

ORGANIZADORES:
Rafaela Basso Sartori
Luis Guillermo Ramírez Mérida

Tecnologia e processos sustentáveis



ORGANIZADORES:

Rafaela Basso Sartori
Luis Guillermo Ramírez Mérida

Tecnologia e
**Processos
sustentáveis**

Canoas
2025



Tecnologia e processos sustentáveis

© 2025 Mérida Publishers

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

Organizadoras

Rafaela Basso Sartori

Luis Guillermo Ramírez Mérida

Adaptação da capa e desenho gráfico

Luis Miguel Guzmán



Canoas - RS - Brasil

contact@meridapublishers.com

www.meridapublishers.com

Todos os direitos autorais pertencem a Mérida Publishers. A reprodução total ou parcial dos trabalhos publicados, é permitida desde que sejam atribuídos créditos aos autores.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

T255 Tecnologia e processos sustentáveis [livro eletrônico] /
Organizadores Rafaela Basso Sartori, Luis Guillermo Ramírez
Mérida. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-84548-21-3

1. Tecnologia – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento
sustentável. 3. Sustentabilidade. I. Sartori, Rafaela Basso. II. Mérida,
Luis Guillermo Ramírez.

CDD 363.7

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Apresentação

Em um mundo cada vez mais consciente da necessidade de preservar o meio ambiente, a busca por tecnologias e processos sustentáveis se torna imperativa. Tecnologia e processos sustentáveis é uma obra que reúne conhecimentos de diversas áreas, como direito ambiental, engenharia, biotecnologia e ciência dos materiais, para apresentar soluções inovadoras e promissoras para os desafios ambientais contemporâneos.

O livro inicia sua jornada explorando a rica história do direito ambiental e os marcos legais que moldaram o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Essa perspectiva histórica é fundamental para compreender a evolução do pensamento e da prática ambiental, e para identificar os desafios e oportunidades que se apresentam no presente.

Em seguida, a obra mergulha no universo das proteínas alternativas, apresentando-as como uma solução promissora para a crescente demanda por alimentos, com menor impacto ambiental. A produção de proteínas a partir de fontes vegetais, micro-organismos e células animais cultivadas em laboratório é detalhada, destacando seus benefícios para a saúde humana e para o planeta.

A questão do aproveitamento de subprodutos e resíduos da indústria alimentícia é abordada de forma inovadora. O livro demonstra como esses materiais, muitas vezes descartados, podem ser transformados em fontes estratégicas de compostos bioativos, com aplicações em diversas áreas, como a indústria farmacêutica e a nutracêutica.

A crescente preocupação com a poluição por microplásticos impulsiona a busca por novas abordagens para a degradação desses materiais. Sustentabilidade em Foco apresenta as últimas pesquisas sobre processos biológicos para a degradação de microplásticos, destacando o potencial de microrganismos e enzimas para solucionar esse problema ambiental.

Por fim, a obra explora a sinergia entre microalgas, biochar e fotocatalise como uma revolucionária abordagem para o tratamento de águas residuais. Essa combinação de tecnologias permite a remoção eficiente de contaminantes,

a produção de bioenergia e a recuperação de nutrientes, contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável.

Tecnologia e processos sustentáveis é uma obra de interesse para estudantes, pesquisadores, profissionais da área ambiental e para todos aqueles que buscam compreender as tecnologias e os processos que estão moldando o futuro do nosso planeta. Através de uma linguagem clara e concisa, a obra apresenta um panorama completo das principais inovações na área da sustentabilidade, inspirando e motivando a busca por soluções para os desafios ambientais do século XXI.

Boa leitura!

Os organizadores

Autores

Rosangela Rodrigues Dias

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Mariany Costa Deprá

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Darissa Alves Dutra

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Adriane Terezinha Schneider

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Richard Luan Silva Machado

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Victor Cesar Rodrigues Carvalho

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Leila Queiroz Zepka

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Eduardo Jacob-Lopes

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Hugo José Martins Carvalho

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

Sandra de Oliveira Silva

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

Adelaine Camargos Batista

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

Lucas Henrique Ramos de Oliveira

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

Gabriel Júnio Silva Souza

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

Mateus Alves Araújo

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

Raquel Guidetti Vendruscolo

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

Luís Felipe Oliva dos Santos

Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

Thaís Marques Uber

Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

Vinícius Mateus Salvatori Cheute

Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

José Rivaldo dos Santos Filho

Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

Rúbia Carvalho Gomes Corrêa

Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

Cristina Giatti Marques de Souza

Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

Rafael Castoldi

Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

Luis Guillermo Ramírez Mérida

Profesor Titular, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Valencia – Venezuela. Profesor Asociado Ingeniería en Agua y Desarrollo Sostenible, Instituto Tecnológico Regional Centro-Sur, Universidad Tecnológica del Uruguay, Durazno - Uruguay

Índice

CAPÍTULO 1..... 10

Direito ambiental e a legitimidade de tecnologias e processos sustentáveis: história e marcos

Rosângela Rodrigues Dias, Mariany Costa Deprá, Darissa Alves Dutra, Adriane Terezinha Schneider, Richard Luan Silva Machado, Victor Cesar Rodrigues Carvalho, Leila Queiroz Zepka, Eduardo Jacob-Lopes

CAPÍTULO 2..... 31

Proteínas alternativas: uma solução sustentável para o século XXI

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

CAPÍTULO 3..... 55

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

CAPÍTULO 4..... 83

Novas abordagens para degradação de microplásticos com ênfase nos processos biológicos

Luís Felipe Oliva dos Santos, Thaís Marques Uber, Vinícius Mateus Salvatori Cheute, José Rivaldo dos Santos Filho, Rúbia Carvalho Gomes Corrêa, Cristina Giatti Marques de Souza, Rafael Castoldi, Adelar Bracht, Rosane Marina Peralta

CAPÍTULO 5..... 109

Sinergia entre Microalgas, Biochar y Fotocatálisis: Una Revolución en el Tratamiento de Aguas Residuales

Luis Guillermo Ramírez Mérida

CAPÍTULO 1

Direito ambiental e a legitimidade de tecnologias e processos sustentáveis: história e marcos

Rosangela Rodrigues Dias, Mariany Costa Deprá, Darissa Alves Dutra, Adriane Terezinha Schneider, Richard Luan Silva Machado, Victor Cesar Rodrigues Carvalho, Leila Queiroz Zepka, Eduardo Jacob-Lopes

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-21-3.c1>

Resumo

A conscientização, o engajamento e a ação global pela natureza aumentaram em meio à crescente degradação do meio ambiente e às mudanças climáticas. O direito ambiental contribuiu para dar ao meio ambiente – como sujeito – a proteção de seus recursos naturais finitos. O histórico das ações culminou em tecnologias e processos desenvolvidos para serem mais sustentáveis. Esses buscam ser legitimados legal e socialmente, pois o esforço é uma via de mão dupla, onde sem reconhecimento vem o desencorajamento. Este capítulo aborda os primórdios do direito ambiental, bem como o conjunto de ações que promovem o desenvolvimento de tecnologias e processos sustentáveis. O incentivo à atividade inventiva e disruptiva por parte da sociedade civil também é abordado.

Palavras-chave: Meio ambiente; Direito de terceira geração; Aprovação social; Participação pública; Sustentabilidade.

1. Introdução

O mundo ultrapassou a marca de 8 bilhões de pessoas em 2023. As projeções da população mundial mostram que o número de habitantes atingirá o

pico em torno de 10,3 bilhões de pessoas em 2080. O número de pessoas não é necessariamente a questão principal, mas a pressão que esse crescimento pode exercer sobre os recursos naturais e os ecossistemas – certamente é. Com o crescimento populacional, vem o aumento da demanda por alimentos, energia e outros recursos que intensificam a degradação e a exaustão do meio ambiente (Maja e Ayano, 2021).

A taxa em que os recursos são consumidos excede em muito a capacidade do planeta de renová-los naturalmente. O Earth Overshoot Day (Dia da Sobrecarga da Terra) é um lembrete da necessidade de reduzir a pressão sobre os recursos do planeta. Desde 2000, a data que marca o dia do ano em que excedemos a capacidade regenerativa da Terra vem surgindo cada vez mais cedo: de 22 de setembro em 2000 a 1 de agosto em 2023. Essas datas mostram que entramos em “dívida ambiental” e passamos a operar em “crédito” muito antes do final do ano. O desafio é atrasar esta data, idealmente para dezembro (Earth Overshoot Day, 2024).

Hoje, há uma maior conscientização de que, ao invés de explorar recursos finitos, é preciso adotar práticas mais sustentáveis, protegendo o planeta e os recursos que restam. No entanto, de uma perspectiva histórica, antes da Revolução Industrial, a preocupação com questões ambientais como a entendemos hoje era praticamente inexistente. Os recursos naturais no século XVII pareciam inesgotáveis e a natureza era considerada infinita. Somente mais tarde, nos séculos XVIII e XIX, com o avanço industrial e o rápido crescimento da população e das cidades, os problemas ambientais, como a poluição da água e do ar, começaram a ser evidenciados. No entanto, as respostas governamentais nessa época foram limitadas. Contudo, no século XX, movimentos em defesa do meio ambiente começaram a surgir. O livro "Primavera Silenciosa" (1962), de Rachel Carson, marcou um ponto de virada na forma como a sociedade entendia o impacto das atividades humanas no meio ambiente. Este livro foi creditado por inspirar o surgimento do movimento ambientalista (Meyer, 2021; Kim, 2024).

Mais tarde, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo (1972), representou um marco importante em sua época, reconhecida como o primeiro grande encontro de chefes de Estado

organizado pela Organização das Nações Unidas (ONU) para tratar de questões ambientais. A conferência de Estocolmo, como também é chamada, contou com a presença de chefes de 113 países e mais de 400 instituições governamentais e não governamentais. Embora não tenham sido estabelecidas metas concretas, foi concebida a Declaração da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano – documento que orienta o comportamento das nações em relação ao meio ambiente. O documento reconhece o direito humano a um meio ambiente saudável e a responsabilidade das nações para com as gerações futuras (Chasek, 2022; Joos, 2023).

A partir da década de 1970, o direito ambiental como ramo jurídico começou a se consolidar, ganhando relevância com leis subsequentes. Atualmente, com as mudanças climáticas e o aquecimento global, o direito ambiental vem se tornando cada vez mais relevante na sociedade contemporânea. E mais recentemente, dentre os eventos e tratados que marcaram os últimos tempos, a Cúpula de Ambição Climática (2023), evento convocado pela ONU para promover ações contra as mudanças climáticas, foi uma tentativa de aumentar a pressão política para a implementação de ações mais rápidas e robustas em relação as mudanças climáticas. Infelizmente, alguns países resistem à transição da energia fóssil para a renovável e, em geral, as ações concretas ficam aquém dos compromissos assumidos (Bomberg, 2023).

Este capítulo se aprofunda na história e evolução do direito ambiental – nacional e internacional – e destaca o papel do incentivo por parte da sociedade para criação de tecnologias e processos sustentáveis.

2. História e evolução do direito ambiental

O direito ambiental é um direito de terceira geração que aborda questões que transcendem os interesses individuais e foca no coletivo. É um ramo do direito com regulamentações, políticas e estatutos projetados para abordar a proteção da qualidade do meio ambiente. O direito ambiental se consolidou em meados da década de 1970 e, ao longo dos últimos 50 anos, embora tenha estabelecido um arcabouço legal relevante, é digno de nota que, a adesão a

pensamentos ecologistas não foi consistentemente validada durante esse período (Battaglin, 2021). A desconsideração ao meio ambiente como sujeito de direitos é, na verdade, um fenômeno histórico. Do colonialismo, com abordagens extrativistas e exploradoras, à revolução industrial, com a priorização do desenvolvimento econômico, e agora com a cultura do consumo desenfreado, o uso dos recursos naturais tem sido intensivo e insustentável (Caronti, 2020; Rossi *et al.*, 2021). Atualmente, o apelo à ação climática acompanhado de eventos climáticos catastróficos cada vez mais comuns está aumentando a sensibilização ambiental. Essa sensibilização felizmente tem se refletido na criação de leis ambientais (Sousa *et al.*, 2023).

No âmbito nacional, tomando como exemplo o arcabouço legal do direito ambiental no Brasil, algumas leis e regulamentações brasileiras que merecem destaque são o Decreto nº 23.793 de 1934, conhecido como o primeiro Código Florestal do Brasil; a Lei nº 6.938 de 1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente; a Lei nº 9.605 de 1998, que dispõe sobre a Lei de Crimes Ambientais; a Lei nº 9.985 de 2000, conhecida como a Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação; a Lei nº 11.284 de 2006, que dispõe sobre a Gestão de Florestas Públicas para Produção Sustentável; o Decreto nº 6.514 de 2008, que Regulamenta Infrações e Sanções Administrativas; a Lei nº 12.187 de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima; a Lei nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; Lei nº 12.651 de 2012, que dispõe sobre o novo Código Florestal; e a Lei nº 14.119 de 2021, que regulamenta a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (Figura 1) (Ambiental, 1981; Brasil, 2010; Ferreira, 2011; da Silva *et al.*, 2012; Assmann e de Melo, 2016; Amado, 2017; da Silva *et al.*, 2019; Silva e Persch, 2023; Mascaretti Junior, 2023).

No Brasil, um olhar mais atento ao direito ambiental revela que a criação e a aplicação de leis foram castradoras, fundamentalmente sancionadoras e logicamente criadas a partir de uma perspectiva capitalista. Nas primeiras décadas, as estruturas legais preocuparam-se principalmente com a aplicação de penalidades, não sendo projetadas para promover verdadeiramente a proteção do meio ambiente, mas para favorecer interesses econômicos.

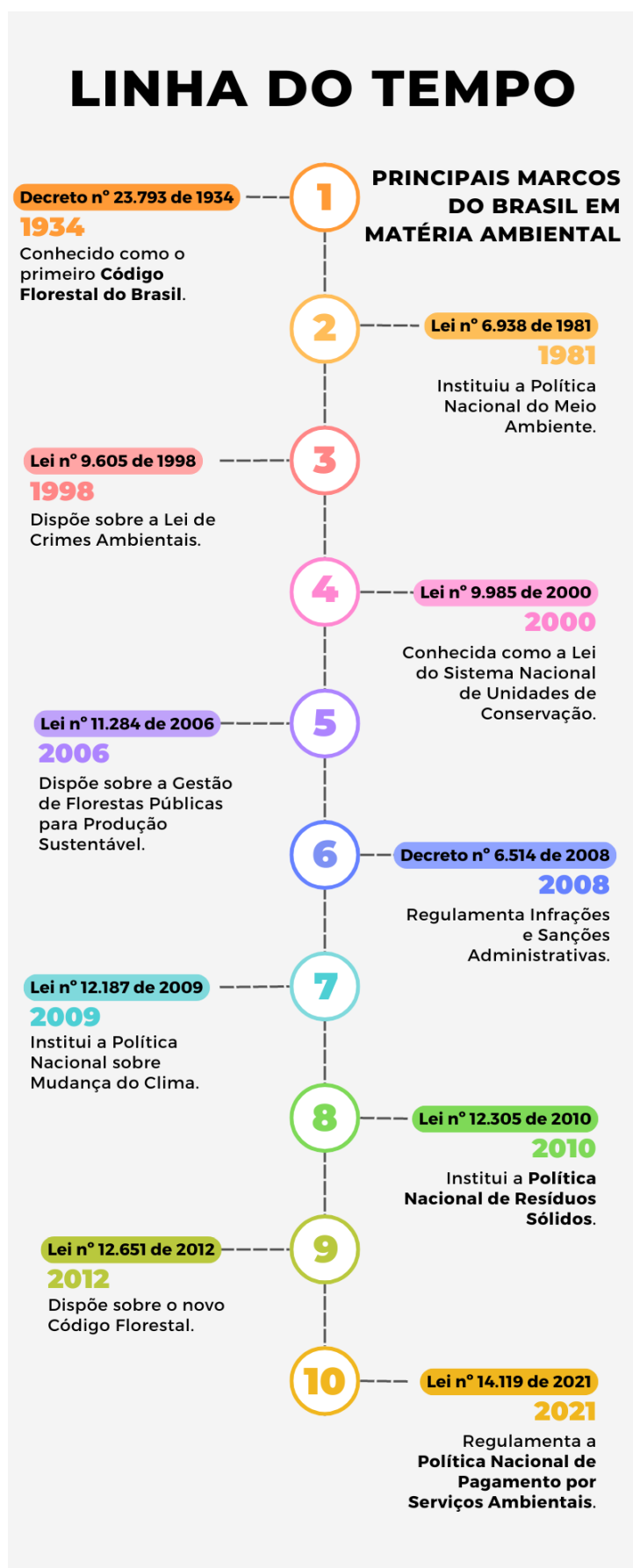


Figura 1. Principais marcos do Brasil em matéria ambiental.

Embora a punição seja um componente importante, o direito inclui mecanismos de prevenção, resolução e proteção que não foram efetivamente implementados até meados do final do século XX. No entanto, essa característica – favorecer interesses econômicos em detrimento de aspectos ambientais – não é exclusiva do Brasil. Muitos países passaram por um processo semelhante em suas abordagens ambientais (Oliveira e Grotti, 2020).

Contudo, no Brasil, vale ressaltar que, a promulgação da Lei nº 12.305, em 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e a Lei nº 14.119, de 2021, que regulamenta a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, marcaram um ponto de inflexão no cenário brasileiro com a adoção de medidas de promoção, prevenção, incentivo e responsabilidade compartilhada. De fato, nos últimos anos, tem-se observado uma mudança de paradigma no arcabouço jurídico de muitos países, que estão se unindo sob a bandeira do desenvolvimento sustentável. Em suma, o meio ambiente vem sendo progressivamente reconhecido por todos como sujeito de direitos, com dignidade intrínseca, e não mais como objeto passivo (Trennepohl, 2022).

As leis ambientais também contribuíram significativamente para a implementação de tecnologias e processos sustentáveis. Leis ambientais limitam as emissões de gases poluentes, o uso de recursos naturais e o descarte de resíduos, forçando as empresas a buscar soluções ecologicamente corretas, como tecnologias de energia renovável, reciclagem e reutilização de recursos, e processos mais eficientes e limpos, com menor impacto ambiental. Além disso, vale a pena mencionar que, alguns países oferecem incentivos fiscais e subsídios para o desenvolvimento e implementação de tecnologias e processos sustentáveis, o que incentiva as empresas a investirem em pesquisa, desenvolvimento e inovação para cumprir com as regulamentações (Peng *et al.*, 2021).

