Outra classe significativa de polifenóis são os ácidos fenólicos, como o ácido cafeico, ácido ferúlico e ácido clorogênico, que estão presentes em alimentos como café, cereais integrais e vegetais (Gohari & Khanavi, 2023).

Também tem-se os taninos, que são compostos mais complexos que se complexam com proteínas e outras substâncias, encontrados em frutas como maçãs e uvas, assim como em folhas e cascas de algumas plantas (Boudet, 2023). Os lignanos, encontrados em sementes de linhaça e em cereais integrais, pertencem ao grupo dos polifenóis e possuem uma estrutura formada por dois anéis fenólicos interligados (Zhang et al., 2022). Por fim, os estilbenos, como o resveratrol, também fazem parte dessa classe e são compostos por dois anéis fenólicos ligados por uma cadeia de carbono. Eles são encontrados em alimentos como uvas e vinho tinto (Graña et al., 2021).

Assim, os resíduos gerados no processamento de frutas e vegetais destacam-se como fontes de polifenóis, cascas de frutas como uvas, maçãs e frutas cítricas são particularmente abundantes nesses compostos. As cascas de uva, por exemplo, possuem elevado teor de resveratrol e procianidinas, enquanto as de maçã concentram flavonóis e ácidos fenólicos. Já as frutas cítricas, como laranja e limão, são ricas em flavonoides como hesperidina e naringina (Ben-Othman, Ben-Essa & Hassine, 2020).

Além disso, as sementes de uva e maçã também apresentam altos níveis de procianidinas e outros compostos fenólicos, conhecidos por sua potente atividade antioxidante e capacidade de modular a saúde metabólica. Resíduos de vegetais, como talos de brócolis e cascas de cebola, possuem concentrações consideráveis de quercetina (Georganas, Alexopoulos & Goulas, 2020).

Os polifenóis extraídos desses resíduos desempenham diversas funções importantes para a saúde, sua atividade antioxidante protege as células contra o estresse oxidativo, prevenindo danos ao DNA, lipídios e proteínas

(Delgado-Ospina, González-Córdoba & López-Castaño, 2021a). Já propriedades anti-inflamatórias auxiliam a reduzir a ativação de vias inflamatórias, como a ciclooxigenase (COX), atenuando ou evitando condições crônicas como artrite e doenças cardiovasculares (Al-Khayri et al., 2022). Esses compostos também modulam positivamente a microbiota intestinal, promovendo o crescimento de bactérias benéficas, como as dos gêneros *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*, o que contribui para a saúde digestiva, acarretando em vários benefícios mencionados anteriormente (Delgado-Ospina, Viana & Pérez, 2021b).

2.4. Ácidos graxos poli-insaturados

Os ácidos graxos poli-insaturados são lipídios encontrados principalmente em óleos vegetais, peixes e sementes, e são conhecidos por suas propriedades benéficas à saúde cardiovascular. Eles são classificados em ácidos graxos ômega-3 (como o ácido alfa-linolênico, ALA, o ácido eicosapentaenoico, EPA e o ácido docosahexaenoico, DHA) e ômega-6 (como o ácido linoleico) (Djuricic & Calder, 2021; Calder, 2021). O consumo de ácidos graxos poli-insaturados em razões ômega-6/ômega-3 de no máximo 4, tem sido associado à diminuição do risco de doenças cardiovasculares, diabetes e inflamações crônicas (Simopoulos, 2021).

Os ácidos graxos poli-insaturados estão presentes em diversas fontes vegetais, como óleos vegetais (soja, canola, milho, girassol e cártamo), nozes, sementes de linhaça e chia, além de grãos integrais, os quais apresentam em sua constituição tanto o ácido alfa-linolênico (ALA), quanto o ácido linoleico. Resíduos da indústria de alimentos também podem ser aproveitados para extrair os ácidos graxos poli-insaturados, por exemplo, cascas de nozes, sementes de girassol e subprodutos do processamento de soja (Ferreira et al., 2021; Goulas et al., 2020). Os compostos extraídos destes resíduos podem ser aplicados em produtos com benefícios nutricionais e terapêuticos, incluindo óleos e suplementos alimentares de ácidos graxos poli-insaturados (Xu et al., 2022).

3. RESÍDUOS DE ORIGEM VEGETAL

A demanda crescente do mercado interno e externo resultou em um aumento significativo na produção global de frutas nos últimos anos. Os principais impulsionadores deste aumento são o crescente interesse no consumo de frutas e hortaliças devido às suas características sensoriais atrativas, à conscientização dos consumidores em relação a uma dieta nutritiva e equilibrada e ao seu alto valor nutricional associado às atividades promotoras de saúde (Cadiz-Gurrea et al., 2020).

As frutas e vegetais são compostos majoritariamente por água (70 a 90%). No entanto, também são fontes importantes de polissacarídeos, ácidos orgânicos, minerais, polifenóis, carotenoides, vitaminas hidrossolúveis (vitamina C e do complexo B) e em alguns casos vitaminas lipossolúveis, fibras alimentares, flavonoides e antocianinas. Algumas destas substâncias apresentam bioatividade, promovendo assim inúmeros benefícios a saúde humana (Rodríguez et al., 2021).

O consumo primário das frutas ocorre, geralmente, em seu estado in natura; no entanto, a indústria de alimentos está cada vez mais processando minuciosamente frutas, devido ao seu alto grau de perecibilidade, bem como para atender às atuais exigências de novos produtos desenvolvidos à base delas, como sucos, polpas, compotas, geleias, doces, frutas congeladas, entre outros. Esse uso industrial resulta na geração de grandes quantidades de subprodutos, principalmente sementes, cascas e folhas, podendo representar até 60% da fruta inteira (Ayala-Zavala et al., 2011).

Além do desperdício, os resíduos gerados pela industrialização de frutas e vegetais constitui um perigo ambiental que deve ser tratado e gerenciado adequadamente (Cadiz-Gurrea et al., 2020). Este desperdício alimentar é gerado desde a pós-colheita ao nível do agricultor até às sobras nas residências, restaurantes e estabelecimentos comerciais. Do total de resíduos gerados, 20% constituíram resíduos de produção, 1% resíduos de processamento, 19% de distribuição e 60% de consumidores e domicílios (Ganesh, Sridhar, & Vishali, 2022).