2.1. Direito ambiental internacional

O direito ambiental internacional pode ser traduzido em um conjunto de normas, tratados, princípios e acordos que criam direitos e deveres sob uma perspectiva ambiental para atores internacionais - o que não inclui apenas os

Estados. É uma área que busca coordenar ações entre Estados, ou seja, países, para tratar de questões ambientais que transcendem seus territórios e exigem cooperação internacional. O direito ambiental internacional considera que problemas relacionados ao meio ambiente, como mudanças climáticas e aquecimento global, são transfronteiriços. Portanto, no nível internacional, o direito ambiental abrange acordos ambientais mundiais que abordam questões globais (Guerra, 2007).

O ponto de partida para o direito ambiental internacional foi a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, também conhecida como Conferência de Estocolmo, em 1972. Foi um evento global focado em questões ambientais que reuniu países industrializados e em desenvolvimento. Essa conferência resultou na Declaração de Estocolmo, que estabeleceu vinte e seis princípios que abordam questões que prejudicavam o planeta e diretrizes práticas para os Estados mitigá-las. Mais tarde, passados dez anos, em 1983, a ONU criou a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento - Comissão Brundtland - que culminou no relatório "Nosso Futuro Comum", publicado em 1987. Esse relatório introduziu a ideia de desenvolvimento sustentável, definido como: "Desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades".

Em 1992, foi realizada no Brasil a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Rio-92 ou Cúpula da Terra. Foi também um dos marcos mais importantes na consolidação do direito ambiental internacional. Este evento resultou na "Agenda 21" e na "Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento", ambos documentos que estabeleceram um plano de ação e princípios para guiar Estados e organizações na adoção de medidas para alcançar um modelo de desenvolvimento sustentável. Em 1997, foi realizada a Sessão Especial da Assembleia Geral das Nações Unidas, conhecida como Rio+5, que buscou avaliar o progresso da implementação dos acordos e compromissos firmados e as principais lacunas e obstáculos desde a Rio-92. Embora tenha sido concluído que os compromissos estabelecidos não estavam sendo adequadamente implementados devido à falta de financiamento e assistência técnica, o documento final da Rio+5 incorporou

uma declaração na qual os chefes de Estado reiteraram seu compromisso com os princípios e metas estabelecidos na Agenda 21 e na Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento.

Outro marco importante no qual o direito ambiental internacional teve suas bases firmadas foi o Protocolo de Kyoto (1997). O Protocolo de Kyoto foi um tratado internacional adotado em 1997 em Kyoto, Japão, durante a terceira Conferência das Partes (COP3) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC). Nele, pela primeira vez, estabeleceu-se limites para as emissões de gases e compromissos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Três mecanismos de mercado foram introduzidos para ajudar os países a atingirem suas metas: comércio de emissões, mecanismos de desenvolvimento limpo e implementação conjunta. O Protocolo de Kyoto também sinalizou a necessidade da transição de combustíveis fósseis para tecnologias de energia renovável.

Em 2002, a Conferência Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, também conhecida como Cúpula de Joanesburgo, marcou o décimo aniversário da Rio-92 e foi uma continuação dos esforços para promover o desenvolvimento sustentável. No documento final da Cúpula de Joanesburgo, os chefes de Estado reafirmaram seu compromisso com o desenvolvimento sustentável. O Acordo de Paris, adotado em 2015 durante a 21ª Conferência das Partes da UNFCCC (COP21), foi um dos mais recentes e significativos esforços globais no direito ambiental internacional para mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Ele consolidou um compromisso global para limitar o aumento da temperatura média global. Um dos mecanismos do Acordo de Paris são as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), onde cada país deve apresentar e atualizar seus compromissos para reduzir as emissões de gases poluentes e combater as mudanças climáticas. O Acordo de Paris também mobilizou recursos financeiros para apoiar os países em desenvolvimento. Este tratado estabeleceu uma estrutura global inclusiva, flexível e ambiciosa para enfrentar as mudanças climáticas e o aquecimento global. Ainda, em 2015, durante a Cúpula das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, realizada em Nova York, EUA, foi estabelecida a “Agenda 2030”, que incluiu os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).



Figura 2. Principais marcos internacionais em matéria ambiental.

Por fim, esses eventos são alguns dos marcos mais importantes das últimas décadas que contribuíram para a consolidação do direito ambiental internacional (Figura 2). O direito ambiental internacional se consolidou diante da percepção de que questões ambientais, como as mudanças climáticas, não podem ser resolvidas por um único país. A ação precisa ser global e coordenada. Assim, o direito ambiental internacional teve suas raízes em 1972 e evoluiu, sendo influenciado por eventos globais e pela necessidade de enfrentar a crise climática por meio da cooperação multilateral e transfronteiriça.

3. Tecnologias e processos sustentáveis

Está claro hoje como as tecnologias e processos convencionais negligenciaram as considerações ambientais e, em última análise, sociais. Nos últimos anos, os setores industriais testemunharam uma mudança de paradigma, impulsionada pela demanda por sustentabilidade e avanços tecnológicos que buscam atender a essa demanda. As mudanças climáticas e o aquecimento global surgiram como fatores-chave nessa transformação. Tecnologias que não promovem um equilíbrio entre crescimento econômico, proteção ambiental e bem-estar social estão perdendo terreno para inovações alinhadas às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Pessoa, 2024).

A inovação tem desempenhado um papel fundamental na criação e aprimoramento de tecnologias e processos sustentáveis, como energia renovável, eficiência energética, transporte sustentável, técnicas de agricultura sustentável, técnicas de construção sustentável com design bioclimático, e reciclagem de materiais (Abraham, 2017; Neves *et al.*, 2022). O desenvolvimento de tecnologias solares e eólicas impulsionou a transição de fontes de energia fósseis, como carvão e gás natural, para fontes renováveis e limpas. As tecnologias de células solares, em particular, estão se tornando competitivas e acessíveis. A eficiência energética em eletrodomésticos, iluminação LED, sistemas de aquecimento e resfriamento está tornando-os uma opção mais sustentável para residências e empresas. Veículos elétricos movidos a eletricidade renovável e limpa são exemplos vívidos de uma tecnologia mais sustentável com potencial para reduzir significativamente as emissões do

transporte e a dependência de combustíveis fósseis. A agricultura de precisão voltada para a otimização do uso de recursos está ajudando a reduzir o impacto ambiental da produção de commodities agrícolas. Tecnologias para o tratamento de resíduos sólidos, líquidos e gasosos estão avançando para minimizar o impacto ambiental desses poluentes e transformá-los em um recurso valioso que pode ser revalorizado por meio da implementação de abordagens circulares. Um exemplo disso é o uso de águas residuais e gases de exaustão para produzir produtos de valor agregado a partir do cultivo de microalgas (Dias *et al.*, 2022).

Em resumo, essas tecnologias, do mosaico de tecnologias e processos projetados para fornecer benefícios econômicos, ambientais e sociais de longo prazo, estão ajudando a promover o desenvolvimento sustentável. Entretanto, apesar do potencial apresentado por algumas inovações, é digno de nota que, desafios permanecem, exigindo investimento contínuo em PD&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação), políticas públicas de apoio e colaboração entre governos e empresas.

3.1. Avaliação do ciclo de vida ambiental (ACV-A)

A capacidade regenerativa do planeta, ou seja, sua capacidade de reposição dos recursos naturais frente ao consumo humano, está sendo excedida. Em 2024, o Earth Overshoot Day – data do ano em que a humanidade excede a capacidade regenerativa da Terra – ocorreu em 1º de agosto. Esta data indica que seriam necessários 1,7 planetas para atender à demanda atual das pessoas por recursos naturais. Claro que a humanidade sempre demandará recursos naturais, mas é possível criar um saldo positivo se for estabelecida uma harmonia com a natureza, onde apenas os recursos que o planeta pode regenerar sejam consumidos (Gills e Morgan, 2022). Em suma, nas últimas décadas, com base em vários relatórios sobre mudanças climáticas, as preocupações ambientais se intensificaram, o que resultou e ainda resulta em acordos, convenções e leis que buscam discutir e minimizar os efeitos das atividades humanas sobre o meio ambiente. Esta preocupação crescente também catalisou o desenvolvimento do que hoje é conhecido como Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental (ACV-A) (Figura 3) (Jacob-Lopes *et al.*, 2021).

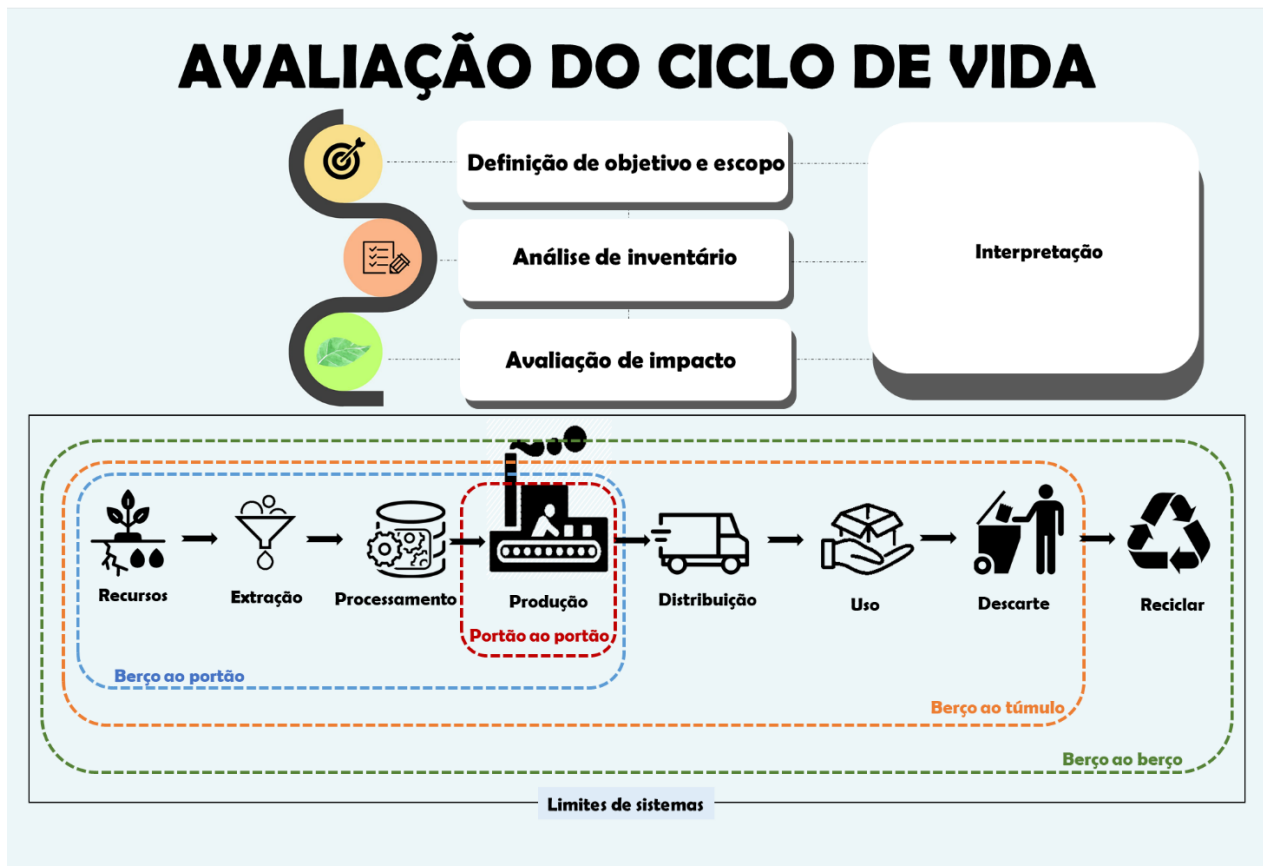


Figura 3. Fases da avaliação do ciclo de vida e delimitação dos limites do sistema. Adaptado de Jacob-Lopes *et al.* (2021).

ACV-A é uma ferramenta que analisa e avalia os impactos ambientais causados em decorrência da produção e utilização de uma determinada tecnologia, processo ou serviço. Mais especificamente, é uma metodologia que avalia o ciclo de vida. O ciclo de vida de um produto, por exemplo, abrange desde a extração de matérias-primas até seu uso e descarte e como ele é revalorizado. As avaliações do ciclo de vida podem ser completas (considerando todos os estágios do ciclo de vida) ou parciais (considerando fases específicas do ciclo de vida). Existem quatro abordagens principais para a avaliação do ciclo de vida: (i) do berço ao túmulo, (ii) do berço ao portão, (iii) do portão ao portão e (iv) do berço ao berço. As avaliações do ciclo de vida do berço ao túmulo consideram todo o ciclo de vida. As avaliações do berço ao portão e do portão ao portão são avaliações parciais do ciclo de vida. Por último, as avaliações do berço ao berço consideram todo o ciclo de vida com subprodutos e resíduos sendo revalorizados

(modelo circular) (Colley *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022; Backes *et al.*, 2023; Vauche *et al.*, 2024).

A ACV-A é uma metodologia valiosa para identificar pontos críticos que podem fomentar uma tomada de decisão mais assertiva e ecointeligente. Essa metodologia é regida pela International Organization for Standardization (ISO) 14040 e 14044 – normas internacionais – que estabelecem os princípios, requisitos e diretrizes para a ACV-A para garantir sua consistência e a comparabilidade dos estudos. Em suma, a ACV-A compreende quatro fases principais: (i) definição do objetivo e escopo, (ii) análise de inventário, (iii) avaliação de impacto ambiental e (iv) interpretação dos resultados (ISO, 1997; IOFS, 2006; Muralikrishna *et al.*, 2017).

Dê nota, qualquer tecnologia, processo de produção, ou serviço pode afetar o meio ambiente de diferentes formas. A ACV-A considera uma ampla gama de impactos ambientais, como emissões de gases de efeito estufa, emissões de substâncias que destroem a camada de ozônio, emissões de substâncias radioativas e acidificantes e substâncias tóxicas para os seres humanos. Os fluxos de energia e materiais envolvidos no ciclo de vida de tecnologias, processos, ou serviços são medidos e relacionados a vários indicadores de impacto ambiental. Alguns desses indicadores de impacto ambiental são aquecimento global (i), depleção do ozônio estratosférico (ii), radiação ionizante (iii), formação de ozônio – saúde humana (iv), formação de partículas finas (v), formação de ozônio – ecossistemas terrestres (vi), acidificação terrestre (vii), eutrofização da água doce (viii), ecotoxicidade terrestre (ix), ecotoxicidade da água doce (x), ecotoxicidade marinha (xi), toxicidade carcinogênica humana (xii), toxicidade não carcinogênica humana (xiii), escassez de recursos minerais (xiv), escassez de recursos fósseis (xv), uso da terra (xvi) e consumo de água (xvii). Ao final da ACV-A é possível mapear os pontos críticos e as oportunidades de melhoria. Além disso, vale inferir que a ACV-A é uma metodologia multidisciplinar e multicritério, pois abrange diversas áreas do conhecimento e se dedica a muitas categorias de impacto de uma só vez (Depra *et al.*, 2020; Dias *et al.*, 2023).

Por fim, esta ferramenta – ACV-A – está se tornando cada vez mais indispensável. Ela fornece uma base sólida para entender os impactos

ambientais, especialmente de novas tecnologias e processos, que frequentemente surgem como uma alternativa mais sustentável. A criação de alternativas deve, quando comparadas às suas contrapartes, minimizar os danos ao meio ambiente e promover o uso eficiente dos recursos naturais, garantindo que os benefícios ambientais superem qualquer dano potencial (Guinée e Heijungs, 2024).

4. Legitimidade: aprovação social e participação pública

A legitimidade de tecnologias e processos sustentáveis está ligada ao reconhecimento e aceitação por diferentes atores (órgãos reguladores, comunidade científica, empresas, consumidores e sociedade civil) de que essas inovações e práticas oferecem benefícios ambientais, sociais e econômicos. A aprovação social e a participação pública ajudam a criar credibilidade e confiança e aumentam as chances de sucesso de tecnologias e processos disruptivos. A aprovação social pode ser definida aqui como o reconhecimento e o apoio à adoção de tecnologias e processos que promovam a sustentabilidade. Esse conceito envolve a percepção do público sobre os aspectos positivos e negativos de tecnologias e processos desenvolvidos para serem mais sustentáveis, confiáveis e ambientalmente benignos. Dê nota, soluções emergentes que propõem substituir uma tecnologia ou processo já estabelecido muitas vezes enfrentam resistência quando não abordam preocupações contemporâneas ou não são devidamente compreendidas (Wu e Lin, 2016; Van de Poel, 2016).

Em suma, sem respaldo, mesmo as soluções mais promissoras podem sucumbir às barreiras institucionais, à escassez de recursos financeiros e à rejeição prematura, antes mesmo de se consolidarem como provas de conceito tangíveis. Nesse sentido, o diálogo transparente entre desenvolvedores, formuladores de políticas e sociedade civil é crucial para construir confiança e credibilidade, o que, por sua vez, facilita a legitimidade e a implementação de tecnologias e processos mais sustentáveis. O diálogo aberto e honesto com envolvimento eficaz da comunidade permite que dúvidas sejam esclarecidas e expectativas sejam alinhadas, e quando a sociedade sente que suas vozes são ouvidas, a resistência diminui e a implementação dessas inovações se torna mais factível (Jijelava e Vanclay, 2017).

Em simultâneo, a participação pública desempenha um papel fundamental na promoção da legitimidade de tecnologias e processos inventivos e disruptivos. A participação pública garante que indivíduos e comunidades tenham voz na implementação de tecnologias e processos que afetam a qualidade do meio ambiente. Também promove maior conscientização e compreensão das novas soluções propostas. Envolver a sociedade civil em processos de consulta sobre tecnologias e processos mais sustentáveis melhora a aceitação dessas soluções e incentiva o desenvolvimento de inovações alinhadas com demandas e valores coletivos. Quando o feedback público é integrado ao desenvolvimento de novas tecnologias ou processos, um ambiente de cocriação é criado, onde estes são moldados não apenas por critérios técnicos e econômicos, mas também por interesses e preocupações sociais. A participação pública aumenta a transparência e promove confiança e legitimidade em tecnologias e processos inovadores (Klüver e Einsiedel, 2005; Silva, 2020).