Tradicionalmente, toneladas de resíduos de origem vegetal são descartadas diretamente em aterros, resultando em sérios problemas

ambientais, incluindo alta demanda biológica e química de oxigênio, poluição ecológica, conteúdo orgânico biodegradável que provocam fermentação indesejada, decomposição microbiana e riscos graves para a saúde humana e aquática. Empregar estes resíduos como fontes de compostos bioativos, além de agregar valor, auxilia na problemática ambiental (Kosseva, 2013, Roselló-Soto et al., 2015, Kumar et al., 2021, Iqbal et al., 2021).

Estudos recentes sobre resíduos derivados de frutas e vegetais destacaram altas concentrações de compostos bioativos e ingredientes de alto valor agregado, que muitas vezes são superiores à parte convencionalmente considerada comestível. A tabela 1 mostra alguns dos recentes estudos nos mais variados campos acerca do uso de resíduos de origem vegetal em aplicações diversas.

Tabela 1. Resíduos do processamento de frutas e vegetais e aplicações efetivas.

Resíduo	Composto Foco	Aplicação	Referência
Bagaço de maçã, pêssego, pepino e pimentão vermelho	Extrato Polifenólico	Terapêutica (anticancerígeno)	Mármol et al. (2021)
Casca de figo da Índia	Pigmentos	Corante Têxtil	Scarano et al. (2022)
Resíduos total de abacaxi	Óleo essencial e outros compostos ativos	Química fina	Hikal et al. (2021)
Casca de romã	Agente antimicrobiano e de reforço	Filmes Inteligentes	Ali et al. (2019)
Albedo e casca de Laranja	Ferrita de cobalto	Adsorvente de óleo	Muniz et al. (2020)
Casca de durião	Nanofibras	Embalagens	Gisan et al. (2022)
Resíduo total de caju	Carotenoides	Química Fina	Servent et al. (2020)

Diversos são os compostos e ingredientes que podem ser isolados de subprodutos vegetais. Tendo destaque a extração desses fitoquímicos como uma prática promissora a ser explorada comercialmente pelas indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética. Os subprodutos vegetais são reconhecidos por conterem uma variedade de compostos bioativos, como carotenoides, vitaminas e polifenóis. Assim, a sua revalorização tem sido uma área de destaque na pesquisa recente, representando um dos principais desafios enfrentados pela indústria de alimentos (Ben-Othman, Jõudu, & Bhat, 2020; Cadiz-Gurrea et al., 2020; Bocker & Silva, 2024).

A reutilização de subprodutos e sua reintegração na cadeia de abastecimento como novos produtos aprimorados contribui para a otimização dos recursos naturais, promovendo um sistema de processamento em circuito fechado. Esse processo requer uma nova abordagem para a sustentabilidade na cadeia alimentar, que transita de uma economia linear para uma economia circular, onde a simbiose e cooperação entre indústrias maximiza a utilização de subprodutos, gerando novos produtos de valor agregado, seguros e inovadores. Assim, o conhecimento sobre as principais classes de bioativos presentes e as técnicas de extração desses compostos é essencial.

4. EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS

Diversos fatores podem influenciar a obtenção de compostos bioativos de subprodutos de frutas, incluindo a escolha das metodologias e técnicas de extração a serem aplicadas. Esses fatores devem assegurar a extração efetiva dos compostos desejados sem comprometer suas propriedades, visando obter um extrato estável e de maior pureza possível, o que se torna um grande desafio, pois se tratam de matrizes complexas. Assim, a etapa de extração é considerada crucial para recuperar esses bioativos.

Atualmente, novas tecnologias ou técnicas emergentes têm sido estudadas e aplicadas na extração de compostos bioativos de subprodutos de frutas e vegetais em todo o mundo. Estas técnicas incluem extração assistida por ultrassom, extração assistida por enzimas, campo elétrico pulsado, extração com fluido supercrítico e extração com energia micro-ondas, conforme ilustrado

pela figura 1. Além disso, estes subprodutos e resíduos podem ser empregados como substratos para obtenção de biomoléculas através de rotas biotecnológicas (fermentação) (Ribeiro et al., 2024).



Figura 1. Tecnologias emergentes empregadas na extração de compostos bioativos de resíduos de origem vegetal.

Métodos como extração assistida por ultrassom, campo elétrico pulsado, enzimática, micro-ondas, fluido supercrítico e extração líquida pressurizada têm atraído interesse na indústria alimentícia. A adoção dessas técnicas alternativas tem ganhado destaque devido ao aumento dos preços de energia, emissões de CO₂ e outras preocupações ambientais. Elas oferecem uma alternativa sustentável às técnicas convencionais, como a extração sólido-líquido, utilizando menos ou nenhum solvente orgânico e, quando há exposição a altas temperaturas, ocorre por menor tempo, proporcionando maior eficiência e manutenção dos compostos. As tecnologias verdes se destacam pela alta eficiência, qualidade superior dos extratos obtidos e menor geração de resíduos (Saini et al., 2019).

A extração assistida por ultrassom utiliza ondas mecânicas com frequência superior a 20 kHz, além da faixa audível do ouvido humano (20 Hz a 20 kHz). Essas ondas, geradas por um corpo vibrante, induzem vibrações no meio circundante, transferindo energia para partículas vizinhas e deslocando moléculas de suas posições originais (Sivakamasundari et al., 2024). Na extração por ultrassom, a cavitação, efeitos térmicos e mecânicos podem resultar em fenômenos como fragmentação, erosão localizada, formação de poros, força de cisalhamento, aumento da absorção e destruição da parede celular da matriz vegetal (Chemat et al., 2017). O colapso das bolhas de cavitação gera ondas de choque, levando à fragmentação da estrutura celular. Essa rápida fragmentação solubiliza os componentes bioativos, reduzindo o tamanho das partículas, aumentando a área superficial e facilitando a transferência de massa na camada limite da matriz sólida, sem alterar a estrutura e função dos extratos (Kumar et al., 2021; Iqbal et al., 2021).