Assim, vale destacar que tecnologias e processos sustentáveis visam atingir um equilíbrio entre a demanda por produtos e serviços e a proteção da qualidade do meio ambiente. A aprovação social e a participação pública são uma parte importante do quebra-cabeça para que essas tecnologias e processos sejam legitimados socialmente e atendam às necessidades contemporâneas, sendo implementados de forma inclusiva e equitativa para contribuir para um desenvolvimento verdadeiramente sustentável. Quando a sociedade civil se envolve na implementação de tecnologias e processos mais sustentáveis, as soluções propostas ganham confiança e credibilidade. Esse envolvimento também contribui para a educação e conscientização sobre os benefícios ambientais dessas soluções. Além disso, é digno de nota que a participação pública resulta na diversidade de opiniões e experiências que enriquecem os processos de tomada de decisão e permitem a identificação de riscos ou oportunidades não percebidos por especialistas técnicos. Isso pode levar à resolução de problemas e à busca de soluções colaborativas. Ainda, cabe mencionar que, envolver a comunidade também exige que os processos de desenvolvimento sejam mais transparentes, fortalecendo a responsabilização dos atores envolvidos e o alinhamento das soluções propostas com os Objetivos

do Desenvolvimento Sustentável (Klüver e Einsiedel, 2005; Jijelava e Vanclay, 2017).

4.1. Natura cosméticos S.A.

A Natura é uma empresa brasileira de cosméticos. Ela é apresentada aqui como um exemplo de muitas empresas que estão atentas às forças de mercado que se movem em prol da sustentabilidade. A Natura tem sido reconhecida pela transparência em relação às suas práticas que buscam minimizar o impacto ambiental e promover o uso eficiente dos recursos naturais e de tecnologias verdes. Recentemente, a pesquisa “Sustainability Leaders 2024” da consultoria GlobeScan a reconheceu como uma empresa líder em sustentabilidade – a única empresa brasileira entre as mais sustentáveis do mundo (Natura, 2024a). Alguns destaques que legitimam essa conquista são o comprometimento da empresa com a proteção do clima e a redução de resíduos (Natura, 2024b). A Natura é carbono neutra desde 2007. As emissões de gases poluentes relacionadas ao ciclo de vida dos produtos, ou seja, fabricação, transporte e armazenamento, são controladas e analisadas para serem reduzidas ao máximo, e as emissões restantes são sistematicamente compensadas por ações de reflorestamento. Desde 1983, a empresa também oferece refis para alguns de seus produtos, o que além de ser mais econômico para a empresa e para os consumidores, reduz significativamente o lixo plástico (Natura, 2023). Essa iniciativa, simples à primeira vista, evita que mais de duas mil toneladas de resíduos plásticos poluam oceanos, rios e solos a cada ano. Isso é importante considerando que o Brasil é o 4º país do mundo que mais gera resíduos plásticos e o 16º país que mais polui os oceanos. Outra iniciativa da empresa é o uso de plástico verde gerado a partir de fontes renováveis como a cana-de-açúcar. Essa tecnologia tem sido cada vez mais adotada nas embalagens dos produtos da empresa. A empresa também utiliza plásticos reciclados produzidos a partir de resíduos coletados no litoral brasileiro. Segundo estimativas da empresa, aproximadamente 102 toneladas de plástico são reutilizadas em embalagens dos produtos da Natura no período de um ano (Natura, 2022).

5. Conclusão

O direito ambiental nos níveis nacional e internacional desempenha um papel fundamental no incentivo, orientação e, muitas vezes, na obrigatoriedade legal da adoção de práticas sustentáveis. Nos últimos anos, por várias razões, tecnologias e processos mais sustentáveis foram desenvolvidos em resposta à crescente atenção ao esgotamento dos recursos naturais e às mudanças climáticas. A preocupação das empresas sobre restrições futuras — como resposta aos desafios globais — e a capacidade de continuar operando de forma sustentável também impulsionaram a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação em tecnologias e processos disruptivos. Em suma, esta é uma preocupação real e crescente, sendo notável o papel da aprovação social e da participação pública na legitimidade destas novas soluções que ganham confiança e credibilidade para serem implementadas com sucesso e com o apoio da sociedade.

6. Agradecimento

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código Financeiro 001.

7. Referências

ABRAHAM, Martin. **Encyclopedia of sustainable technologies**. Elsevier, 2017.

AMADO, Frederico. **Direito ambiental**. Salvador: Juspodium, 2017.

ASSMANN, Suelem Martini; DE MELO, Fabiano Rodrigues. As correntes ambientalistas por trás da lei nº 12.651/2012 do novo Código Florestal. **Geografia, Ensino e Pesquisa, Goiânia**, v. 20, n. 2, p. 176-184, 2016.

BACKES, Jana Gerta *et al.* Comparative Cradle-to-Grave Carbon Footprint of a CFRP-Grid Reinforced Concrete Façade Panel. **Sustainability**, 15 (15), 11548.

BATTAGLIN, Bettina Augusta Amorim Bulzico. **Direito ambiental**. Editora Intersaberes, 2021.

BOMBERG, Elizabeth. Global climate action: A political stocktake. **Political Insight**, v. 14, n. 4, p. 31-33, 2023.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 agosto de 1981. Política Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política nacional de resíduos sólidos.

CARONTI, Raphael de Abreu Senna. Fundamentos filosóficos e constitucionais do direito ambiental. **Revista do Direito Público**, v. 15, n. 3, p. 238-239, 2020.

CHASEK, Pamela. The legacies of the Stockholm Conference. **International Institute for Sustainable Development**. v. 13, p. 2022, 2022.

CHEN, Quanwei *et al.* Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 369, p. 133342, 2022.

COLLEY, Tracey A. *et al.* Using a gate-to-gate LCA to apply circular economy principles to a food processing SME. **Journal of cleaner production**, v. 251, p. 119566, 2020.

DA SILVA, Alice Rocha; MELLO, Júlia Santa Anna. Viabilidade de políticas públicas no sistema nacional das unidades de conservação da natureza-SNUC (lei nº 9.985/2000). **Revista Processus de Políticas Públicas e Desenvolvimento Social**, v. 1, n. 2, p. 71-107, 2019.

DA SILVA, Diana Suzete Nunes; BORGES, Luís Antônio Coimbra; DA SILVA, Geiziana das Dores Nunes. Gestão sustentável das florestas públicas no Brasil (LEI 11.284/06). **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 8, n. 5, 2012.

DEPRA, Mariany C. *et al.* Environmental impacts on commercial microalgae-based products: Sustainability metrics and indicators. **Algal Research**, v. 51, p. 102056, 2020.

DIAS, Rosangela Rodrigues *et al.* Integrating solar cell technologies in microalgae facilities: Environmental sustainability metrics and indicators. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 58, p. 103362, 2023.

DIAS, Rosangela Rodrigues *et al.* Roadmap to net-zero carbon emissions in commercial microalgae-based products: environmental sustainability and carbon offset costs. **Journal of Applied Phycology**, v. 34, n. 3, p. 1255-1268, 2022.

EARTH OVERSHOOT DAY. 2024. <https://overshoot.footprintnetwork.org/> (acessado em 18 de setembro de 2024).

FERREIRA, Eduardo de Campos. O processo administrativo de apuração de infrações ambientais—o decreto nº 6.514/2008. 2011.

GILLS, Barry; MORGAN, Jamie. Global climate emergency: After COP24, climate science, urgency, and the threat to humanity. In: **Economics and climate emergency**. Routledge, 2022. p. 253-270.

GUERRA, Sidney Cesar Silva. Direito internacional ambiental: breve reflexão. **Revista Direitos Fundamentais & Democracia**, v. 2, 2007.

GUINÉE, Jeroen; HEIJUNGS, Reinout. Introduction to life cycle assessment. In: **Sustainable supply chains: a research-based textbook on operations and strategy**. Cham: Springer International Publishing, 2024. p. 15-48.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 14040**: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework. 1997.

IOFS, ISO. ISO 14040 — Environmental management — life cycle assessment —principles and framework. 2006.

JACOB-LOPES, Eduardo; ZEPKA, Leila Queiroz; DEPRÁ, Mariany Costa. **Sustainability metrics and indicators of environmental impact**: industrial and agricultural life cycle assessment. Elsevier, 2021.

JIJELAVA, David; VANCLAY, Frank. Legitimacy, credibility and trust as the key components of a social licence to operate: An analysis of BP's projects in Georgia. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1077-1086, 2017.

JOOS, Lena. 'Only One Earth': Environmental Perceptions and Policies before the Stockholm Conference, 1968–1972. **Journal of Global History**, v. 18, n. 2, p. 281-303, 2023.

KIM, Rae Yule. The fifth wave: The sustainability age and new industrial revolution. **IEEE Engineering Management Review**. 2024.

KLÜVER, Lars; EINSIEDEL, Edna F. Participação pública em Ciência e Tecnologia: influenciar nas decisões e, sobretudo, manter a sociedade informada e engajada. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, v. 12, p. 473-482, 2005.

MAJA, Mengistu M.; AYANO, Samuel F. The impact of population growth on natural resources and farmers' capacity to adapt to climate change in low-income countries. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 271-283, 2021.

MASCARETTI JUNIOR, Paulo Dimas Debellis. A política nacional de pagamento por serviços ambientais: uma análise da Lei 14.119 de 2021 como forma de incentivo à conservação dos recursos naturais e da biodiversidade no Brasil. 2023.

MEYER, Craig A. Taking lessons from silent spring: Using environmental literature for climate change. **Literature**, v. 1, n. 1, p. 2-13, 2021.

MURALIKRISHNA, Iyyanki V.; MANICKAM, Valli. Life Cycle Assessment. In: MURALIKRISHNA, Iyyanki V.; MANICKAM, Valli. **Environmental Management: Science and Engineering for Industry**; Elsevier: Cambridge, MA, USA, p. 57-75. 2017.

NATURA. Como Kaiak diminui o impacto ambiental do descarte inadequado de plástico. 2022. <https://www.natura.com.br/blog/sustentabilidade/embalagem-de-kaiak-oceano-contem-plastico-retirado-do-litoral-brasileiro> (acessado em 18 de setembro de 2024).

NATURA. Dia Mundial do Meio Ambiente: conheça nosso compromisso com o planeta. 2023. <https://www.natura.com.br/blog/sustentabilidade/dia-do-meio-ambiente> (acessado em 18 de setembro de 2024).

NATURA. Natura, única brasileira entre as mais sustentáveis do mundo. 2024a. <https://www.natura.com.br/blog/sustentabilidade/natura-unica-brasileira-entre-as-mais-sustentaveis-do-mundo> (acessado em 18 de setembro de 2024).

NATURA. Nossos compromissos. 2024b. https://www.naturabrasil.fr/pt-pt/os-nossos-valores/sustentabilidade?srsId=AfmBOorgbEzNUTUxt3bV3emStylAyoIS1ZAdUacNdcU9f811MgFYAMN_ (acessado em 18 de setembro de 2024).

NEVES, Catarina; OLIVEIRA, Tiago André Gonçalves Félix de; SANTINI, Fernando Oliveira. Sustainable technologies adoption research: A weight and meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 165, p. 112627, 2022.

OLIVEIRA, José Roberto Pimenta; GROTTI, Dinorá Adelaide Musetti. Direito administrativo sancionador brasileiro: breve evolução, identidade, abrangência e funcionalidades. **Interesse Público**, Belo Horizonte, v. 22, p. 83-126, 2020.

PENG, Hui *et al.* Can environmental regulation directly promote green innovation behavior? — based on situation of industrial agglomeration. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 128044, 2021.

PESSOA, Pablo Ryan Gomes. Análise da evolução histórica e conceitual dos objetivos do desenvolvimento sustentável: rumo a um futuro equilibrado. 2024.

ROSSI, Amélia do Carmo Sampaio; KOZICKI, Katya; MENDONÇA, Ygor de Siqueira Mendes. A ética ecológica e o giro ecodecolonial: rumo à ecologização do Direito Ambiental. **Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, v. 18, n. 42, 2021.

SILVA, Aline Silveira. A participação social no processo de incorporação de tecnologias em saúde no Brasil. 2020.

SILVA, Erian Coelho Da; PERSCH, Hudson Carlos Avancini. A. Crimes ambientais: as responsabilidades e a aplicação da lei nº 9.605/98 no estado de Rondônia. 2023.

SOUSA, Marcelo Bruno Bedoni de; SILVA, José Irivaldo Alves de Oliveira; FARIAS, Talden Queiroz. A balança e o termômetro: finalidades e características de um direito ambiental em tempos de mudança climática. 2023.

TRENNEPOHL, Terence. **Manual de direito ambiental**. Saraiva Educação SA. 2022.

VAN DE POEL, Ibo. A coherentist view on the relation between social acceptance and moral acceptability of technology. **Philosophy of technology after the empirical turn**, p. 177-193, 2016.

VAUCHE, Laura *et al.* Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment (LCA) of GaN Power Semiconductor Device. **Sustainability**, v. 16, n. 2, p. 901, 2024.

WU, Po-Hsuan; LIN, Chieh-Pengin. Learning to foresee the effects of social identity complexity and need for social approval on technology brand loyalty. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 111, p. 188-197, 2016.

Autor

Rosangela Rodrigues Dias, Mariany Costa Deprá, Darissa Alves Dutra, Adriane Terezinha Schneider, Richard Luan Silva Machado, Victor Cesar Rodrigues Carvalho, Leila Queiroz Zepka, Eduardo Jacob-Lopes

Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

CAPÍTULO 2

Proteínas alternativas: uma solução sustentável para o século XXI

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

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-21-3.c2>

Resumo

Este capítulo aborda as proteínas alternativas, destacando fontes vegetais e de microrganismos como soluções emergentes para os desafios globais de alimentação, assim como suas limitações. A crescente demanda por estas proteínas é impulsionada pelos danos ambientais causados pela produção de proteínas de origem animal, principalmente a atividade pecuarista, além da preocupação com o bem-estar animal e possíveis prejuízos à saúde humana ocasionados por dietas com consumo de proteínas convencionais. A transição para proteínas vegetais, fúngicas, de algas e de microalgas representa uma estratégia para mitigar os impactos ambientais e atender às exigências de uma alimentação baseada não só na nutrição, mas que também está alinhada a questões éticas e morais. O capítulo também discute sobre alimentos *plant-based* e outros análogos já disponíveis neste mercado crescente.

Palavras-chave: *plant-based*, fungos, algas, microalgas, análogos

1. Introdução

O futuro das proteínas alternativas tem sido amplamente debatido por empresas do setor alimentício, institutos de pesquisa e consumidores,

evidenciando uma mudança nos paradigmas alimentares globais. Com a previsão de que a população mundial ultrapasse os nove bilhões de pessoas até 2050 (Nadathur et al., 2024), surge o desafio de produzir e distribuir alimentos suficientes e sustentáveis para atender essa demanda crescente. Nesse contexto, a transição para fontes de proteínas alternativas, concebidas como substitutos às proteínas de origem animal, apresenta-se como uma das principais soluções para questões ambientais, éticas e de saúde (De Araujo, Brinques & Gurak, 2021).

O mercado de proteínas alternativas já demonstra uma evolução significativa. No Brasil, por exemplo, o faturamento de produtos substitutos à base de plantas alcançou R\$ 821 milhões em 2022, um crescimento de 42% em relação ao ano anterior (GFI Brasil, 2023). Globalmente, projeta-se que o setor atinja US\$ 23,4 bilhões até 2028, impulsionado pela preocupação com o meio ambiente e pela conscientização sobre os benefícios de uma dieta baseada em vegetais (Rana et al., 2024).

Os benefícios ambientais são um dos pilares dessa transição. A pecuária, reconhecida como uma das maiores fontes de impacto ambiental, está diretamente associada a emissões significativas de gases de efeito estufa, escassez hídrica, degradação do solo e perda de biodiversidade (Horgan, 2019). Substituir parte do consumo de proteínas animais por alternativas à base de plantas ou microrganismos pode reduzir esses impactos e contribuir para práticas alimentares mais sustentáveis.

Além do impacto ambiental, as proteínas alternativas atendem a uma demanda crescente por alimentos mais saudáveis e funcionais. Estudos apontam que dietas baseadas em vegetais podem prevenir doenças crônicas, como problemas cardíacos e diabetes, enquanto compostos bioativos presentes em alimentos de origem vegetal oferecem benefícios adicionais à saúde, incluindo propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (Shirahigue, 2020).

A tendência de consumo reflete mudanças não apenas nos hábitos alimentares, mas também na consciência coletiva sobre os impactos da alimentação na saúde humana, no meio ambiente e na ética relacionada ao uso de animais (Harray et al., 2022). Diante disso, a indústria de alimentos tem respondido à altura, diversificando suas ofertas e investindo no desenvolvimento

de produtos que alinhem saúde, funcionalidade e sustentabilidade, os produtos análogos.

Em face do exposto, este capítulo tem como objetivo explorar as proteínas alternativas, provenientes de fontes vegetais e de microrganismos, como soluções viáveis para os desafios globais relacionados à nova tendência de alimentação que está aliada a preocupação ambiental, valores éticos e morais.

2. Impactos ambientais, éticos e morais das proteínas animais

A produção de proteínas de origem animal, especialmente pela pecuária, exerce danos significativos ao ambiente, sendo reconhecida como um dos principais responsáveis por problemas globais, incluindo mudanças climáticas, degradação dos solos, escassez hídrica e perda de biodiversidade. Dados indicam que a pecuária responde por no mínimo 16,5% das emissões globais de gases de efeito estufa (Twine, 2021). Em relação aos recursos hídricos, para produzir 1 kg de carne bovina podem ser consumidos até 15.000 litros de água. Ademais, a pecuária exige vasta extensão de terra, obtida, muitas das vezes, por desmatamento (Tullo, Finzi & Guarino, 2019).

Em contrapartida, as proteínas alternativas surgem como uma solução com impacto ambiental significativamente reduzido. Fontes vegetais como soja, ervilha e grão-de-bico, utilizadas na produção de alimentos proteicos, demandam menos água e ocupam áreas menores que a pecuária (Wood & Tavan, 2022; Nolden & Forde, 2023). A biotecnologia de microalgas e fungos, pode ser ainda mais eficiente e sustentável. Esses cultivos consomem frações ínfimas de terra, as quais não precisam ser aráveis, e também não necessitam de água potável, tornando-se uma escolha promissora para atender à demanda alimentar global com menor dano ambiental. Essa transição não apenas reduz a exploração intensiva de recursos naturais, mas também contribui para mitigar os efeitos adversos da atividade humana (Amorim et al., 2021; Wang et al., 2023).

Além das questões ambientais, aspectos éticos e morais têm ganhado espaço nas discussões sobre o consumo de proteínas. A pecuária intensiva é alvo de críticas por suas práticas que frequentemente desconsideram o bem-estar animal, envolvendo confinamento extremo, mutilações e métodos de abate

considerados cruéis. Assim, as proteínas alternativas representam mais do que uma inovação alimentar, elas rejeitam práticas eticamente questionáveis e estão alinhadas com o bem-estar animal (Mylan, Andrews & Maye, 2023).

Outro ponto relevante é a segurança alimentar, uma parcela significativa dos grãos produzidos mundialmente é destinada à alimentação animal, enquanto bilhões de pessoas vivem em vulnerabilidade alimentar (Bekhit, Riley & Hussain, 2022). Cerca de 77% das terras agrícolas no mundo são usadas para a pecuária, mas ela fornece menos de 20% das calorias que são consumidas. A intensificação da industrialização e da comercialização das proteínas alternativas para o consumo humano permitem melhor aproveitamento dos recursos agrícolas, contribuindo para um acesso mais igualitário aos alimentos (Banach et al., 2023).

Assim, a transição para proteínas alternativas, além de ser uma resposta aos desafios ambientais, reflete uma transformação ética e moral na alimentação. Optar por fontes de proteína com menor impacto ambiental é um passo essencial para alinhar o consumo a valores mais sustentáveis e responsáveis.

3. Proteínas vegetais

As leguminosas se destacam dentre as matrizes vegetais como uma das mais importantes fontes de proteína não animal, com destaque para a soja. Esta leguminosa apresenta de 36% a 40% proteínas em base seca, um dos alimentos de origem vegetal com maior teor proteico (Semba et al., 2021). Entretanto, a soja não se destaca apenas pelo seu elevado conteúdo proteico, a proteína da soja é de alto valor biológico, apresenta em sua constituição todos os aminoácidos essenciais (isoleucina, leucina, valina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptofano e histidina) nas concentrações recomendadas. Esta condição raramente ocorre em vegetais, estes tendem a possuir aminoácidos limitantes, ou seja, ausência de aminoácidos essenciais ou concentração abaixo da necessária. Tornado a soja de grande valia para dietas vegetarianas e veganas (Michelfelder, 2009).

Outras leguminosas, como lentilhas e grão-de-bico, apresentam teores ligeiramente inferiores, entre 20% e 25% de proteína em base seca, mas ainda constituem opções de proteínas alternativas. Ambas apresentam concentrações adequadas de lisina, um aminoácido essencial geralmente limitante em cereais, o que as torna complementares a essas fontes. No caso das lentilhas e grão-de-bico, os aminoácidos limitantes são os sulfurados, metionina e cisteína. Na lentilha a concentração de metionina é de 0,10 a 0,15% e de cisteína de 0,15 a 0,20% (Aryee & Boye, 2017). Já no grão-de-bico, os valores são de 0,15 a 0,20% e de 0,20 a 0,25% para metionina e cisteína, respectivamente, todos os valores reportados em base seca (Khan et al., 2015).

Os cereais, como trigo, milho e arroz, apresentam conteúdo inferior de proteína quando comparados com as leguminosas, os conteúdos proteicos são 10-15% no trigo, 7-9% no milho e 7-8% no arroz, valores que variam de acordo com a cultivar, manejo e fatores edafoclimáticos (Rajnicová et al., 2019). Apesar do conteúdo proteico inferior eles são complementares as leguminosas, pois eles possuem concentrações adequadas dos aminoácidos sulfurados (metionina e cisteína), o aminoácido limitante nestes casos é a lisina. Assim, a combinação de leguminosas e cereais constitui uma fonte de proteína não animal de alto valor biológico, sendo útil também como matéria-prima para produtos *plant-based* e análogos (Patil et al., 2017).

Também podem ser mencionadas como fontes de proteínas vegetais as oleaginosas, amêndoas (20-25% de proteínas), nozes (15-20% de proteínas) e castanhas (14-20% de proteínas), todas contendo a lisina como aminoácido limitante (Kotecka-Majchrzak et al., 2020). As oleaginosas podem ser empregadas em combinação com as leguminosas, afim de suprir a carência de lisina, agregando ao perfil proteico, um alto teor de ácidos graxos poli-insaturados e de minerais (List, 2016).

Ademais, tem-se as sementes, girassol e linhaça podem conter até 25% de proteínas, enquanto chia apresenta até 20%, valores em base seca. Assim como nos cereais e oleaginosas, o aminoácido limitante é a lisina. Se utilizadas em combinação com leguminosas podem fornecer uma proteína de alto valor biológico, aliada a elevadas concentrações de ácidos graxos poli-insaturados ômega-3, principalmente se empregadas linhaça ou chia. Salienta-se que os

ácidos graxos poli-insaturados ômega-3 são os de maior benefício para saúde humana (Khan et al., 2010; Kulczyński et al., 2019; Muttagi & Joshi, 2020).

3.1. *Plant-based*

Os produtos à base de plantas, conhecidos como *plant-based*, são elaborados exclusivamente com ingredientes de origem vegetal e buscam replicar as características sensoriais e nutricionais dos produtos de origem animal (Brasil, 2020). Estes produtos incluem potenciais substitutos de carne, laticínios e ovos, por exemplo, oferecendo uma opção mais sustentável no mercado de alimentos. No entanto, é importante destacar que sua presença não implica automaticamente em serem mais saudáveis (Wankenne, 2020).

Atualmente, os alimentos *plant-based* são regulamentados pela Lei nº 9.972/20 e pelo Decreto nº 6.268/07, que tratam de produtos vegetais e seus subprodutos. Porém, essas normas não abordam especificamente os alimentos que mimetizam as características de produtos de origem animal. Para preencher essa lacuna, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) iniciou, em 2023, uma Consulta Pública com o objetivo de definir requisitos de identidade, qualidade, rotulagem e exigências de registro para estes produtos (GFI Brasil, 2023).

Embora o consumo de produtos *plant-based* tenha aumentado nos últimos anos, eles sempre estiveram presentes na alimentação humana, sendo valorizados pela acessibilidade e facilidade de armazenamento, o que contribuiu para sua aceitação (de Camargos, 2023). As bebidas vegetais foram os primeiros produtos *plant-based* a serem introduzidos no Brasil, principalmente para atender às necessidades de populações com restrições alimentares.

O tofu como substituto de queijo e a proteína texturizada de soja como alternativa à carne, já são conhecidos e consumidos há muito tempo, mas os esforços atuais estão no desenvolvimento de produtos com maior similaridade de características sensoriais, incluindo sabor, textura e aparência (Curtain & Grafenauera, 2019). Assim, empresas nacionais e internacionais têm investido milhões para que este objetivo seja alcançado e atenda satisfatoriamente este nicho de mercado crescente.

4. Proteínas fúngicas

As proteínas derivadas de fungos têm sido cada vez mais estudadas devido à sua alta qualidade proteica e eficiência produtiva, que não dependem diretamente da agricultura ou do clima. A produção de proteínas fúngicas apresenta-se como uma abordagem eficiente para mitigar problemas ambientais, pois os fungos podem fazer dos resíduos industriais e agrícolas substratos para a síntese de compostos proteicos de valor agregado, contribuindo significativamente para uma economia circular. Por isso, a proteína fúngica é considerada uma fonte emergente e altamente promissora (Wang et al., 2023).

Os fungos, pertencentes a um dos grupos mais diversos de organismos eucariontes, abrangem desde leveduras unicelulares até cogumelos multicelulares visíveis a olho nu. Eles desempenham funções cruciais na manutenção dos ecossistemas, além de serem fundamentais nos ciclos do carbono e na disponibilização de nitrogênio, fósforo e outros elementos essenciais para a vida na terra (Naranjo-Ortiz et al., 2019). Os fungos podem ser classificados em três categorias principais: unicelulares, multicelulares e macrofilamentares, com destaque para macrofungos, consumidos na dieta humana há séculos (Souza, 2022).

Atualmente, as proteínas derivadas de fungos estão sendo cada vez mais exploradas na indústria alimentícia devido à sua alta disponibilidade, qualidade e funcionalidade. Elas apresentam atividades biológicas diversas, como lectinas, proteínas imunomoduladoras, proteínas semelhantes à ubiquitina, manoproteínas e enzimas. Além disso, peptídeos bioativos derivados de fungos têm sido amplamente estudados por suas propriedades antitumorais, imunomoduladoras, antivirais, anti-inflamatórias, antioxidantes e outros efeitos benéficos à saúde, incluindo o tratamento de doenças (Wang et al., 2023).

A biomassa fúngica é uma alternativa nutritiva com propriedades bioativas, sendo utilizada como substituta da carne na dieta humana. As proteínas fúngicas processadas podem reproduzir textura, devido a matriz fibrosa desta biomassa, como também sabor e aparência da carne animal, sendo empregadas satisfatoriamente em análogos cárneos com problemas mínimos de

alergenicidade (Zhang et al., 2024). Ademais, as propriedades funcionais das micoproteínas, como solubilidade, capacidade de formação de fibras e fácil digestibilidade, influenciam positivamente no processamento e na textura destes análogos (Kurek et al., 2022).

Dentre os fungos com maior produtividade proteica podem ser mencionadas as leveduras *Candida utilis* e *Saccharomyces cerevisiae* que podem acumular em suas células até 55 e 50% de proteínas, respectivamente, em base seca. Já dentre os fungos filamentosos de maior concentração proteica estão *Fusarium venenatum* (45%), *Aspergillus oryzae* (40%), *Rhizopus oligosporus* (40%), *Neurospora intermedia* (35%) e *Aureobasidium pullulans* (35%). Vale mencionar que a biomassa de *Fusarium venenatum*, além de apresentar a maior concentração de proteínas, as mesmas são de alto valor biológico e possuem textura naturalmente semelhante à carne (Hashempour-Baltork et al., 2020).

A maioria dos fungos, incluindo os mencionados acima, pode ser cultivada em resíduos da indústria de alimentos, constituindo assim uma excelente opção para a economia circular, na qual efluentes são convertidos em produtos de valor agregado, como proteínas e outros nutrientes, além de minimizar os impactos ambientais e atender a questões éticas e morais (Dean, 2022).

5. Proteínas de algas e microalgas

A biomassa derivada de algas marinhas e microalgas surge como uma fonte potencial de proteína não animal, sendo considerada uma fonte alternativa relevante devido a diversas vantagens sobre a biomassa terrestre, incluindo baixo custo de cultivo, maiores taxas de crescimento e produção, baixo consumo de água (ou até mesmo crescimento em água do mar), não competir com a produção de alimentos por terra, emissões de carbono neutras, biorremediação (tratamento de resíduos), ausência ou baixo teor de lignina (facilitando processos de extração), baixa alergenicidade e a possibilidade de produção de elevado conteúdo de proteínas e uma ampla gama de compostos bioativos (Geada et al., 2021; Chen et al., 2019; Ijaola et al., 2023; Vendruscolo et al., 2021).

As macroalgas, ou "algas marinhas", são organismos multicelulares, autotróficos e não embriófitos, com grande diversidade de formas e tamanhos, podendo ser classificadas em três grandes grupos com base em sua pigmentação: algas marrons (*Phaeophyceae*), algas vermelhas (*Rhodophyceae*) e algas verdes (*Chlorophyceae*). Em contraste, as microalgas são organismos fotossintéticos, tanto procariontes quanto eucariontes, microscópicos, e podem ser classificadas em algas verde-azuladas (*Cyanobacteria*), diatomáceas (*Bacillariophyta*) e dinoflagelados (*Dinophyceae*). Ambas são caracterizadas por se desenvolverem em vários habitats aquáticos (lagos, lagoas, rios, oceanos e águas residuais) (Samarakoon & Jeon, 2012; Vendruscolo et al., 2019; Ba et al., 2016).

A composição proteica de algas e microalgas pode representar de 40% a 70% do peso seco da biomassa para microalgas e de 4% a 22% em média para algas. O perfil de aminoácidos totais dessas fontes é equilibrado, sendo semelhante a fontes animais, como ovos e carne, apresentando todos os aminoácidos essenciais. Contudo, a qualidade das proteínas pode variar drasticamente, dependendo da digestibilidade e da disponibilidade desses aminoácidos essenciais. Além do potencial como fonte alternativa de proteína, as proteínas de algas e microalgas podem fornecer peptídeos bioativos e outros compostos proteicos de alto valor biológico, com grande impacto benéfico na saúde, exibindo propriedades antioxidantes, antiproliferativas, anti-inflamatórias, anti-hipertensivas, antidiabéticas, antiateroscleróticas, anticoagulantes e antimicrobianas (Bleakley & Hayes, 2017; Lucakova, Branyikova, & Hayes, 2022; Geada et al., 2022).

Além das propriedades biológicas fornecidas à saúde humana associadas às proteínas obtidas de algas e microalgas, diversas funções são desempenhadas por elas nos alimentos que vão além de seu valor nutricional, como a implementação de características desejáveis e seu comportamento físico durante o preparo, transformação e armazenamento. Nesse contexto, as algas podem apresentar aplicações tanto tecnofuncionais quanto biofuncionais (figura 1) (Ijaola et al., 2023; Samarakoon & Jeon, 2012). As propriedades funcionais mais comuns de proteínas derivadas dessas fontes são capacidade de emulsificação e formação de espuma.

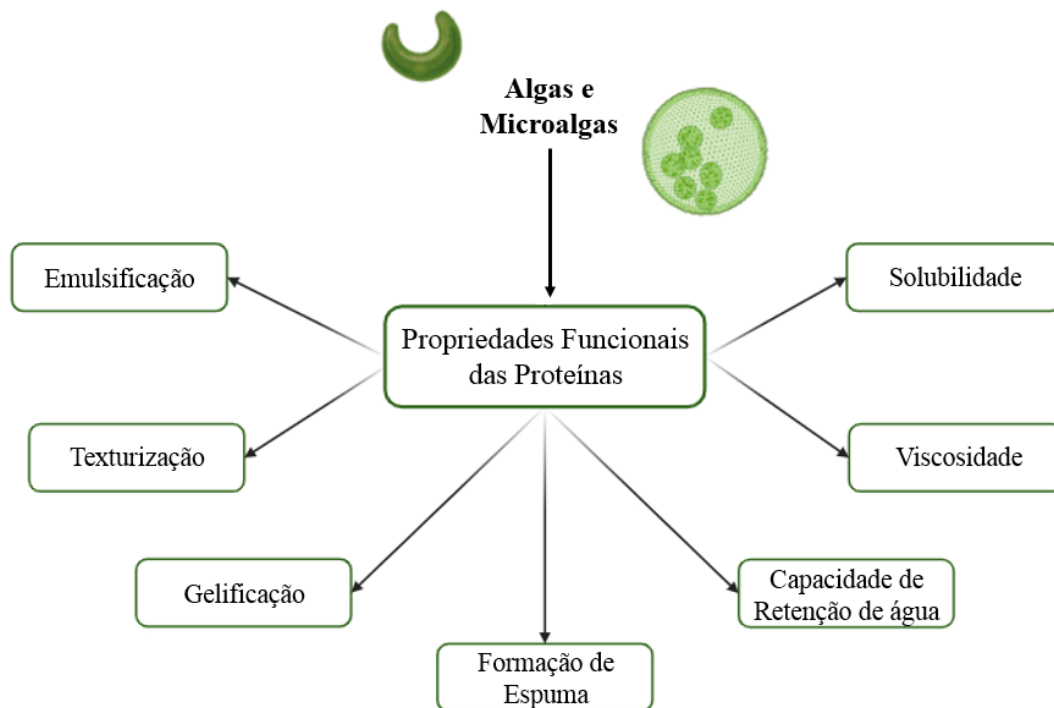


Figura 1. Propriedades das proteínas de origem algal e microalgal.

As propriedades funcionais das proteínas de algas e microalgas apresentam variações que estão relacionadas a fatores como espécie do microrganismo, estrutura da proteína, tamanho, carga líquida, interações proteína-proteína e proteína com outras moléculas em solução. Além disso, o método de extração, o pH e a força iônica também influenciam nestas propriedades (Chen et al., 2019; Ursu et al., 2014; Samarakoon & Jeon, 2012; Ijaola et al., 2023; Matos, 2019).

Proteínas de algas e microalgas tendem a apresentar baixa digestibilidade em sua forma crua e não processada, levando a esforços na pesquisa de métodos para melhorar sua biodisponibilidade (Lucakova, Branyikova & Hayes, 2022). Dentre os métodos convencionais estão hidrólise enzimática (celulases, κ -carragenase, β -agarase, xilanase e β -glucanase), processos físicos (particionamento trifásico, estresse osmótico, alta força de cisalhamento, moagem úmida/seca, congelamento-descongelamento, tratamento aquoso, homogeneização com alta pressão) e químicos (tratamento ácido-alcalino, sistemas bifásicos e alcalino/aquoso). No entanto, esses métodos enfrentam limitações para aplicação comercial devido a desafios de

escalabilidade (Bleakley & Hayes, 2017; Dolganyuk et al., 2023; Ijaola et al., 2023).

Métodos alternativos, como extração assistida por ultrassom, campo elétrico pulsado, micro-ondas e fluidos sub e supercríticos, têm sido explorados para aumentar a eficiência e preservar as propriedades das proteínas. Contudo, a obtenção de proteínas puras continua sendo um desafio, pois frequentemente são coextraídas com compostos como polissacarídeos, lipídeos e minerais. Processos de purificação, como diálise e cromatografia de troca iônica, são necessários em muitas aplicações, mas elevam os custos de produção (Acquah et al., 2021; Lucakova, Branyikova, & Hayes, 2022; Amorim et al., 2021; Matos, 2019).

Entre as algas, as espécies do gênero *Porphyra* destacam-se pelo alto teor proteico, apresentando valores entre 25% e 50% em base seca. Outras espécies, como *Palmaria palmata* e *Undaria pinnatifida*, também possuem concentrações significativas, variando de 10% a 30%. Essas algas já são amplamente consumidas na alimentação humana, especialmente em países asiáticos, devido não apenas ao conteúdo proteico, mas também ao perfil de aminoácidos essenciais que apresentam. Ademais, algas marrons, como as do gênero *Laminaria*, embora possuam menor teor de proteínas (5% a 15%), se destacam por seu potencial funcional (Geada et al., 2021; Ijaola et al., 2024).