Diversos parâmetros influenciam o processo de extração de compostos bioativos por ultrassom, incluindo o solvente utilizado, pH, tempo/temperatura de extração, e o tamanho de partícula. A potência ultrassônica, frequência, tempo de extração e proporção líquido-sólido geralmente têm maior impacto na eficiência global do processo. O ultrassom tem sido usado na extração de compostos bioativos de diversos subprodutos vegetais, como a casca de laranja (*Citrus sinensis*), na obtenção de pectina, com rendimentos de até $28,07 \pm 0,67\%$ (Hisseini et al., 2019). Guandalini et al. (2019) relataram aumento de 31% na extração de pectina da casca de manga (*Mangifera indica* L.), passando de 6,2% para 8,1%. Sharayei et al. (2019) utilizaram ultrassom para extrair compostos fenólicos da casca de romã (*Punica granatum* L., variedade SisheKape-Ferdos), determinando que a frequência de 60 kHz e 6,2 minutos de extração foram as condições ideais, resultando em 42,2 mg de equivalente de ácido gálico (GAE) por grama.

Airouyuwa et al. (2022) aplicaram ultrassom em sementes de tamareira (*Phoenix dactylifera* L.), obtendo $145,54 \pm 1,54$ mg GAE/g de compostos fenólicos após 15 minutos de extração com 90% de amplitude de ultrassom, com compostos majoritários como ácido 3,4-di-hidroxibenzóico, catequina e ácido cafeico. Zia et al. (2024) usaram ultrassom para extrair compostos da casca de

melancia (*Citrullus lanatus*), obtendo extratos ricos em flavonóis (10–30 mg/g) e fenólicos (1–2,5 mg/g), com altas atividades antioxidantes DPPH (22–40 mg Trolox/g) e FRAP (26–42 mg sulfato ferroso/g). Além disso, foram identificados ácidos graxos e fitoesteróis na casca da melancia, destacando suas potenciais aplicações nas indústrias alimentícia, farmacêutica, nutracêutica e cosmética.

A tecnologia de campo elétrico pulsado é uma técnica não térmica, minimamente invasiva e ecológica, baseada na aplicação de campos elétricos de baixa intensidade (0,5–5 kV/cm) aos tecidos biológicos. Isso resulta no acúmulo de cargas na superfície das membranas celulares, reorientando as cargas elétricas das moléculas lipídicas presentes na estrutura celular. O aumento do potencial de membrana enfraquece a membrana plasmática, diminuindo sua seletividade e formando poros na célula, fenômeno chamado eletroporação (Bocker & Silva, 2022; Joshi, Garner & Sundararajan, 2023). Isso compromete a integridade celular, facilitando a transferência de massa de componentes intracelulares e o contato do solvente com os componentes alvo, aumentando o rendimento do processo de extração (Bocker & Silva, 2022).

Estudos relatam a aplicação dessa técnica na extração de ingredientes valiosos de cascas de uva (*Vitis vinifera* L.) (Medina-Meza et al., 2024) e cascas de laranja (*Citrus cinensis*) (Bocker & Silva, 2024). Nowacka et al. (2019) usaram campo elétrico pulsado para extrair betaninas de beterraba (*Beta vulgaris* L.), conseguindo uma extração 329% superior em relação as extrações convencionais. Já Athanasiadis et al. (2023) utilizaram a casca de caqui (*Diospyros kaki* Thunb.) para obter polifenóis (7,17 mg GAE/g e 4,93 mg/g de ácido ascórbico) e carotenoides (386,47 µg/g).

A extração com fluido supercrítico utiliza fluidos que alcançam o estado supercrítico, caracterizado por uma densidade variável com mudanças na pressão e/ou temperatura. Essa propriedade permite que os fluidos se difundam facilmente através de materiais sólidos. Modificar a pressão de extração ajusta a densidade, influenciando a solubilidade e facilitando o processo de extração, além de reduzir o tempo necessário. O método é notável por sua seletividade aprimorada, maior pureza nos extratos, eliminação de resíduos de solventes e quase total reutilização do solvente por recirculação, oferecendo vantagem econômica (Da Silva et al., 2016).

O CO₂ supercrítico é o fluido mais utilizado, por ser barato, quimicamente inerte, não inflamável, facilmente disponível em alta pureza e reciclável. As principais vantagens incluem baixa temperatura e pressão para atingir o estado supercrítico, ideais para extrair substâncias naturais termicamente instáveis (Kultys & Kurek, 2022).

Dos Santos et al. (2021) utilizaram resíduos de maracujá amarelo (semente e polpa) gerados pela produção de suco, xarope e polpa congelada, para extração de compostos lipofílicos. Os pesquisadores obtiveram valores 45,67% superiores para esqualeno, 68,67% para tocóis totais e 8% para carotenoides, em comparação com a extração tradicional por Soxhlet. Campalini et al. (2020) usaram CO₂ supercrítico para extrair ácidos graxos de bagaço de amora e framboesa (casca e sementes), observando maior eficiência na extração de ácidos graxos livres, 29,5%, comparado aos 0,2% obtidos pela extração convencional com hexano.

A extração assistida por enzimas consiste na hidrólise da parede celular dos vegetais pela formação do complexo enzima-substrato. Durante o processo, as ligações nas moléculas do substrato são quebradas. A adição de enzimas acelera a reação até que a concentração do substrato se torne limitante. A interação enzima-substrato é influenciada por parâmetros como o tamanho do material vegetal, concentração da enzima, tempo de reação, temperatura, pH e proporção sólido-líquido. Enzimas como celulase, α -amilase, β -glucosidase, xilanase, β -glucanase, pectinase, e preparações enzimáticas como Viscozyme L (celulolítica) e Ultrazym (pectinolítica) são frequentemente usadas (Marathe et al., 2019). Essa técnica já foi aplicada na extração de licopeno de resíduos de tomate (Catalkaya & Kahveci, 2019).