Já as microalgas são reconhecidas pelo maior teor proteico quando comparadas as algas, sendo as espécies *Chlorella vulgaris* e *Spirulina platensis* amplamente estudadas como fontes de proteínas. A *Spirulina*, por exemplo, pode conter entre 60% e 70% de proteínas em base seca, enquanto a *Chlorella* apresenta teores de 40% a 60% (Ramírez-Rodrigues et al., 2021; Albaqami, 2024). Outra espécie de destaque é a *Scenedesmus obliquus*, com valores que chegam a 50%. Condições de cultivo favoráveis (incidência de luz, fontes de carbono, nitrogênio e fósforo, disponibilidade de micronutrientes, temperaturas entre 20-30 °C e pH levemente básico) proporcionam síntese de proteínas de alto valor biológico, constituindo uma excelente fonte alternativa destes compostos (Vendruscolo et al., 2022).

A produção de proteínas de origem algal e microalgal apresenta diversas vantagens em comparação as fontes tradicionais, como alimentos de origem

animal e soja. Estes microrganismos possuem alta eficiência na conversão de recursos naturais, como luz solar, dióxido de carbono e nutrientes, em biomassa com altos teores proteicos, utilizando menor quantidade de terra e água. Além disso, os cultivos podem ser realizados em sistemas controlados, como biorreatores ou tanques, possibilitando a produção em áreas não agrícolas, como regiões costeiras e desertos. Outra vantagem significativa é a possibilidade do uso de efluentes como meio de cultivo e a captura de dióxido de carbono através da fotossíntese. Por fim, as proteínas de algas e microalgas são naturalmente isentas de fatores alergênicos como glúten e lactose (Espinosa-Ramírez et al., 2023; Williamson et al., 2024; Yang et al., 2024).

No entanto, a consolidação das proteínas de algas e microalgas enfrenta barreiras como variação no conteúdo proteico devido a fatores sazonais e ambientais, desafios de escalabilidade, segurança alimentar devido ao acúmulo de metais pesados, por exemplo, e custos elevados dos processos de extração e purificação. Além disso, questões de digestibilidade e biodisponibilidade das proteínas destes microrganismos ainda requerem mais estudos in vivo para conclusões definitivas (Bleakley & Hayes, 2017).

6. Produtos análogos

6.1. Análogos de carne

Os análogos de carne à base de plantas são produtos projetados para substituir a carne animal em sua funcionalidade, apresentando semelhanças significativas em termos de propriedades sensoriais, tais como textura, sabor, aparência e aroma. Além disso, esses produtos podem ser preparados pelo consumidor da mesma forma que a carne animal. Essa similaridade com a carne animal é de suma importância para atrair os consumidores que atualmente ainda optam pelo consumo de carne (Hoek et al., 2011).

A maioria dos produtos desta categoria encontrados no Brasil são fabricados a partir de soja nacional. Eles são produzidos a partir de ingredientes como a farinha de soja desengordurada, concentrado proteico de soja e isolado de proteína de soja (Singh et al., 2021). No entanto, eles podem ser elaborados

utilizando uma combinação de várias matérias-primas vegetais, como grãos, frutas, tubérculos, raízes tuberosas, entre outros.

A soja é reconhecida por seus notáveis benefícios nutricionais e funcionais. Seu perfil de nutrientes essenciais e sua associação com menor incidência de doenças cardiovasculares, a tornam uma opção interessante para substituir parcialmente ou integralmente as carnes em dietas variadas (Kumar et al., 2017).

O desenvolvimento de produtos cárneos vegetais é comumente realizado por meio do processo de extrusão. No entanto diversas outras tecnologias são empregadas para reproduzir a textura fibrosa da carne em produtos análogos à base de plantas. Alguns exemplos envolvem a técnicas de eletrofiação (Wongkanya et al., 2017) e técnicas de estruturação por congelamento (Lawrence & Jelen, 1982). Ambas as abordagens têm sido utilizadas para a produção de uma gama de produtos análogos à carne reproduzindo fielmente as características da carne convencional.

6.2. Análogos de leite

Os análogos do leite ou extratos vegetais podem ser elaborados a partir de uma variedade de matérias-primas, como quinoa, soja, castanhas, aveia, arroz, amêndoas, entre outras, sendo as bebidas feitas com soja e coco as mais populares. Elas apresentam concentrações consideráveis de proteínas, ácidos graxos insaturados, vitaminas e minerais, o que os torna uma escolha nutricionalmente vantajosa. Além disso, os extratos resultantes, geralmente, possuem uma aparência e cor semelhantes ao leite tradicional (Tangyu, et al., 2019).

O aumento da demanda do consumidor por esse tipo de produto, é uma resposta ao crescente número de pessoas que enfrentam problemas com o consumo de leite de vaca, abrangendo tanto a intolerância à lactose, quanto a alergia a proteína do leite (Jeske et al., 2018). Adicionalmente as bebidas *plant-based*, apresentam um reduzido teor de ácidos graxos saturados e baixo valor calórico, além de serem fontes de vitaminas, minerais e compostos com atividade antioxidantes (carotenoides e compostos fenólicos, por exemplo). Elas

também oferecem uma maior diversidade, dada a grande variedade de opções de origem vegetal (Kim et al., 2021).

Entre as diversas opções para a produção do leite vegetal, a soja se destaca como um dos principais ingredientes, alta concentração de proteína de alto valor biológico e de fibras alimentares, a qual já é amplamente utilizada em escala industrial. No entanto, ela apresenta características não muito palatáveis, como o sabor desagradável de feijão envelhecido, devido à ação enzimática da lipoxigenase ou à auto-oxidação de ácidos graxos poli-insaturados. Para melhorar as características sensoriais desses produtos, uma estratégia é combinar o extrato de soja com arroz (Costa et al., 2017).

Salienta-se que estas combinações de extratos proteicos vegetais são benéficas não apenas por suas propriedades sensoriais, mas também por possibilitarem uma melhora no perfil de aminoácidos essenciais destes análogos, atendendo as necessidades diárias exigidas no consumo humano (Gorissen et al., 2018).

6.3. Análogos de ovos

Os análogos de ovos são produtos desenvolvidos para replicar a textura e o sabor do ovo convencional e têm se tornado populares como alternativas mais saudáveis aos ovos, uma vez que são isentos de colesterol. Essa tendência está alinhada com os dados de mercado, onde cerca 41,2% dos novos lançamentos afirmaram ter teor de colesterol baixo, ausente ou reduzido (Boukid & Gagaoua, 2022).

Além disso, outro motivo para a crescente popularidade desse produto é a alta incidência de alergia ao ovo de galinha, que é a segunda alergia alimentar mais comum na infância, afetando aproximadamente 2,5% das crianças. Diante desse dado, as diretrizes da Academia Americana de Pediatria recomendam adiar a introdução de alimentos alergênicos comuns, como ovos, até os 2-3 anos de idade, levando à prática generalizada de uma introdução gradual ou mesmo à completa evitação de ovos durante a infância (Wen et al., 2023).

Os análogos de ovos podem ser elaborados utilizando um único ingrediente vegetal ou uma combinação de vários ingredientes para replicar as

propriedades dos ovos convencionais. Algumas leguminosas, como ervilha, lentilha, e grão-de-bico, são ricas em proteínas, amidos e fibras, e contêm diversos nutrientes essenciais (vitaminas e minerais) benéficos à saúde. (Boukid et al.,2019). Proteínas provenientes dessas leguminosas, tanto em sua forma natural quanto modificada, podem oferecer funcionalidades interessantes, como gelificação, emulsificação e formação de espuma, para a formulação de ovos veganos (Ladjal-Ettoumi et al., 2016). Essas características permitem que os ovos de origem vegetal sejam utilizados como substitutos de ovos convencionais em produtos de panificação, sobremesas e confeitaria (FactMR, 2021).

Diversas indústrias estão se adaptando às novas demandas dos consumidores, e, como resultado, podemos esperar uma ampla variedade de opções de ovos de origem vegetal. No Brasil, por exemplo, a maior produtora de ovos convencionais também está acompanhando a nova demanda dos consumidores ao lançar sua primeira formulação de ovo *plant-based* em pó. Esta alternativa utiliza ingredientes como proteína de ervilha, amido de ervilha e linhaça dourada, oferecendo características muito semelhantes às de um ovo convencional quando misturado com água, alinhando assim as necessidades do mercado, com saudabilidade e sustentabilidade (Hu & Meng, 2024).

6.4. Análogos de queijo

Os análogos de queijo são produtos elaborado a partir de ingredientes vegetais, projetados para mimetizar aparência, textura e sabor dos queijos de origem animal. Esses queijos são produzidos utilizando-se proteínas vegetais obtidas por meio de fracionamento ou ruptura de tecidos vegetais, resultando em produtos que são dispersões coloidais complexas. Essas dispersões consistem em gotículas lipídicas incorporadas em uma rede viscoelástica de polissacarídeos e/ou proteínas, conferindo-lhes sua estrutura e textura características (Grossmann, 2021).

Embora o termo “produto tipo queijo vegetal” possa parecer recente, muitos desses produtos têm uma longa história de consumo ao longo de séculos, destacando-se como alimentos tradicionais em diversas culturas. Um exemplo é

o tofu fermentado, um tipo de queijo vegetal à base de soja, originário da China, entre outros produtos semelhantes (Grossmann, 2021).

Segundo o Instituto Good Food, as vendas de queijos à base de vegetais registraram um notável aumento de 42% entre 2019 e 2020, alcançando a marca de \$270 milhões em produtos comercializados exclusivamente no mercado varejista dos Estados Unidos em 2020 (GFI Brasil, 2020). Além disso, é previsto um aumento contínuo a uma taxa composta anual de crescimento de 12,6% no período entre 2022 e 2030 (Grand View Research Service, 2024).

Assim como a maioria dos análogos de produtos de origem animal, esse aumento está associado a motivos tais como preocupações com a saúde, bem como a considerações ambientais e de bem-estar animal. Além disso, a busca por variedade na dieta e a disposição para experimentar novos produtos também tem influenciado a opção da população por esses produtos (Craig, Mangels & Brothers, 2022).

6.5. Análogos de manteigas

As manteigas à base de plantas são excelentes fontes de proteínas, fibras, ácidos graxos essenciais e outros nutrientes, semelhantes aos encontrados nos produtos de manteiga láctea, mas sem colesterol (Gorrepati, Balasubramanian & Chandra, 2015). Por se tratarem de produtos elaborados a partir de nozes e sementes vegetais como amendoim, amêndoa, caju, avelã, entre outros, elas apresentam uma proporção mais elevada de ácidos graxos insaturados em comparação com a manteiga convencional. Além disso, são ricas em diversos minerais, como zinco, cálcio e magnésio (Joshi & Bisht, 2020).

Inicialmente, a manteiga de amendoim era a única alternativa à manteiga láctea. No entanto, ao longo dos anos, o avanço tecnológico e a conscientização do consumidor impulsionaram o desenvolvimento de inúmeras variedades de manteigas vegetais, derivadas de diferentes nuts e sementes. Atualmente, o mercado oferece diversas opções de manteigas vegetais, incluindo manteiga de amendoim, manteiga de soja, manteiga de amêndoa, manteiga de pistache, manteiga de caju e manteiga de gergelim (Gorrepati, Balasubramanian & Chandra, 2015).

De acordo com o relatório do Meticulous Research (2023), o mercado de manteigas à base de plantas está previsto para experimentar um notável crescimento nos próximos anos. A projeção indica uma taxa de crescimento anual composto de 10,8% no período entre 2023 e 2030, culminando em uma avaliação do mercado atingindo a marca de US\$ 2,08 bilhões até o desta década.

7. Conclusão

As proteínas alternativas representam uma solução promissora para enfrentar os desafios globais de sustentabilidade, saúde e ética alimentar. A transição para fontes vegetais, fúngicas, de algas e de microalgas oferece uma alternativa viável às proteínas animais, aliando nutrição com menor impacto ambiental e bem-estar animal. Entretanto, a medida que o mercado de proteínas alternativas cresce, a inovação tecnológica e as mudanças nos hábitos de consumo são fundamentais para a expansão e fortalecimento deste mercado.

8. Referências

- ACQUAH, C., EKEZIE, F. G., & UDENIGWE, C. C. (2021). Potential applications of microalgae-derived proteins and peptides in the food industry. In *Cultured microalgae for the food industry* (pp. 97–126). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821080-2.00011-3>
- ALBAQAMI, N. M. (2024). *Chlorella vulgaris* as unconventional protein source in fish feed: A review. *Aquaculture*, 741, 404. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.741404>
- AMORIM, M. L., SOARES, J., COIMBRA, J. S. D. R., LEITE, M. D. O., ALBINO, L. F. T., & MARTINS, M. A. (2021). Microalgae proteins: Production, separation, isolation, quantification, and application in food and feed. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(12), 1976-2002. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1745727>
- ARYEE, A. N., & BOYE, J. I. (2017). Comparative study of the effects of processing on the nutritional, physicochemical and functional properties of lentil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(1), e12824. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12824>
- BA, F., URSU, A. V., LAROCHE, C., & DJELVEH, G. (2016). *Haematococcus pluvialis* soluble proteins: Extraction, characterization,

concentration/fractionation, and emulsifying properties. *Bioresource Technology*, 200, 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.012>

BANACH, J. L., VAN DER BERG, J. P., KLETER, G., VAN BOKHORST-VAN DE VEEN, H., BASTIAAN-NET, S., POUVREAU, L., & VAN ASSELT, E. D. (2023). Alternative proteins for meat and dairy replacers: Food safety and future trends. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(32), 11063–11080. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2233787>

BEKHIT, A. E. D. A., RILEY, W. W., & HUSSAIN, M. A. (Eds.). (2022). *Alternative Proteins: Safety and Food Security Considerations*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367447024>

BLEAKLEY, S., & HAYES, M. (2017). Algal proteins: Extraction, application, and challenges concerning production. *Foods*, 6(5), 33. <https://doi.org/10.3390/foods6050033>

BOUKID, F., & GAGAOUA, M. (2022). Vegan egg: A future-proof food ingredient? *Foods*, 11(2), 161. <https://doi.org/10.3390/foods11020161>

BRASIL. (2020, 22 de maio). Lei nº 9.972, de 22 de maio de 2020. Dispõe sobre a classificação de produtos vegetais, subprodutos e resíduos de valor econômico. *Diário Oficial da União*. Recuperado em 26 de outubro de 2024, de <https://www.in.gov.br>

CHEN, Y., CHEN, J., CHANG, C., CHEN, J., CAO, F., ZHAO, J., ZHENG, Y., & ZHU, J. (2019). Physicochemical and functional properties of proteins extracted from three microalgal species. *Food Hydrocolloids*, 96, 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.05.025>

COSTA, K. K. F. D., et al. (2017). Changes of probiotic fermented drink obtained from soy and rice byproducts during cold storage. *LWT - Food Science and Technology*, 78, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.048>

CRAIG, W. J., MANGELS, A. R., & BROTHERS, C. J. (2022). Nutritional profiles of non-dairy *plant-based* cheese alternatives. *Nutrients*, 14(6), 1247. <https://doi.org/10.3390/nu14061247>

CURTAIN, F., & GRAFENAUER, S. (2019). *Plant-based* meat substitutes: Nutritional, health and environmental perspective. *Nutrients*, 11(11), 2601. <https://doi.org/10.3390/nu11112601>

DE ARAUJO, N. C., BRINQUES, G. B., & GURAK, P. D. (2021). Análogos de carne: Uma revisão narrativa e pesquisa comercial online. *Segurança Alimentar e Nutricional*, 28, e021037-e021037. <https://doi.org/10.20396/san.v28i0.8667202>

DE CAMARGOS, F. C., RODRIGUES, A. P. B., BORGES, D. P., & MORAES, R. F. (2023). Alimentos *plant-based*: Análise da percepção do consumidor pelo uso de Word Association. *Brazilian Journal of Development*, 9(5), 16915–16934. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n5-196>

DEAN, D., ROMBACH, M., KONING, W. D., VRIESEKOOOP, F., SATYAJAYA, W., YULIANDARI, P., & AGUIAR, L. K. (2022). Understanding key factors influencing consumers' WILLINGNESS to try, buy, and pay a price premium for mycoproteins. *Nutrients*, 14(16), 3292. <https://doi.org/10.3390/nu14163292>

DOLGANYUK, V., SUKHIKH, S., KALASHNIKOVA, O., IVANOVA, S., KASHIRSKIKH, E., PROSEKOV, A., MICHAUD, P., & BABICH, O. (2023). Food proteins: Potential resources. *Sustainability*, 15(7), 5863. <https://doi.org/10.3390/su15075863>

ESPINOSA-RAMÍREZ, J., MONDRAGÓN-PORTOCARRERO, A. C., RODRÍGUEZ, J. A., LORENZO, J. M., & SANTOS, E. M. (2023). Algae as a potential source of protein meat alternatives. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1254300. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1254300>

FACTMR. (2022). *Plant-based Food Market by Product Type, Source and Distribution Channel - Global Forecast to 2027*. Retrieved from <https://www.factmr.com/report/plant-based-food-market>

GEADA, P., MOREIRA, C., SILVA, M., NUNES, R., MADUREIRA, L., ROCHA, C. M., ... & TEIXEIRA, J. A. (2021). Algal proteins: Production strategies and nutritional and functional properties. *Bioresource Technology*, 332, 125125. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125125>

GFI BRASIL. (2020). O consumidor brasileiro e o mercado *plant-based*. The Good Food Institute. Retrieved from <https://gfi.org.br/wp-content/uploads/2021/02/O-consumidor-brasileiro-e-o-mercado-plant-based.pdf>

GORISSEN, S. H., et al. (2018). Protein content and amino acid composition of commercially available *plant-based* protein isolates. *Amino Acids*, 50, 1685-1695. <https://doi.org/10.1007/s00726-018-2636-6>

GORREPATI, K., BALASUBRAMANIAN, S., & CHANDRA, P. (2015). *Plant-based* butters. *Journal of Food Science and Technology*, 52(7), 3965–3976. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1572-7>

GRAND VIEW RESEARCH SERVICE. (2021). Vegan Cheese Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product (Mozzarella, Ricotta), By Source (Soy Milk, Cashew Milk), By End Use (Household, Foodservice), By Region, and Segment Forecasts, 2021–2028. Retrieved from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/vegan-cheese-market>

GROSSMANN, L., & MCCLEMENTS, D. J. (2021). The science of *plant-based* foods: Approaches to create nutritious and sustainable *plant-based* cheese analogs. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 207-229. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.012>

HARRAY, A. J., BOUSHEY, C. J., POLLARD, C. M., DHALIWAL, S. S., MUKHTAR, S. A., DELP, E. J., & KERR, D. A. (2022). Healthy and Sustainable Diet Index: Development, application, and evaluation using image-based food records. *Nutrients*, 14(18), 3838. <https://doi.org/10.3390/nu14183838>

HASHEMPOUR-BALTORK, F., KHOSRAVI-DARANI, K., HOSSEINI, H., FARSHI, P., & REIHANI, S. F. S. (2020). Mycoproteins as safe meat substitutes. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119958. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119958>

HAYES, M., SKOMEDAL, H., SKJÅNES, K., MAZUR-MARZEC, H., TORUŃSKA-SITARZ, A., CATALA, M., HOSOGLU, M. I., & GARCÍA-VAQUERO, M. (2017). Microalgal proteins for feed, food, and health. In *Microalgae-based biofuels and bioproducts* (pp. 347–368). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00015-7>

HOEK, A. C., LUNING, P. A., WEIJZEN, P., ENGELS, W., KOK, F. J., & DE GRAAF, C. (2011). Replacement of meat by meat substitutes: A survey on person-and product-related factors in consumer. *Appetite*, 56(3), 663-672. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2011.01.018>

HORGAN, G. W., et al. (2019). Social, temporal and situational influences on meat consumption in the UK population. *Appetite*, 138, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.04.009>

HU, X., & MENG, Z. (2024). Flourless *plant-based* egg analogue based on protein and curdlan: Thermogel behavior regulation and foam stabilization analysis. *Food Hydrocolloids*, 110346. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.110346>

IJAOLA, A. O., AKAMO, D. O., GEORGE, T. T., SENGUL, A., ADEDIJI, M. Y., & ASMATULU, E. (2023). Algae as a potential source of protein: A review on cultivation, harvesting, extraction, and applications. *Algal Research*, Article 103329. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103329>

JESKE, S., ZANNINI, E., & ARENDT, E. K. (2018). Past, present and future: The strength of *plant-based* dairy substitutes based on gluten-free raw materials. *Food Research International*, 110, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.053>

JOSHI, H., & BISHT, B. (2020). A review: Nutritional benefits of *plant-based* seed-nut butter. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(1), 471-473. ISSN 2455-2143.

KHAN, M. A., AMMAR, M. H., MIGDADI, H. M., EL-HARTY, E. H., OSMAN, M. A., FAROOQ, M., & ALGHAMDI, S. S. (2015). Comparative nutritional profiles of various faba bean and chickpea genotypes. *International Journal of Agriculture and Biology*, 17(3), 449-457.

KHAN, M. L., SHARIF, M., SARWAR, M., & AMEEN, M. (2010). Chemical composition of different varieties of linseed. *Pakistan Veterinary Journal*, 30(2), 88-90.

KIM, T. J., SEO, K. H., CHON, J. W., YOUN, H. Y., KIM, H. J., KIM, Y. S., ... & SONG, K. Y. (2021). Development of *plant-based* milk analogues as alternatives to cow milk: Current status and future prospects. *Journal of Dairy Science and Biotechnology*, 39(4), 129-144. <https://doi.org/10.1186/s13594-021-00453-z>

- KOTECKA-MAJCHRZAK, K., SUMARA, A., FORNAL, E., & MONTOWSKA, M. (2020). Oilseed proteins—Properties and application as a food ingredient. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.009>
- KULCZYŃSKI, B., KOBUS-CISOWSKA, J., TACZANOWSKI, M., KMIĘCIK, D., & GRAMZA-MICHAŁOWSKA, A. (2019). The chemical composition and nutritional value of chia seeds—Current state of knowledge. *Nutrients*, 11(6), 1242. <https://doi.org/10.3390/nu11061242>
- KUMAR, P., et al. (2017). Meat analogues: Health-promising sustainable meat substitutes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(5), 923-932. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1109927>
- KUREK, M. A., JANKOWSKA, A., GROBELNA, N., & GAJOS, M. (2022). Functional properties of fungal proteins as meat analogues. *Journal of Food Science and Technology*, 59(4), 1230–1240. <https://doi.org/10.1007/s11483-021-01768-1>
- LADJAL-ETTOUMI, Y., et al. (2016). Isolados de proteína de ervilha, grão de bico e lentilha: caracterização físico-química e propriedades emulsificantes. *Biofísica de Alimentos*, 11, 43-51.
- LAWRENCE, R. A., & JELEN, P. (1982). Freeze-induced fibre formation in protein extracts from residues of mechanically separated poultry. *Food Structure*, 1(1), 91-97.
- LIST, G. R. (2016). Oilseed composition and modification for health and nutrition. In *Functional dietary lipids* (pp. 23-46). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100524-0.00002-5>
- LUCAKOVA, S., BRANYIKOVA, I., & HAYES, M. (2022). Microalgal proteins and bioactives for food, feed, and other applications. *Applied Sciences*, 12(9), 4402. <https://doi.org/10.3390/app12094402>
- MAIA, A. F., BRAZ, D. R., & HERRERO, M. (2016). Aspectos econômicos e impactos ambientais da pecuária bovina de corte brasileira. *Revista de Agricultura*, 20(3), 1-15. <https://csr.ufmg.br/dinamica>
- MATOS, Â. P. (2019). Microalgae as a potential source of proteins. In *Proteins: Sustainable source, processing and applications* (pp. 63–96). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816695-6.00003-9>
- METICULOUS RESEARCH. (2022). *Plant-based Food Market by Product Type, Source and Distribution Channel - Global Forecast to 2027* (314 p.).
- MICHELFELDER, A. J. (2009). Soy: A complete source of protein. *American Family Physician*, 79(1), 43-47. <https://www.aafp.org/afp/2009/0101/p43.html>
- MUTTAGI, G. C., & JOSHI, N. (2020). Physico-chemical composition of selected sunflower seed cultivars. *International Journal of Chemical Studies*, 8(4), 2095-2100.

MYLAN, J., ANDREWS, J., & MAYE, D. (2023). The big business of sustainable food production and consumption: Exploring the transition to alternative proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(47), e2207782120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2207782120>

NADATHUR, S., WANASUNDARA, J. P., MARINANGELI, C. P. F., & SCANLIN, L. (2024). Proteins in our diet: Challenges in feeding the global population. In *Sustainable protein sources* (pp. 1–29). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822361-9.00001-X>

NARANJO-ORTIZ, M. A., & GABALDÓN, T. (2019). Fungal evolution: Major ecological adaptations and evolutionary transitions. *Biological Reviews*, 94(5), 1443–1476. <https://doi.org/10.1111/brv.12510>

NOLDEN, A. A., & FORDE, C. G. (2023). The nutritional quality of *plant-based* foods. *Sustainability*, 15(4), 3324. <https://doi.org/10.3390/su15043324>

PATIL, S., BRENNAN, M. A., MASON, S., & BRENNAN, C. S. (2017). Investigation of the combination of legumes and cereals in the development of extrudate snacks and its effect on physico-chemical properties and in vitro starch digestion. *Journal of Food & Nutrition Research*, 56(1).

RAJNINCOVÁ, D., SPALEKOVÁ, A., GÁLOVÁ, Z., & ROMANAVÁ, K. (2019). The protein profile of cereals, pseudocereals and legumes. *Journal of Food Science and Technology*, 7, 49-53. <https://doi.org/10.1007/s11483-019-01224-4>

RAMÍREZ-RODRIGUES, M. M., ESTRADA-BERISTAIN, C., METRI-OJEDA, J., PÉREZ-ALVA, A., & BAIGTS-ALLENDE, D. K. (2021). *Spirulina platensis* protein as sustainable ingredient for nutritional food products development. *Sustainability*, 13(12), 6849. <https://doi.org/10.3390/su13126849>

RANA, S., KAPOOR, S., BALA, M., SURASANI, V. K. R., AGARWAL, A., & THAKUR, M. (2024). Optimization and characterization of tomato seed protein isolate: A sustainable source of functional protein. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-02077-2>

SAMARAKOON, K., & JEON, Y. J. (2012). Bio-functionalities of proteins derived from marine algae—A review. *Food Research International*, 48(2), 948–960. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.03.013>

SEMBA, R. D., RAMSING, R., RAHMAN, N., KRAEMER, K., & BLOEM, M. W. (2021). Legumes as a sustainable source of protein in human diets. *Global Food Security*, 28, 100520. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100520>

SHIRAHIGUE, L. D., & Ceccato-Antonini, S. R. (2020). Agro-industrial wastes as sources of bioactive compounds for food and fermentation industries. *Ciência Rural*, 50. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200492>

SINGH, M., et al. (2021). *Plant-based* meat analogue (PBMA) as a sustainable food: A concise review. *European Food Research and Technology*, 247(11), 2499–2526. <https://doi.org/10.1007/s11483-021-01585-w>

SOUZA, J. R. (2022). Fungal proteins as alternatives to animal proteins: Potential applications in food. *Food Science International Journal*, 34(3), 45–55.

TANGYU, M., et al. (2019). Fermentation of *plant-based* milk alternatives for improved flavour and nutritional value. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(23), 9263-9275. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10181-9>

TULLO, E., FINZI, A., & GUARINO, M. (2019). Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science of the Total Environment*, 650, 2751-2760. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.289>

TWINE, R. (2021). Emissions from animal agriculture—16.5% is the new minimum figure. *Sustainability*, 13(11), 6276. <https://doi.org/10.3390/su13116276>

URSU, A. V., MARCATI, A., SAYD, T., SANTE-LHOUTELLIER, V., DJELVEH, G., & MICHAUD, P. (2014). Extraction, fractionation, and functional properties of proteins from the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 157, 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.071>

VENDRUSCOLO, R. G., DEPRÁ, M. C., PINHEIRO, P. N., FURLAN, V. J. M., BARIN, J. S., CICHOSKI, A. J., ... & WAGNER, R. (2022). Food potential of *Scenedesmus obliquus* biomasses obtained from photosynthetic cultivations associated with carbon dioxide mitigation. *Food Research International*, 160, 111590. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111590>

VENDRUSCOLO, R. G., FAGUNDES, M. B., JACOB-LOPES, E., & WAGNER, R. (2019). Analytical strategies for using gas chromatography to control and optimize microalgae bioprocessing. *Current Opinion in Food Science*, 25, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.02.008>

VENDRUSCOLO, R. G., FERNANDES, A. S., FAGUNDES, M. B., ZEPKA, L. Q., DE MENEZES, C. R., JACOB-LOPES, E., & WAGNER, R. (2021). Development of a new method for simultaneous extraction of chlorophylls and carotenoids from microalgal biomass. *Journal of Applied Phycology*, 33, 1987–1997. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02470-8>

WANG, B., SHI, Y., LU, H., & CHEN, Q. (2023). A critical review of fungal proteins: Emerging preparation technology, active efficacy and food application. *Trends in Food Science & Technology*, 104178. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104178>

WANG, Y., LI, X., ZHANG, L., & LIU, Z. (2023). Mycoproteins: A sustainable solution for food security and environmental challenges. *Food Research International*, 170, 112953. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112953>

WANKENNE, M. (2020). Alimentos *plant-based* vs. dieta *plant-based*. *Revista Food Ingredients Brasil*, 48, 1–20.

WEN, X., et al. (2023). Frequency of infant egg consumption and risk of maternal-reported egg allergy at 6 years. *The Journal of Nutrition*, 153(1), 364-372. <https://doi.org/10.1093/jn/nxz271>

WILLIAMSON, E., ROSS, I. L., WALL, B. T., & HANKAMER, B. (2024). Microalgae: Potential novel protein for sustainable human nutrition. *Trends in Plant Science*, 29(3), 370-382. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.01.003>

WONGKANYA, R., CHUYSINUAN, P., PENGSAK, C., TECHASAKUL, S., LIRDPRAPAMONGKOL, K., SVASTI, J., & NOOEAD, P. (2017). Eletrofiação de nanofibras isoladas de alginato/proteína de soja e suas características de liberação para aplicações biomédicas. *Journal of Science: Dispositivos de Materiais Avançados*, 2(3), 309-316.

WOOD, P., & TAVAN, M. (2022). A review of the alternative protein industry. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100869. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100869>

YANG, S., XU, H., CHEN, J. H., LIU, B., & CHENG, K. W. (2024). Microalgae as a sustainable protein source: Key issues related to their production, application, and the way forward. *Food and Bioprocess Technology*, 17(8), 1-33. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-02857-5>

ZHANG, T., WANG, H., & MA, L. (2024). Advances in fungal proteins for meat analogs: Textural and nutritional perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 135, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.05.010>

Autores

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

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

CAPÍTULO 3

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. Consequentemente, 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 relacionadas 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 ciclooxigenase, 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 à 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).

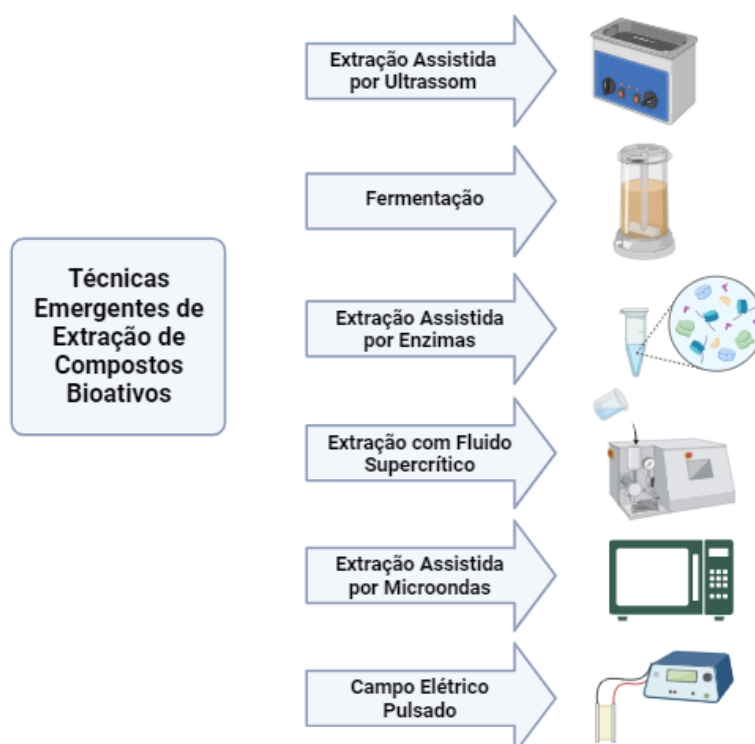


Figura 1. Tecnologias emergentes empregadas na extração de compostos bioativos de resíduos de origem vegetal.

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., BOZINOU, 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., BRATOVIC, 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., & Anandharamakrishnan, 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

CAPÍTULO 4

Novas abordagens para degradação de microplásticos com ênfase nos processos biológicos

Luís Felipe Oliva dos Santos, Thaís Marques Uber, Vinícius Mateus Salvatori Cheute, José Rivaldo dos Santos Filho, Rúbia Carvalho Gomes Corrêa, Cristina Giatti Marques de Souza, Rafael Castoldi, Adelar Bracht, Rosane Marina Peralta

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-21-3.c4>

Resumo

Plásticos são essenciais para a sociedade moderna, com aplicações em diferentes áreas incluindo embalagens de alimentos, aparelhos médicos, eletrônicos, produtos de consumo etc. Embora os benefícios dos plásticos sejam inquestionáveis, a má gestão e o descarte inadequado de resíduos plásticos estão aumentando a poluição por plásticos em todo o mundo. O acúmulo de resíduos plásticos em ambientes naturais está ameaçando tanto a saúde animal (por exemplo, por ingestão, sufocamento e emaranhamento) quanto a humana (por exemplo, limitando os meios de subsistência, afetando a segurança e a qualidade dos alimentos, fornecendo habitats adequados para doenças zoonóticas), ao mesmo tempo em que impõe uma pressão econômica crescente para superar perdas no turismo, pesca e habitats. O problema torna-se maior porque os resíduos plásticos são de difícil degradação em ambientes abertos devido à sua composição polimérica resiliente. Em vez disso, eles sofrem deterioração e fragmentação em microplásticos e nanoplásticos por processos físico-químicos. Esses pequenos detritos plásticos não conhecem fronteiras e podem ser facilmente transportados e até mesmo carregar uma série de produtos químicos perigosos e patógenos para ambientes variados, afetando potencialmente a biota em diferentes sistemas biológicos e, consequentemente, ameaçando os ecossistemas. Esta revisão pretende fornecer uma visão geral ampla sobre os últimos avanços tecnológicos e biotecnológicos que podem abrir caminho para uma remediação ambiental eficaz e eficiente de microplásticos, e abordar criticamente os principais desafios e potenciais soluções para superá-los.

Palavras-chave: Biodegradação; Processos biológicos; Processos enzimáticos; Remediação, Resíduos plásticos

1. INTRODUÇÃO

A produção global de plásticos ultrapassa 300 milhões de toneladas por ano e a contaminação ambiental causada por eles é um dos principais problemas que afetam a sociedade (GESAMP, 2015; EFSA, 2016; KOELMANS et al., 2017; LUSHER et al., 2017; EKANAYAKA et al., 2022). O problema ambiental causado pelos plásticos torna-se um problema de saúde pública graças à fragmentação dos plásticos descartados inadequadamente graças à qual são gerados resíduos mínimos desses materiais (microplásticos-MPs, mesoplásticos-MePs e pellets plásticos), além da liberação intencional em produtos como esfoliantes faciais e produtos de higiene pessoal. Essas partículas são tão pequenas que podem ser encontradas em praticamente todos os ambientes, desde oceanos a ambientes terrestres, sendo incorporadas aos animais marinhos e terrestres (KARAMI et al., 2018; SAPEA, 2019; ZHANG et al., 2018; DE-LA-TORRE et al., 2023).

Os MPs, MePs e pellets plásticos podem interagir com poluentes orgânicos persistentes, absorvendo uma ampla quantidade de compostos bioacumulativos e tóxicos, acarretando influências complexas e prejudiciais aos organismos. Além da própria toxicidade biológica, pode ocorrer deposição dos MPs nas vias aéreas e outros tecidos humanos e animais, o que pode levá-los a desempenhar papel de vetores de poluentes com capacidade significativamente aprimorada com o passar do tempo (KARAMI et al., 2016; QIN et al. 2021; LAN et al. 2021; ISLAM et al., 2023). É de suma importância desenvolver estratégias eficazes para a minimização dos riscos associados à presença desses micropoluentes no meio ambiente, protegendo, assim, a saúde dos ecossistemas e dos seres vivos. (WANG et al., 2022; LIU et al., 2019).