A extração assistida por micro-ondas opera em frequências entre 300 MHz e 300 GHz, aquecendo rapidamente a matriz vegetal. Esse aquecimento provoca a ruptura das paredes celulares e a liberação de compostos bioativos, como antioxidantes, polifenóis e vitaminas, para o meio de extração. A técnica é eficiente, reduz o tempo de extração e minimiza a degradação térmica de compostos sensíveis. O processo é influenciado por variáveis como temperatura, tempo, potência, características do solvente e propriedades da matriz vegetal (Da Silva et al., 2022; Bagade & Patil, 2021).

A extração assistida por micro-ondas foi aplicada com sucesso na obtenção de antioxidantes totais de caroços de manga, com atividade antioxidante de 1738,2 mg trolox/g, demonstrando maior atividade antioxidante do que antioxidantes comerciais. Subprodutos de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) também foram submetidos a extração por micro-ondas, permitindo a obtenção de extratos com significativa atividade antioxidante, por FRAP 771,54 mM TE/g e por DPPH 734,34 mM TE/g, além de 234,65 mg GAE/g para compostos fenólicos totais (Airouyuwa, et al., 2022).

A tecnologia de fermentação emprega os resíduos como substrato para síntese de compostos bioativos através do metabolismo de microrganismos. Esse processo pode ocorrer em fermentação submersa, com microrganismos cultivados em meio líquido, ou em fermentação em estado sólido, onde crescem em meio sólido sem água. Cepas de *Streptomyces*, *Aspergillus*, *Penicillium* e *Bacillus* são amplamente usadas para este fim. Em fermentação sólida, subprodutos de toranja geraram antioxidantes com atividades de até 8,53 mg/g para DPPH e 14,43 mg/g para FRAP (Larios-Cruz et al., 2019). Além disso, subprodutos de figo (*Ficus carica* L.) resultaram em até 10,37 mg de GAE/g de compostos fenólicos totais (Buenrostro-Figueroa et al., 2017).

5. LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS

Nas últimas décadas, houve avanços significativos no campo dos compostos bioativos, impulsionados principalmente pela crescente preocupação dos consumidores com a saúde. Pesquisas dedicadas a esses compostos, como aminoácidos, compostos fenólicos, esteróis, pigmentos, vitaminas, polissacarídeos e ácidos graxos, têm demonstrado benefícios na promoção e restauração da saúde. Esses benefícios incluem, principalmente, a neutralização de radicais livres, a redução do estresse oxidativo, a prevenção de doenças crônicas (como doenças cardiovasculares, diabetes e alguns tipos de câncer), proteção celular, fortalecimento do sistema imunológico, redução de processos inflamatórios e proteção da pele (Omachi et al., 2024).

Utilizar subprodutos da indústria de alimentos como fonte de compostos bioativos envolve desafios em várias etapas. O primeiro desafio é a preservação dessas moléculas, já que muitos compostos bioativos são sensíveis a fatores

ambientais, como luz, oxigênio e temperatura, o que exige o desenvolvimento de métodos eficazes para sua conservação (Inada, 2018). Em seguida, a seleção e caracterização adequadas dos subprodutos são essenciais para identificar os compostos bioativos presentes (Egea, 2022). O terceiro desafio é a eficiência na extração, que deve maximizar o rendimento dos compostos bioativos, minimizando o uso de recursos como solventes e energia (Tischler et al., 2021).

O custo para a purificação de compostos isolados também é uma limitação significativa, visto que a purificação de compostos bioativos requer processos específicos, o que pode aumentar os custos de produção. Por fim, a aplicação de compostos bioativos extraídos de subprodutos ainda é pouco explorada na literatura, o que destaca a necessidade de mais estudos nesta área (Mahato et al., 2019).

Testar a eficácia e a segurança desses bioativos em alimentos apresenta diversos desafios técnicos, como garantir a estabilidade durante o processamento, avaliar sua interação com outros ingredientes e entender sua biodisponibilidade no organismo humano. Além disso, os custos elevados associados à pesquisa, juntamente com as exigências regulatórias rigorosas de segurança alimentar, podem dificultar a realização de estudos nessa área (Bastos, 2009).

A falta de compreensão dos potenciais benefícios desses compostos também pode desestimular a investigação e a aplicação prática. Essas questões ressaltam a necessidade de um esforço conjunto entre acadêmicos, indústria e autoridades regulatórias para promover a pesquisa e explorar o potencial dos bioativos de subprodutos alimentares de forma eficaz e segura (Shirahigue, 2020).

Quanto às perspectivas, existem diversos métodos de extração de compostos bioativos que podem impulsionar este setor, cada um oferecendo suas próprias vantagens e desafios em termos de eficiência, custo e sustentabilidade ambiental. Atualmente, a extração por ultrassom, fluidos supercríticos e micro-ondas tem recebido mais atenção devido à sua eficiência e menor impacto ambiental. No entanto, o avanço contínuo da pesquisa está resultando no desenvolvimento de novas tecnologias e abordagens para melhorar ainda mais a eficiência e sustentabilidade da extração de compostos bioativos.

Esses avanços são essenciais para impulsionar a inovação na área e garantir a disponibilidade de produtos de alta qualidade e sustentáveis para os consumidores. Além disso, com a crescente conscientização sobre sustentabilidade, a valorização dos resíduos da indústria de alimentos como fonte de bioativos abrirá novas oportunidades econômicas.