Técnicas de biotratamento para a remoção de MPs, MePs e pellets plásticos vêm sendo desenvolvidas, como abordagens empregando fitorremediação, micorremediação, organismos filtradores e bactérias (MILOLOŽA et al., 2022). Os fungos são conhecidos por sua habilidade em produzir e secretar enzimas (enzimas hidrolíticas tais como lipases e esterases e enzimas oxidativas tais como as peroxidases e oxidases), capazes de degradar uma variedade de poluentes complexos. Eles podem atuar sobre os polímeros dos plásticos, degradando-os em fragmentos menores que podem ser mais facilmente assimilados e mineralizados. Essa é uma estratégia considerada

promissora para remoção e tratamento dos plásticos (MILOLOŽA et al., 2022; KASMURI et al., 2022). Processos de oxidação avançada também são amplamente aplicados, como a oxidação de Fenton (ORTIZ et al., 2022). Nessa reação, são utilizados íons de ferro (Fe^{2+} ou Fe^{3+}) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para formar radicais livres altamente reativos, capazes de oxidar e degradar poluentes. Além disso, essa reação pode ser realizada de forma biotecnológica, empregando enzimas capazes de sintetizar o peróxido de hidrogênio necessário. Por exemplo, a metabolização da glicose pela glicose oxidase (GOx) ou o uso de álcool oxidases podem gerar o peróxido de hidrogênio necessário. Neste caso, o procedimento denomina-se reação de Bio-Fenton. Essa abordagem oferece a vantagem de reduzir custos e riscos durante a execução do processo (ESKANDARIAN et al., 2014; KAHOUH et al., 2018). Neste capítulo do livro visamos analisar e fazer um levantamento de técnicas físicas, químicas e biológicas para a eliminação de plásticos e microplásticos do ambiente. Essas técnicas visam reduzir os impactos desses elementos sobre os ecossistemas, sendo essenciais para a manutenção da qualidade de vida e do equilíbrio ecossistêmico.

2. Metodologia

Visando a elaboração de um referencial teórico atualizado e com alta qualidade, foi realizada uma busca de artigos científicos e livros nas bases de dados: Pubmed, Web of Science, Google Scholar, e Periódicos Capes. Para tanto, foram utilizados os termos “Biorremediação”, “Microplásticos”, “Biodegradação” e “Degradação microplásticos” (em inglês “Bioremediation”, “Microplastics”, “Biodegradation” e “Degradation microplastics” respectivamente). Com base na pesquisa, foram selecionados apenas os documentos que contemplavam os objetivos propostos pelo presente trabalho, selecionando-se preferencialmente os documentos publicados entre os anos de 2019 e 2024.

3. Plásticos, microplásticos e meio ambiente

Plásticos são commodities de extrema importância devido às suas amplas aplicações em nossas rotinas, possuindo propriedades únicas. Os plásticos apresentam grande diversidade, são baratos e possuem considerável resistência, força e capacidade de isolamento térmico e elétrico (RU et al., 2020). Plásticos normalmente são compostos sintéticos ou semi-sintéticos orgânicos de alta massa molecular e polímeros com extensas cadeias (SHAH et al., 2008). Os materiais plásticos estão presentes em muitos locais e produtos de nossa rotina diária onde suas características são consideradas vitais para a sociedade moderna. Vários avanços tecnológicos, inclusive na área médica, resultaram em um drástico aumento de sua produção pelas indústrias (ROAGER & SONNNCHEIN, 2019). A produção de plásticos era de 360 milhões de toneladas em 2018, elevou-se para 370 milhões de toneladas em 2019 e 390 milhões de toneladas em 2021, havendo projeções de 450 milhões de toneladas para 2025 e 1.480 milhões de toneladas para 2050 (SHARMA et al., 2020; KUMAR et al., 2021; MADDELA et al., 2023).

O termo microplásticos (MPs) foi proposto por Thompson e colaboradores em 2004. Os MPs são polímeros com diâmetros de 5 mm ou menos enquanto os nanoplásticos (NPs) possuem diâmetros inferiores a 1 nm e têm ganhado atenções na atualidade devido ao seu potencial dano aos ecossistemas (GANESH-KUMAR et al., 2020; ALFARO-NÚÑES et al., 2021). A Figura 1 mostra a classificação dos plásticos, com base nos seus tamanhos (WU et al., 2019).

Megaplástico > 500 mm
Macroplástico 500–50 mm
Mesoplástico 50–5 mm
Microplástico 5–0.001 mm
Nanoplástico < 0.001 mm

Figura 1. A classificação de plásticos baseada nos seus tamanhos.

Os MPs chegam ao ambiente através de ações antropogênicas diretas e indiretas: agricultura, empacotamento, aplicações cosméticas, processos industriais e descarte de resíduos, conforme ilustrado pela Figura 2. (SHEN et al., 2022; HUANG et al., 2020) Foram observados microplásticos associados com químicos tóxicos e metais pesados nas águas, eventualmente adentrando as cadeias alimentares e populações animais, ocasionando diversos riscos à saúde (GONG et al., 2018).

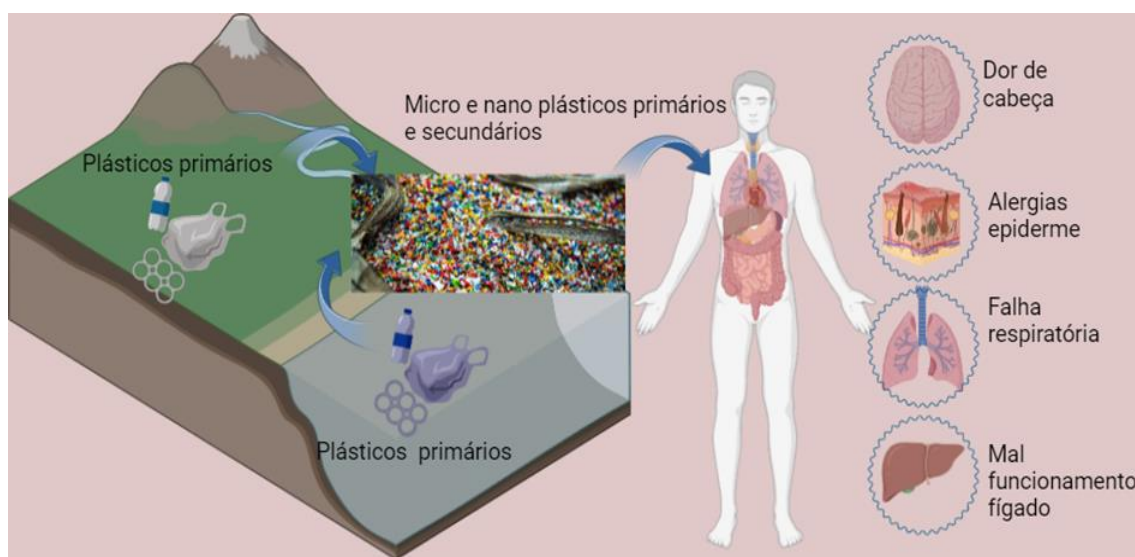


Figura 2. Origem de alguns micros e nanoplásticos e seus efeitos em humanos

Com base na produção atual e em dados sobre o manejo de descarte, estima-se em 12.000 toneladas a quantidade de resíduos plásticos que estará acumulada em aterros sanitários e no meio ambiente em 2050 (GEYER et al., 2017).

As principais características físico-químicas dos mais abundantes encontrados na natureza são listadas na Tabela 1. A poluição por esses materiais tem se tornado uma das maiores preocupações devido sua ameaça à sustentabilidade ambiental. Por causa de sua natureza recalcitrante, os plásticos sintéticos persistem no ambiente por centenas ou milhares de anos após o descarte, sendo assim, grandes contribuintes para a poluição ambiental (GEWERT et al., 2015, LEE et al., 2021).

Tabela 1. Microplásticos mais abundantes e suas principais características físico-químicas.

Plásticos	Principais características físico-químicas
Polietileno (PE)	São estruturados em uma cadeia de carbono larga e linear de poli-oleifina, os microplásticos desse grupo de plástico são categorizados em dois grupos com base em sua densidade, os polietilenos de baixa densidade (LDPE) e polietilenos de alta densidade (HDPE) e suas degradações se dão por duas fases a de despolimerização e mineralização do material (THAKUR et al., 2023).
Polietileno tereftalato (PET)	Consistem em uma estrutura amorfa semi-cristalina em um polímero linear de unidades repetidas de etileno glicol ou ácido tereftálico. Enzimas que atuam sobre são principalmente MHetase e PETase; alguns trabalhos apresentaram até 97% de degradação de PET (YOSHIDA et al., 2016; ALI et al., 2021a).
Poliestireno (PS)	Polímero aromático sintético de alto peso molecular feito de monômeros de estireno (SHEIKH et al., 2013). Sua biodegradação foi relatada por bactérias, algas e fungos, e diversos microrganismos têm sido reportados como degradadores (MUHONJA et al., 2018; ALI et al., 2021a)
Polipropileno (PP)	Apresentam uma cadeia direta de hidrocarbonetos contendo um átomo de carbono no anel principal da estrutura. São menos estáveis que o PE, mas possuem uma superfície hidrofóbica que os tornam mais recalcitrantes (KHOIRONI et al., 2020; OTHMAN et al., 2021). Em sua degradação ligações C-C e C-H são oxidadas por enzimas secretadas por microrganismos, que quebram longas cadeias em pequenos hidrocarbonetos metabolizados pelos microrganismos a CO ₂ e H ₂ O (ZHANG et al., 2022)

4. Origem dos microplásticos

De acordo com sua origem, os microplásticos podem ser classificados em duas categorias principais (GERRITSE et al., 2020; KUMARI et al., 2022): primários e secundários.

4.1. Microplásticos primários

São partículas de plástico fabricadas já em tamanho microscópico para uso em diversos produtos, como esfoliantes cosméticos, produtos de higiene, tintas, abrasivos industriais e microesferas em medicamentos. Outra fonte importante de microplásticos primários são os pellets de plástico, pequenas resinas de plásticos usadas como matéria-prima na fabricação de produtos plásticos.

4.2. Microplásticos secundários

São resultantes da degradação de plásticos maiores, como garrafas, sacolas, redes de pesca e outros resíduos plásticos descartados incorretamente. Essa degradação pode ocorrer devido à exposição a agentes ambientais como radiação ultravioleta (UV), mudanças de temperatura, abrasão física ou ação de micro-organismos.

5. Perigos para a saúde humana e ambiental

Os microplásticos têm se tornado uma preocupação crescente devido à sua onipresença em ambientes terrestres e aquáticos, bem como ao seu potencial impacto sobre a saúde humana e ecossistemas.

5.1. Impacto ambiental e sobre a saúde animal

A presença de microplásticos em ecossistemas marinhos e terrestres é alarmante. Eles são consumidos por diversas espécies, desde o plâncton até peixes e aves, o que pode levar à sua entrada na cadeia alimentar (SANTILLO et al., 2017). Além de causar bloqueios físicos no trato digestivo dos organismos, os microplásticos podem carrear substâncias tóxicas, como aditivos plásticos e poluentes orgânicos persistentes (POPs), aumentando o risco de toxicidade e efeitos biológicos adversos (CARUSO et al., 2019; CHEN et al., 2019; HAHLADAKIS, 2020, HAHLADAKIS et al., 2018; MENÉNDEZ-PEDRIZA et al., 2020).

5.2. Impacto sobre a saúde humana

Embora os estudos sobre os efeitos dos microplásticos na saúde humana ainda sejam preliminares, parece certo que há algumas preocupações legítimas. Humanos podem ser expostos aos microplásticos através da ingestão de alimentos contaminados, como peixes e frutos-do-mar, da água potável e até mesmo do ar, uma vez que as partículas de microplásticos podem ser encontradas em poeiras domésticas. Os potenciais riscos incluem efeitos tóxicos devido à presença de aditivos químicos ou poluentes adsorvidos nos microplásticos. Pode-se esperar também reações inflamatórias no caso dos microplásticos serem inalados ou ingeridos em grandes quantidades. Sobretudo a bioacumulação, ou seja, o acúmulo de moléculas tóxicas no organismo, pode aumentar os riscos de doenças crônicas ao longo do tempo (YEE et al., 2021; PRATA et al., 2020; KOELMANS et al., 2019; WRIGHT & KELLY 2017; OLIVEIRA et al., 2019; QIAO et al., 2019).

6. Estratégias atuais de manejo de plásticos

As estratégias atuais de manejo dos resíduos plásticos incluem o depósito em aterros sanitários. Isto, no entanto requer grandes superfícies, além de facilitar a produção de MPs através da foto-oxidação. (ALI et al., 2021 a,b). Outra estratégia, a incineração dos resíduos plásticos é efetiva, porém pode gerar resíduos tóxicos como dioxinas e monóxido de carbono (RU et al., 2020; BARDAJÍ et al., 2020). A reciclagem mecânica não tem tido plena aceitação devido à redução de qualidade e performance dos produtos (TSUCHIMOTO & KAJIKAWA 2022). A biodegradação, por outro lado, é considerada o enfrentamento mais “verde” e sustentável frente a essa problemática (QUAN et al., 2023). A biodegradação de plásticos envolve principalmente a ação de enzimas, que são secretadas pelos microrganismos e que facilitam a conversão de resíduos plásticos em moléculas menores ou monômeros (BAHL et al., 2021). Porém, muitos desafios ainda estão presentes no panorama atual da biodegradação de plásticos como a falta de padronização de um método para garantir as habilidades de degradação por microrganismos e enzimas assim como os efeitos de aditivos sintéticos presentes nos materiais plásticos comerciais alvos da biodegradação. A isto deve-se acrescentar a dedicação

limitada que se tem observado no tocante à descoberta e caracterização das enzimas degradadoras de plásticos (THEW et al., 2023).

7. Novas técnicas de degradação dos microplásticos

Vários métodos estão sendo investigados para degradar os microplásticos, minimizando seus impactos no meio ambiente. Eles podem ser divididos em três categorias principais: métodos físicos, químicos e biológicos.

Tabela 2. Principais métodos físicos e químicos utilizados na degradação dos microplásticos (DIMASSI et al., 2022; XIANG et al., 2023; GUO et al., 2024).

Métodos Físicos	Descrição
Fragmentação	Uso de força mecânica para quebrar plásticos em partículas menores.
Filtração	A água contaminada é passada através de uma malha ou filtro para remover partículas de microplásticos.
Ultrassom	Utilização de ondas sonoras de alta frequência para gerar cavitação e quebrar partículas de microplásticos em tamanhos menores.
Processos Térmicos	Aplicação de calor para derreter ou queimar plásticos, podendo fragmentá-los em tamanhos menores ou convertê-los em gás.
Combustão	Queima de plásticos em um ambiente controlado para reduzir partículas e gerar energia, embora possa resultar em emissões tóxicas.

7.1. Métodos físicos e químicos

A degradação física de microplásticos envolve o uso de métodos que fragmentam ou quebram os plásticos em partículas menores, ou facilitam sua remoção do ambiente. Embora não sejam tão eficazes em decompor completamente os plásticos em suas formas mais simples, essas técnicas podem ser combinadas com abordagens químicas ou biológicas para uma maior eficiência. De fato, as técnicas físicas geralmente são usadas em conjunto com métodos químicos ou biológicos para otimizar a degradação dos microplásticos, visando reduzir seu impacto ambiental. A degradação de microplásticos é um

desafio ambiental crescente, e várias técnicas químicas modernas estão sendo desenvolvidas para lidar com esses poluentes. Essas técnicas são promissoras, mas muitas ainda estão em fase experimental, e seus impactos ambientais e econômicos estão sendo avaliados para aplicações em larga escala. As Tabelas 2 e 3 apresentam os principais métodos físicos e químicos, respectivamente, atualmente considerados como promissores para a degradação dos microplásticos.

Tabela 3. Principais métodos químicos utilizados na degradação de microplásticos (GUO et al., 2024).

Métodos Químicos	Descrição
Hidrólise	Processo onde água é utilizada para quebrar ligações químicas dos polímeros plásticos, resultando em moléculas menores.
Oxidação química avançada: Reação de Fenton, Foto-Fenton, oxidação eletroquímica, etc	Uso de agentes oxidantes para quebrar as ligações químicas dos plásticos, transformando-os em moléculas menos poluentes.
Pirólise	Processo térmico onde plásticos são decompostos em temperaturas elevadas na ausência de oxigênio, resultando em óleo e gás.
Desorção química	Processos químicos que eliminam poluentes adsorvidos em microplásticos, contribuindo para a sua degradação.
Luz UV	A radiação UV provoca a quebra das ligações químicas nos microplásticos, resultando em sua fragmentação. A exposição prolongada à luz solar ou lâmpadas UV pode acelerar esse processo. Quando associada a catalisadores (como TiO ₂), a radiação UV não apenas fragmenta, mas também ajuda a oxidar os microplásticos.

7.2. Métodos biológicos (biodegradação)

As técnicas biológicas para a degradação de microplásticos envolvem o uso de organismos vivos ou enzimas capazes de quebrar, ou metabolizar os polímeros plásticos em compostos menores e menos prejudiciais ao meio ambiente (BAHL et al., 2021; ANAND et al., 2023). Técnicas biológicas são

promissoras, mas ainda enfrentam desafios relacionados à aplicação em larga escala e ao tempo necessário para que os plásticos sejam completamente degradados. A combinação de métodos biológicos com técnicas químicas ou físicas pode ser a chave para melhorar a eficiência desses processos. Essas abordagens estão em constante evolução, e a seguir descreveremos algumas das mais promissoras e modernas.

7.2.1. Degradação por microrganismos

Nos últimos anos muitas pesquisas têm sido realizadas no campo de biodegradação de plásticos. Os decompositores, microrganismos e comunidades microbianas de aterros sanitários, solo e de oceanos, são os principais escolhidos quando da identificação de potenciais organismos degradadores de plásticos (FACCIA et al., 2021; LIU et al., 2022a). Devido à alta contaminação dos oceanos por plásticos, algumas algas têm demonstrado capacidade em degradar plásticos (HADIYANTO et al., 2022), microrganismos fotossintetizantes (BARONE et al., 2024), assim como insetos e moluscos, apresentam capacidade de digerir plásticos (LIU et al., 2022b; SONG et al., 2020). A degradação de diferentes polímeros (polietileno, polipropileno e poliestireno) por bactérias e fungos de ambientes naturais tem sido investigados, mas a maioria dos estudos têm sido realizados sob condições laboratoriais (WU et al., 2023).

A biodegradação é a conversão bioquímica de compostos por microrganismos (ZHENG et al., 2005) sendo essa comumente considerada uma aproximação mais viável, tanto ambientalmente quanto economicamente, quando comparada a degradação física ou química (QUAN et al., 2023). Bactérias, fungos e outros micróbios podem facilmente colonizar e formar biofilmes na superfície de detritos plásticos o que é chamado de “Plastisfera” (ZETTLER et al., 2013; THAKUR et al., 2023).