6. CONCLUSÃO

A convergência de estudos sobre compostos bioativos, suas fontes e aplicabilidades, demonstra não apenas a complexidade desses elementos na promoção da saúde, mas também a necessidade de abordagens integradas que envolvam aspectos nutricionais, ambientais e econômicos. O aproveitamento consciente desses compostos não apenas amplia as perspectivas na área da alimentação e nutrição, mas também contribui para a construção de uma sociedade mais sustentável.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIROUYUWA, J. O., MOSTAFA, H., RIAZ, A., & MAQSOOD, S. (2022). Utilization of natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction as green extraction technique for the recovery of bioactive compounds from date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seeds: An investigation into optimization of process parameters. *Ultrasonics Sonochemistry*, 91, 106233. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106233>

ALI, A., CHEN, Y., LIU, H., YU, L., BALOCH, Z., KHALID, S., ... & CHEN, L. (2019). Starch-based antimicrobial films functionalized by pomegranate peel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 1120-1126. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.068>

ANVISA. (2018). *Resolução da diretoria colegiada - RDC nº 243, de 26 de julho de 2018*. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Disponível em: www.anvisa.gov.br/legis

ATHANASIADIS, V., CHATZIMITAKOS, T., BOZINO, E., KOTSOU, K., PALAIOGIANNIS, D., & LALAS, S. I. (2023). Maximizing the extraction of bioactive compounds from *Diospyros Kaki* peel through the use of a pulsed electric field and ultrasound extraction. *Biomass*, 3(4), 422-440. <https://doi.org/10.3390/biomass3040025>

AYALA-ZAVALA, J. F. N., VEGA-VEGA, V., ROSAS-DOMÍNGUEZ, C., PALAFOX-CARLOS, H., VILLA-RODRIGUEZ, J. A., SIDDIQUI, M. W., & González-Aguilar, G. A. (2011). Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts

as a source of food additives. *Food Research International*, 44(7), 1866-1874. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.021>

BAGADE, S. B., & PATIL, M. (2021). Recent advances in microwave-assisted extraction of bioactive compounds from complex herbal samples: A review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 51(2), 138-149. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1686966>

BAR, M., BINDUGA, U. E., & SZYCHOWSKI, K. A. (2022). Methods of isolation of active substances from garlic (*Allium sativum* L.) and its impact on the composition and biological properties of garlic extracts. *Antioxidants*, 11(7), 1345. <https://doi.org/10.3390/antiox11071345>

BASTOS, D. H. M., ROGERO, M. M., & ARÊAS, J. A. G. (2009). Mecanismos de ação de compostos bioativos dos alimentos no contexto de processos inflamatórios relacionados à obesidade. *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia*, 53(5), 646–656. <https://doi.org/10.1590/S0004-27302009000500017>

BEN-OTHTMAN, S., JÖÖDU, I., & BHAT, R. (2020). Bioactives from agri-food wastes: Present insights and future challenges. *Molecules*, 25(3), 510. <https://doi.org/10.3390/molecules25030510>

BITTENCOURT, J. A. (2018). *Nutrição e saúde: Como fazer escolhas sensatas em dieta e nutrição* (6ª ed.). São José dos Campos: J. A. Bittencourt.

BOCKER, R., & SILVA, E. K. (2022). Pulsed electric field-assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices. *Food Chemistry: X*, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100398>

BOCKER, R., & SILVA, E. K. (2024). Pulsed electric field technology as a promising pre-treatment for enhancing orange agro-industrial waste biorefinery. *RSC Advances*, 14(3), 2116-2133. <https://doi.org/10.1039/D3RA07848E>

BOUDET, A. M. (2023). Polyphenolic compounds and their properties: An overview. *Phytochemistry Reviews*, 22(1), 1-30.

BUENROSTRO-FIGUEROA, J. J., VELÁZQUEZ, M., FLORES-ORTEGA, O., ASCACIO-VALDÉS, J. A., HUERTA-OCHOA, S., AGUILAR, C. N., & PRADO-BARRAGÁN, L. A. (2017). Solid state fermentation of fig (*Ficus carica* L.) by-products using fungi to obtain phenolic compounds with antioxidant activity and qualitative evaluation of phenolics obtained. *Process Biochemistry*, 62, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.07.016>

CADIZ-GURREA, M. de la L., del Carmen VILLEGAS-AGUILAR, M., LEYVA-JIMÉNEZ, F. J., PIMENTEL-MORAL, S., FERNANDEZ-OCHOA, A., ALAÑÓN, M. E., & Segura-Carretero, A. (2020). Revalorization of bioactive compounds from tropical fruit by-products and industrial applications by means of sustainable approaches. *Food Research International*, 138, 109786. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109786>

CAMPALANI, C., AMADIO, E., ZANINI, S., DALL'ACQUA, S., PANOZZO, M., FERRARI, S., ... & PEROSA, A. (2020). Supercritical CO₂ as a green solvent for the circular economy: Extraction of fatty acids from fruit pomace. *Journal of CO₂ Utilization*, 41, 101259. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101259>

CANDIOTI, L. V., DE ZAN, M. M., CÁMARA, M. S., & GOICOECHEA, H. C. (2014). Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. *Talanta*, 124, 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.05.025>

CATALKAYA, G., & KAHVECI, D. (2019). Optimization of enzyme-assisted extraction of lycopene from industrial tomato waste. *Separation and Purification Technology*, 219, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.006>

CATANIA, A. S., BARROS, C. R. D., & FERREIRA, S. R. G. (2009). Vitaminas e minerais com propriedades antioxidantes e risco cardiometabólico: controvérsias e perspectivas. *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia*, 53(5), 550-559. <https://doi.org/10.1590/S0004-27302009000500008>

CHEMAT, F., ROMBAUT, N., SICAIRE, A. G., MEULLEMIESTRE, A., FABIANO-TIXIER, A. S., & ABERT-VIAN, M. (2017). Ultrasound-assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540-560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>

DA SILVA, R. F., CARNEIRO, C. N., DE SOUSA, C. B. D. C., GOMEZ, F. J., ESPINO, M., BOITEUX, J., FERNÁNDEZ, M. LOS. Á., SILVA, M. F., & DIAS, F. D. S. (2022). Sustainable extraction bioactive compounds procedures in medicinal plants based on the principles of green analytical chemistry: A review. *Microchemical Journal*, 175, 107184. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107184>

DA SILVA, R. P., ROCHA-SANTOS, T. A., & DUARTE, A. C. (2016). Supercritical fluid extraction of bioactive compounds. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 76, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.11.013>

DE LA LUZ CADIZ-GURREA, M., DEL CARMEN VILLEGAS-AGUILAR, M., LEYVA-JIMÉNEZ, F. J., PIMENTEL-MORAL, S., FERNANDEZ-OCHOA, A., ALAÑÓN, M. E., & SEGURA-CARRETERO, A. (2020). Revalorization of bioactive compounds from tropical fruit by-products and industrial applications by means of sustainable approaches. *Food Research International*, 138, 109786. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109786>

DINKOVA-KOSTOVA, A. T., & TALALAY, P. (2008). Direct and indirect antioxidant properties of inducers of cytoprotective proteins. *Molecular Nutrition & Food Research*. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200700195>

DIXIT, V., JOSEPH KAMAL, S. W., BAJRANG CHOLE, P., DAYAL, D., CHAUBEY, K. K., PAL, A. K., ... & BACHHETI, R. K. (2023). Functional foods: exploring the health benefits of bioactive compounds from plant and animal

sources. *Journal of Food Quality*, 2023, 5546753. <https://doi.org/10.1155/2023/5546753>

DOS SANTOS, L. C., JOHNER, J. C., SCOPEL, E., PONTES, P. V., RIBEIRO, A. P., ZABOT, G. L., BATISTA, E. A. C., MEIRELES, E. A. A., & MARTINEZ, J. (2021). Integrated supercritical CO₂ extraction and fractionation of passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) by-products. *The Journal of Supercritical Fluids*, 168, 105093. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.105093>

EGEA, M. B., & OLIVEIRA, S. M. L. (Eds.). (2022). *A biodiversidade como fonte de compostos bioativos: moléculas e aplicações*.

FURLAN, A. D. S., & RODRIGUES, L. (2016). Consumo de polifenóis e sua associação com conhecimento nutricional e atividade física. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 22(6), 461-464. <https://doi.org/10.1590/1517-869220162206163766>

GANESH, K. S., SRIDHAR, A., & VISHALI, S. (2022). Utilization of fruit and vegetable waste to produce value-added products: Conventional utilization and emerging opportunities-A review. *Chemosphere*, 287, 132221. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132221>

GEORGANAS, A., GIAMOURI, E., PAPPAS, A. C., PAPADOMICHELAKIS, G., GALLIOU, F., MANIOS, T., ... & ZERVAS, G. (2020). Bioactive compounds in food waste: A review on the transformation of food waste to animal feed. *Foods*, 9(3), 291. <https://doi.org/10.3390/foods9030291>

GIL, M. I., AMODIO, M. L., & COLELLI, G. (2020). CA/MA on bioactive compounds. In *Controlled and modified atmospheres for fresh and fresh-cut produce* (pp. 131-146). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818144-6.00009-7>

GISAN, K. A., CHAN, M. Y., & KOAY, S. C. (2022). Solvent-cast biofilm from poly (lactic) acid and durian husk fiber: Tensile, water absorption, and biodegradation behaviors. *Journal of Natural Fibers*, 19(11), 4338-4349. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1857894>

GOHARI, A. R., & KHANAVI, M. (2023). Flavonoids and Phenolic Acids: A Review of the Biological Properties and Applications in Medicine. *Food Chemistry*, 396, 133603.

GOMES, F. D. S. (2007). Carotenóides: uma possível proteção contra o desenvolvimento de câncer. *Revista de Nutrição*, 20, 537-548. <https://doi.org/10.1590/S1415-52732007000500009>

GUANDALINI, B. B. V., RODRIGUES, N. P., & MARCZAK, L. D. F. (2019). Sequential extraction of phenolics and pectin from mango peel assisted by ultrasound. *Food Research International*, 119, 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.011>

HALLIWELL, B., & GUTTERIDGE, J. M. C. (2015). *Free radicals in biology and medicine* (5th ed.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198717478.001.0001>

HAMZALIOĞLU, A., & GÖKMEN, V. (2024). Interaction between bioactive carbonyl compounds and asparagine and impact on acrylamide. In *Acrylamide in Food* (pp. 433-455). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99119-3.00008-4>

HIKAL, W. M., SAID-AL AHL, H. A., TKACHENKO, K. G., BRATOVCIC, A., SZCZEPANEK, M., & RODRIGUEZ, R. M. (2021). Sustainable and environmentally friendly essential oils extracted from pineapple waste. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(5), 6833-6844. <https://doi.org/10.33263/BRIAC125.68336844>

HOSSEINI, S. S., KHODAIYAN, F., KAZEMI, M., & NAJARI, Z. (2019). Optimization and characterization of pectin extracted from sour orange peel by ultrasound-assisted method. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 621-629. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.096>

INADA, K. O. P., DUARTE, P. A., LAPA, J., & OTHERS. (2018). Jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) juice obtained by steam-extraction: Phenolic compound profile, antioxidant capacity, microbiological stability, and sensory acceptability. *Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 52–61. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2769-3>

IQBAL, A., SCHULZ, P., & RIZVI, S. S. (2021). Valorization of bioactive compounds in fruit pomace from agro-fruit industries: Present insights and future challenges. *Food Bioscience*, 44, 101384. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101384>

JHA, A. K., & SIT, N. (2022). Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 579-591. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.09.009>

JOANA GIL-CHÁVEZ, G., VILLA, J. A., FERNANDO AYALA-ZAVALA, J., BASILIO HEREDIA, J., SEPULVEDA, D., YAHIA, E. M., & GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A. (2013). Technologies for extraction and production of bioactive compounds to be used as nutraceuticals and food ingredients: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(1), 5-23. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12003>

Joshi, R. P., Garner, A. L., & Sundararajan, R. (2023). Review of developments in bioelectrics as an application of pulsed power technology. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 51(7), 1682-1717. <https://doi.org/10.1109/TPS.2023.3281339>

KOSSEVA, M. R. (2013). Functional food and nutraceuticals derived from food industry wastes. In *Food Industry Wastes* (pp. 103-120). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391921-2.00006-8>

KULTYS, E., & KUREK, M. A. (2022). Green extraction of carotenoids from fruit and vegetable byproducts: A review. *Molecules*, 27(2), 518. <https://doi.org/10.3390/molecules27020518>

KUMAR, K., SRIVASTAV, S., & SHARANAGAT, V. S. (2021). Ultrasound-assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>

KUMAR, K., YADAV, A. N., KUMAR, V., VYAS, P., & DHALIWAL, H. S. (2017). Food waste: A potential bioresource for extraction of nutraceuticals and bioactive compounds. *Bioresources and Bioprocessing*, 4, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0153-7>

LARIOS-CRUZ, R., BUENROSTRO-FIGUEROA, J., PRADO-BARRAGÁN, A., RODRÍGUEZ-JASSO, R. M., RODRÍGUEZ-HERRERA, R., MONTAÑEZ, J. C., & AGUILAR, C. N. (2019). Valorization of grapefruit by-products as solid support for solid-state fermentation to produce antioxidant bioactive extracts. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 763-769. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0156-y>

LIGA, S., PAUL, C., & PÉTER, F. (2023). Flavonoids: Overview of Biosynthesis, Biological Activity, and Current Extraction Techniques. *Plants*, 12(14), 2732.

LIU, Z., DE SOUZA, T. S., HOLLAND, B., DUNSHEA, F., BARROW, C., & SULERIA, H. A. (2023). Valorization of food waste to produce value-added products based on its bioactive compounds. *Processes*, 11(3), 840. <https://doi.org/10.3390/pr11030840>

MACEDO, P. D. G., & MATOS, S. P. de. (2015). *Bioquímica dos Alimentos - Composição, Reações e Práticas de Conservação* (E-book, p. 69). Rio de Janeiro: Érica. ISBN 9788536520810. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536520810/>

MAHATO, N., SINHA, M., SHARMA, K., KOTESWARARAO, R., & CHO, M. H. (2019). Modern extraction and purification techniques for obtaining high-purity food-grade bioactive compounds and value-added co-products from citrus wastes. *Foods*, 8(11), 523. <https://doi.org/10.3390/foods8110523>

MARATHE, S. J., JADHAV, S. B., BANKAR, S. B., DUBEY, K. K., & SINGHAL, R. S. (2019). Improvements in the extraction of bioactive compounds by enzymes. *Current Opinion in Food Science*, 25, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.02.009>

MARCILLO-PARRA, V., TUPUNA-YEROVI, D. S., GONZÁLEZ, Z., & RUALES, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.009>

MÁRMOL, I., QUERO, J., IBARZ, R., FERREIRA-SANTOS, P., TEIXEIRA, J. A., ROCHA, C. M., PÉREZ-FERNÁNDEZ, M., GARCÍA-JUIZ, S., OSADA, J., MARTÍN-BELLOSO, O., & RODRÍGUEZ-YOLDI, M. J. (2021). Valorization of

agro-food by-products and their potential therapeutic applications. *Food and Bioproducts Processing*, 128, 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.06.003>

MEDINA-MEZA, I. G., BOIOLI, P., & BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. (2016). Assessment of the effects of ultrasonics and pulsed electric fields on nutritional and rheological properties of raspberry and blueberry purees. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 520-531. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1642-5>

MIDDLETON, E., JR, KANDASWAMI, C., & THEOHARIDES, T. C. (2000). The effects of plant flavonoids on mammalian cells: implications for inflammation, heart disease, and cancer. *Pharmacological Reviews*, 52(4), 673-751.

MORAES, G. V., JORGE, G. M., GONZAGA, R. V., & SANTOS, D. A. DOS. (2022). Potencial antioxidante dos flavonoides e aplicações terapêuticas. *Research, Society and Development*, 11(14), e238111436225. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36225>

MUNIZ, E. P., DE ASSUNÇÃO, L. S., DE SOUZA, L. M., RIBEIRO, J. J., MARQUES, W. P., PEREIRA, R. D., PORTO, P. S. S., PROVETI, J. R. C., & PASSAMANI, E. C. (2020). On cobalt ferrite production by sol-gel from orange fruit residue by three related procedures and its application in oil removal. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121712. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121712>

NOWACKA, M., TAPPI, S., WIKTOR, A., RYBAK, K., MISZCZYKOWSKA, A., CZYZEWSKI, J., DRODZAL, K., WITROWA-RAJCHERT, D., & TYLEWICZ, U. (2019). The impact of pulsed electric field on the extraction of bioactive compounds from beetroot. *Foods*, 8(7), 244. <https://doi.org/10.3390/foods8070244>

OLIVEIRA, C. B. C., BRITO, L. A., FREITAS, M. A., DE SOUZA, M. P. A., DA CUNHA RÊGO, J. M., & DE ARAÚJO MACHADO, R. J. (2020). Obesidade: inflamação e compostos bioativos. *Journal of Health & Biological Sciences*, 8(1), 1-5. <https://doi.org/10.12662/2317-3076jhbs.v8i1.2785.p1-5.2020>

OMACHI, D. O., FAWOLE, A. O., & ONUH, J. O. (2024). Bioactivities of Phytochemicals in Nutrition and Health. In *Plant Food Phytochemicals and Bioactive Compounds in Nutrition and Health* (pp. 31-46). CRC Press.

OSORIO, L. L. D. R., FLÓREZ-LÓPEZ, E., & GRANDE-TOVAR, C. D. (2021). The potential of selected agri-food loss and waste to contribute to a circular economy: Applications in the food, cosmetic, and pharmaceutical industries. *Molecules*, 26(2), 515. <https://doi.org/10.3390/molecules26020515>

REGUENGO, L. M., SALGAÇO, M. K., SIVIERI, K., & JÚNIOR, M. R. M. (2022). Agro-industrial by-products: Valuable sources of bioactive compounds. *Food Research International*, 152, 110871. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110871>

RIBEIRO, T. A., SAMPAIO, I. C. F., DE CARVALHO TAVARES, I. M., DE MOURA, I. V. L., SILVA, F. N., DE OLIVEIRA SENA, L., COSTA, F. S., DE

JESUS, G. L. S., EMMERICH, I. T., CEZAR, K. C., IRFAN, M., & FRANCO, M. (2024). Unlocking xylan's potential: Coffee husk-derived xylanolytic blend for sustainable bioprocessing. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06150-8>

RODRIGUEZ GARCIA, S. L., & RAGHAVAN, V. (2022). Green extraction techniques from fruit and vegetable waste to obtain bioactive compounds—A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(23), 6446-6466. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1983403>

RODRÍGUEZ, L. G. R., GASGA, V. M. Z., PESCUA, M., VAN NIEUWENHOVE, C., MOZZI, F., & BURGOS, J. A. S. (2021). Fruits and fruit by-products as sources of bioactive compounds. Benefits and trends of lactic acid fermentation in the development of novel fruit-based functional beverages. *Food Research International*, 140, 109854. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109854>

ROSELLÓ-SOTO, E., KOUBAA, M., MOUBARIK, A., LOPES, R. P., SARAIVA, J. A., BOUSSETTA, N., ... & BARBA, F. J. (2015). Emerging opportunities for the effective valorization of wastes and by-products generated during olive oil production process: Non-conventional methods for the recovery of high-added value compounds. *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 296-310. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.003>

SCALBERT, A., JOHNSON, I. T., & SALTMARSH, M. (2005). Polyphenols: antioxidants and beyond. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(1), 215S-217S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.1.215s>

SCARANO, P., TARTAGLIA, M., ZUZOLO, D., PRIGIONIERO, A., GUARINO, C., & SCIARRILLO, R. (2022). Recovery and valorization of bioactive and functional compounds from the discarded of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. fruit peel. *Agronomy*, 12(2), 388. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020388>

SERVENT, A., ABREU, F. A., DHUIQUE-MAYER, C., BELLEVILLE, M. P., & DORNIER, M. (2020). Concentration and purification by crossflow microfiltration with diafiltration of carotenoids from a by-product of cashew apple juice processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102519. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102519>

SHARAYEI, P., AZARPAZHOOH, E., ZOMORODI, S., & RAMASWAMY, H. S. (2019). Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from pomegranate (*Punica granatum* L.) peel. *LWT*, 101, 342-350. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.031>

SHIRAHIGUE, L. D., & CECCATO-ANTONINI, S. R. (2020). Agro-industrial wastes as sources of bioactive compounds for food and fermentation industries. *Ciência Rural*, 50(4), e20190857. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190857>

SILVA, P. S. (2018). *Bioquímica dos alimentos* (E-book, p. 106). Porto Alegre: SAGAH. ISBN 9788595026605. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595026605/>

Sivakamasundari, S. K., Ganapath, G., Pintu, C., Moses, J. A., & Anandharamkrishnan, C. (2024). Applications of Ultrasound in Food Processing. In *Emerging Technologies for the Food Industry* (pp. 49-83). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003413615>

SOCAS-RODRÍGUEZ, B., ÁLVAREZ-RIVERA, G., VALDÉS, A., IBÁÑEZ, E., & CIFUENTES, A. (2021). Food by-products and food wastes: Are they safe enough for their valorization? *Trends in Food Science & Technology*, 114, 133-147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.004>

TEIXEIRA, C. M., & MELO, M. M. D. (2021). Relação da microbiota intestinal e compostos bioativos na modulação de genes relacionados à obesidade. *Acta Portuguesa de Nutrição*, 25, 54-57. <https://doi.org/10.21011/apn.2021.2510>

TISCHLER NIZER, J. V., MUNHOZ, M. D., PEREIRA, A. L., BOROWSKI, J. M., & MACAGNAN, F. T. (2021). Utilização de subprodutos da agroindústria cervejeira e vinícola como fonte de compostos bioativos e fibra alimentar no desenvolvimento de cookies. *Revista Brasileira de Agrotecnologia*, 11(2), 821-833. <https://doi.org/10.18378/rebagro.v12i2.8931>

TORRES-LEÓN, C., ROJAS, R., SERNA-COCK, L., BELMARES-CERDA, R., & AGUILAR, C. N. (2017). Extraction of antioxidants from mango seed kernel: Optimization assisted by microwave. *Food and Bioproducts Processing*, 105, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.07.005>

UENOJO, M., JUNIOR, M. R. M., & PASTORE, G. M. (2007). Carotenóides: propriedades, aplicações e biotransformação para formação de compostos de aroma. *Química Nova*, 30(3), 616-622. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000300022>

USMAN, I., HUSSAIN, M., IMRAN, A., AFZAAL, M., SAEED, F., JAVED, M., ... & SAEWAN, S. A. (2022). Traditional and innovative approaches for the extraction of bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 1215-1233. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2032207>

VERRUCK, S., PRUDENCIO, E. S., & SILVEIRA, S. D. (2018, julho). Compostos bioativos com capacidade antioxidante e antimicrobiana em frutas. *Revista do Congresso Sul Brasileiro de Engenharia de Alimentos*, 4(1), 111-124.

VILAS-BOAS, A. A., PINTADO, M., & OLIVEIRA, A. L. S. (2021). Natural bioactive compounds from food waste: Toxicity and safety concerns. *Foods*, 10(7), 1564. <https://doi.org/10.3390/foods10071564>

VOMUND, S., SCHÄFER, A., PARNHAM, M., BRÜNE, B., & VON KNETHEN, A. (2017). Nrf2, the master regulator of anti-oxidative responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(12), 2772. <https://doi.org/10.3390/ijms18122772>

Zhang, L., et al. (2022). Lignans: Biological Activities and Health Benefits. *Food Chemistry*, 379, 131029.

ZIA, S., KHAN, M. R., AADIL, R. M., & MEDINA-MEZA, I. G. (2024). Bioactive recovery from watermelon rind waste using ultrasound-assisted extraction. *ACS Food Science & Technology*, 4(3), 687-699. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00601>

Autores

Hugo José Martins Carvalho, Sandra de Oliveira Silva, Adelaine Camargos Batista, Lucas Henrique Ramos de Oliveira, Gabriel Júnio Silva Souza, Raquel Guidetti Vendruscolo*

Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 39100-000, Diamantina, MG, Brasil

*Autor para correspondência.

Endereço de e-mail: raquel.vendruscolo@ict.ufvjm.edu.br