Os processos de biodegradação dos plásticos com microrganismos envolvem a formação de biofilmes ou áreas de contato na superfície do polímero, seguido pela secreção de enzimas extracelulares para a fragmentação em partículas menores, muitas vezes transformando polímeros em monômeros.

Partículas menores, por sua vez, podem ser consumidas pelos microrganismos e metabolizadas em CO₂ e H₂O (MOHANAN et al., 2020; SINGH JADAUN et al., 2022; THEW et al., 2023; LAU et al., 2009). Fungos são os microrganismos mais comumente encontrados na plastisfera (De TENDER et al., 2017). No caso dos plásticos como substrato, a estrutura das comunidades fúngicas nos microplásticos (poliestireno e detritos de polietileno) é diferente da de seus substratos naturais como madeira e água (KETTNER et al., 2017). A biodegradação desses é principalmente afetada pelas características dos polímeros e de diversos fatores ambientais. As propriedades físico-químicas dos plásticos (cristalinidade, afinidade para com a água, peso molecular e dureza) são determinantes nos processos de biodegradação (THEW et al., 2023).

A maioria das espécies capazes de biodegradar os plásticos são bactérias (GAMBARINI et al., 2021). *Bacillus* sp. (AUTA et al., 2018); *Rhodococcus* sp. (AUTA et al., 2018) e *Zalerion maritimum* (PAÇO et al., 2017) possuem capacidade de usar materiais poliméricos como fonte principal de carbono em meio de cultura mínimo, consequentemente contribuindo para a redução do peso seco dos polímeros e induzindo modificações físico-químicas (PARK & CHANG, 2019). O levantamento feito por Gambarini et al. (2021), revelou que *Bacillus pumilus* é capaz de degradar 14 diferentes tipos de plásticos. Em termos mais amplos, 286 espécies de bactérias apresentaram capacidade de degradar materiais plásticos sendo essas pertencentes a apenas 5 filos dos 31 totais na base de dados do National Center for Biotechnology Information (NCBI). Estes filos são Proteobacteria (30,4%); Actinobacteria (20,3%), Firmicutes (13,8%), Bacteroidetes (0,69%) e Cyanobacteria (0,46%). Alguns plásticos possuem em sua estrutura aditivos que podem inibir o crescimento microbiano (WANG et al., 2015), o que pode causar uma visão subestimada do real potencial dos microrganismos para a degradação de polímeros plásticos puros (GAMBARINI et al., 2021).

Os fungos filamentosos especialmente os gêneros *Aspergillus* spp. e *Penicillium* spp., são as cepas fúngicas mais documentadas como capazes de degradar polímeros plásticos (GAMBARINI et al., 2021). Sua estrutura física, o chamado micélio, tem a capacidade de penetrar a superfície dos plásticos, se estendendo e espalhando no substrato para absorver nutrientes, permitindo ao

fungo fixar-se com firmeza na superfície (SÁNCHEZ, 2020). Os fungos também secretam hidrofobinas que podem amontoar-se, formando membranas de proteínas anfífilas que reforçam a hidrofiliabilidade da superfície do plástico facilitando a própria colonização da superfície (CICATIELLO et al., 2020; STANZIONE et al., 2022).

As enzimas extracelulares produzidas por fungos, como as peroxidases (manganês peroxidases, lignina peroxidases, peroxidases versáteis), lacases, lipases cutinases (SAHU et al., 2023) e proteases (SRIKANTH et al., 2022), também têm importante função na degradação de plásticos, despolimerizando materiais poliméricos em fragmentos de menor peso molecular. As cutinases (EC 3.1.1.74) são esterases que pertencem à família das hidrolases α/β . Investigações recentes têm evidenciado que as cutinases são enzimas multifuncionais que atuam sobre ésteres solúveis, triglicerídeos insolúveis e tereftalato de polietileno (LIU et al., 2022c). Apesar do estudo inicial ter descoberto que elas podem quebrar a cutina em monômeros de ácidos graxos, isso tem o potencial de torná-las ferramentas importantes para degradação, reciclagem e melhoria do plástico (NIKOLAIVITS et al., 2018). As lacases (EC 1.10.3.2) são uma classe de enzimas conhecidas como oxidases multicobre (BILAL et al., 2019) que utilizam oxigênio como aceptor de elétrons para oxidar compostos fenólicos e não fenólicos. Neste processo elas reduzem o oxigênio molecular a água (SURWASE et al., 2016). De acordo com Tournier et al., (2023) análises demonstram a capacidade das lacases em atuar sobre a estrutura do polietileno e estudos conduzidos por Santacruz-Juárez et al. (2021) demonstram que as oxidases em geral (e.g., lacases) são cruciais para garantir a quebra do poluente (polietileno) com produção de H_2O_2 . O fungo *Cochliobolus* sp., degradou PVC graças às suas lacases (SUMATHI et al., 2016). Bjerkandera adusta TBB-03 apresentou habilidade de degradar um polietileno de alta densidade (HDPE) num substrato ligninocelulósico para a produção de lacase (KANG et al., 2019). As peroxidases (EC 1.11.1) são enzimas universais que catalisam reações redox envolvendo a redução do peróxido e oxidação de substratos que variam de uma classe de peroxidases para a outra. Essas enzimas quando não provenientes de animais são divididas em três classes, a primeira compreende catalase-peroxidases, ascorbato peroxidase, e peroxidase

do citocromo c. A classe 2 engloba as peroxidases detectadas apenas em fungos, sendo essas capazes de degradar lignina. As enzimas da classe 3, finalmente, são encontradas apenas em plantas (TOURNIER et al., 2023). Khatoon et al. (2019) avaliaram a capacidade da lignina peroxidase (EC 1.11.1.14) de *Phanerochaete chrysosporium* na degradação de polímeros sintéticos e concluíram que houve modificações na estrutura do PVC. As lipases (EC 3.1.1.3) são enzimas extracelulares que normalmente clivam e hidrolisam ligações ésteres em óleos e gorduras, podendo “atacar” ligações éster em alguns poliésteres alifáticos possibilitando a despolimerização de tais materiais. Em geral, porém, não são consideradas globalmente como PET hidrolases, mas sim como enzimas modificadoras de superfície (TOURNIER et al., 2023). De acordo com levantamento feito por Temporiti et al. (2022), algumas lipases fúngicas já se revelaram capazes de degradar polietileno tereftalato (PET) e poliuretano (PUR).

Uma estratégia atraente de biorremediação consiste na combinação de diferentes espécies de microrganismos. Com suas diversas enzimas específicas pode-se aumentar a eficiência da degradação dos plásticos. Alguns microrganismos podem atacar as cadeias principais do polímero, por exemplo, enquanto outros transformam os subprodutos que foram gerados (AMOBONYE et al., 2021; CAI et al., 2023; WU et al., 2023). Algumas espécies fúngicas tem mostrado habilidade de absorver nutrientes dos polímeros plásticos, como *Pleurotus abalones*, *P. ostreatus*, *Agaricus bisporus* devido à secreção de enzimas como a lacase, possibilitando o uso de polietileno e poliestireno como fonte de carbono. Isto foi em parte deduzido da observação de que houve crescimento fúngico a partir da degradação do plástico (HOCK et al., 2019). *P. eryngii* e *Lentinula edodes*, demonstraram capacidade de degradar BPA (bisfenol A) e DEHP (ftalato de di-2-etilexila), através da secreção da enzima manganês peroxidase (HOCK et al., 2019). A capacidade de degradar polietileno verde e plásticos oxibiodegradáveis (D2W) sem tratamento físico prévio já foi observada com *P. ostreatus* (LUZ et al., 2013). De acordo com Gambarini et al. (2021), os fungos *Aspergillus fumigatus* e *Phanaerochaete chrysosporium* revelaram possuir capacidade de degradar, respectivamente, 11 e 10 diferentes tipos de plástico.

7.2.3. Larvas degradadoras de plásticos

Graças às bactérias simbióticas presentes em sus sistemas digestivos, algumas espécies de insetos têm demonstrado a capacidade de consumir e degradar plásticos. Exemplos incluem *Galleria mellonella* (larva da traça-da-cera), capaz de consumir polietileno, possivelmente degradando-o através de enzimas presentes em suas bactérias intestinais; *Zophobas morio* (superverme) e *Tenebrio molitor* (larva do besouro), que têm revelado capacidade de biodegradar o poliestireno em seus sistemas digestivos com a ajuda de suas comunidades bacterianas simbióticas; As bactérias encontradas no intestino desses insetos, portanto, desempenham um papel crucial na degradação dos plásticos. Algumas dessas bactérias podem ser isoladas e cultivadas para degradar plásticos em ambientes controlados (BILLEN et al., 2020; LUO et al., 2020; YIN et al., 2020; YANG et al., 2015; ZHANG et al., 2020).

7.2.4. Biorremediação assistida por plantas.

Embora não degradem plásticos diretamente, certas plantas podem ajudar na remoção de microplásticos do ambiente ao capturá-los no solo ou na água. Podem também, em alguns casos, facilitar sua degradação ao criar um ambiente favorável para a colonização de microrganismos degradadores de plástico. Há pesquisas em andamento para modificar geneticamente plantas (plantas transgênicas) para que produzam enzimas degradadoras de plásticos em suas raízes ou no solo circundante, o que poderia acelerar a degradação de microplásticos no ambiente (KUMARI et al., 2022).

8. Conclusão

Os microplásticos representam uma ameaça significativa ao meio ambiente e à saúde humana. Suas fontes são diversas, incluindo produtos de consumo e a degradação de resíduos plásticos maiores. As estratégias para mitigar os impactos dos microplásticos ainda estão em fase de pesquisa, com uma combinação de métodos físicos, químicos e biológicos sendo desenvolvidos para promover sua degradação. A conscientização sobre o uso de plásticos e a promoção de alternativas sustentáveis especialmente associadas à reciclagem

são igualmente cruciais para reduzir a produção e disseminação desses poluentes.

9. Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da CAPES, CNPq, Fundação Araucária, Universidade Estadual de Maringá e UNICESUMAR.

10. Referências

ALFARO-NÚÑEZ, Alonzo. et al. Microplastic pollution in seawater and marine organisms across the Tropical Eastern Pacific and Galápagos. *SCIENTIFIC REPORTS* 2021; 11(1): p. 6424. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85939-3>

ALI, Sameh S. et al. Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2021a; 780:146590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590>.

ALI, Sameh Samir. et al. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2021b; 771: p. 144719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144719>.

AMOBONYE, Ayodeji. et al. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2021; 759: 143536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>.

ANAND, Uttpal. et al. Biotechnological methods to remove microplastics: a review. *ENVIRONMENTAL CHEMISTRY LETTERS* 2023; 21(3): 1787–1810. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01552-4>.

AUTA, Helen Shnada. et al. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *MARINE POLLUTION BULLETIN* 2018; 127:15–21. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>.

BAHL, Shashi. et al. Biodegradation of plastics: A state of the art review. *MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS* 2021; 39:31–34. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.096>.

BARDAJÍ, Danae Kala Rodríguez. et al. A mini-review: current advances in polyethylene biodegradation. *WORLD JOURNAL OF MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY* 2020; 36(2):32. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-2808-5>.

BARONE, Giovanni Davide. et al. Harnessing photosynthetic microorganisms for enhanced bioremediation of microplastics: A comprehensive review.

ENVIRONMENTAL SCIENCE AND ECOTECHNOLOGY 2024; 20:100407.
<https://doi.org/10.1016/j.es.2024.100407>.

BILAL, Muhammad. et al. Hazardous contaminants in the environment and their laccase-assisted degradation – A review. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT 2019; 234: 253–264.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.001>.

BILLEN, Pieter. et al. Technological application potential of polyethylene and polystyrene biodegradation by macro-organisms such as mealworms and wax moth larvae. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 2020; 735: 139521.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139521>.

CAI, Zeming. et al. Biological degradation of plastics and microplastics: A recent perspective on associated mechanisms and influencing factors. MICROORGANISMS 2023; 11(7): 1661.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11071661>.

CARUSO, Gabriella. Microplastics as vectors of contaminants. MARINE POLLUTION BULLETIN 2019; 146:921–924.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.052>.

CHEN, Qiqing. et al. Marine microplastics bound dioxin-like chemicals: Model explanation and risk assessment. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS 2019; 364:82–90. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.032>.

CICATIELLO, Paola. et al. Spotlight on class i hydrophobins: their intriguing biochemical properties and industrial prospects. GRAND CHALLENGES IN FUNGAL BIOTECHNOLOGY 2020; 333–347. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29541-7_12.

DA LUZ, José Maria Rodrigues. et al. Degradation of Oxo-Biodegradable Plastic by *Pleurotus ostreatus*. PLoS ONE 2013; 8(8): p. e69386.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069386>.

DE TENDER, Caroline. et al. Temporal Dynamics of Bacterial and Fungal Colonization on Plastic Debris in the North Sea. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY 2017; 51(13): 7350–7360.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00697>.

DE-LA-TORRE, Gabriel Enrique. et al. Micro- and mesoplastic pollution along the coast of Peru. ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH 2023; 30(27): 71396–71408. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27707-6>.

DIMASSI, Sarra N. et al. Degradation-fragmentation of marine plastic waste and their environmental implications: A critical review. ARABIAN JOURNAL OF CHEMISTRY 2022; 15(11): 104262.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104262>.

EFSA. Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. EFSA JOURNAL 2016; 14(6).
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4501>.

EKANAYAKA, Anusha H. et al. A review of the fungi that degrade plastic. JOURNAL OF FUNGI 2022; 8(8): 772. <https://doi.org/10.3390/jof8080772>.

ESKANDARIAN, Mohammadreza. et al. Bio-Fenton process for Acid Blue 113 textile azo dye decolorization: characteristics and neural network modeling. DESALINATION AND WATER TREATMENT 2014; 52(25–27):4990–4998. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.810325>.

FACCIA, Paula A. et al. Degradability of poly(ether-urethanes) and poly(ether-urethane)/acrylic hybrids by bacterial consortia of soil. INTERNATIONAL BIODETERIORATION & BIODEGRADATION 2021; 160: 105205. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105205>.

GAMBARINI, Victor. et al. Phylogenetic Distribution of Plastic-Degrading Microorganisms. MSYSTEMS 2021; 6(1). <https://doi.org/10.1128/mSystems.01112-20>.

GANESH KUMAR A. et al. Review on plastic wastes in marine environment – Biodegradation and biotechnological solutions. MARINE POLLUTION BULLETIN 2020; 150. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110733>.

GERRITSE, Jan. et al. Fragmentation of plastic objects in a laboratory seawater microcosm. SCIENTIFIC REPORTS 2020; 10(1): 10945. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67927-1>.

GESAMP. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment (Kershaw, P. J., ed.). IMO/ FAO/UNESCO IOC/UNIDO/WMO/IAEA/ UN/UNEP/UNDP Joint group of experts on the scientific aspects of marine environmental protection. Reports and studies GESAMP 93:96. 2015

GEWERT, Berit. et al. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. ENVIRONMENTAL SCIENCE: PROCESSES & IMPACTS 2015; 17(9): 1513–1521. <https://doi.org/10.1039/C5EM00207A>.

GEYER, Roland. et al. Production, use, and fate of all plastics ever made. SCIENCE ADVANCES 2017; 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

GONG, Jixian. et al. Biodegradation of Microplastic Derived from Poly (ethylene terephthalate) with Bacterial Whole-Cell Biocatalysts. POLYMERS 2018; 10(12): 1326. <https://doi.org/10.3390/polym10121326>.

GUO, Shuli. et al. Microplastic, a possible trigger of landfill sulfate reduction process. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 2024; 906:167662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167662>.

HADIYANTO, Hadiyanto. et al. The effect of salinity on the interaction between microplastic polyethylene terephthalate (PET) and microalgae Spirulina sp. ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH 2022; 29(5): 7877–7887. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16286-z>.

HAHLADAKIS, John N. Delineating the global plastic marine litter challenge: clarifying the misconceptions. ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT 2020; 192(5): 267. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8202-9>.

HAHLADAKIS, John N. et al. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS 2018; 344:179–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>

HOCK, Ong. et al. The growth and laccase activity of edible mushrooms involved in plastics degradation. CURRENT TOPICS IN TOXICOLOGY 2019; 15: p. 57-62.

https://www.researchgate.net/publication/335145713_The_growth_and_laccase_activity_of_edible_mushrooms_involved_in_plastics_degradation (acessado em 29 de setembro de 2024)

HUANG, Yi. et al. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. ENVIRONMENTAL POLLUTION 2020; 260: 114096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>.

ISLAM, Mohammad S. et al How microplastics are transported and deposited in realistic upper airways? PHYSICS OF FLUIDS 2023; 35(6): 063319. <https://doi.org/10.1063/5.0150703>.

KAHOUSH, May. et al. Bio-Fenton and Bio-electro-Fenton as sustainable methods for degrading organic pollutants in wastewater. PROCESS BIOCHEMISTRY 2018; 64: p. 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.10.003>.

KANG, Bo Ram. et al. Accelerating the biodegradation of high-density polyethylene (HDPE) using bjerkandera adusta TBB-03 and lignocellulose substrates. MICROORGANISMS 2019; 7(9): 304. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7090304>.

KARAMI, Ali. et al. Microplastic and mesoplastic contamination in canned sardines and sprats. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 2018; 612: 1380–1386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.005>.

KARAMI, Ali. et al. Virgin microplastics cause toxicity and modulate the impacts of phenanthrene on biomarker responses in African catfish (Clarias gariepinus). ENVIRONMENTAL RESEARCH 2016; 151: 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.024>.

KASMURI, Norhafezah. et al. Occurrence, impact, toxicity, and degradation methods of microplastics in environment—a review. ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH 2022; 29(21): 30820–30836. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18268-7>.

KETTNER, Marie Therese. et al. Microplastics alter composition of fungal communities in aquatic ecosystems. ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY 2017. 19(11): 4447–4459. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13891>.

KHATOON, Nazia. et al. Lignin peroxidase isoenzyme: a novel approach to biodegrade the toxic synthetic polymer waste. *ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY* 2019; 40(11): 1366–1375. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1422550>.

KHOIRONI, Adian. et al. Evaluation of polypropylene plastic degradation and microplastic identification in sediments at Tambak Lorok coastal area, Semarang, Indonesia. *MARINE POLLUTION BULLETIN* 2020; 151: p. 110868. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110868>

KOELMANS, Albert A. et al. Risks of plastic debris: Unravelling fact, opinion, perception, and belief. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2017; 51(20): p. 11513–11519. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02219>.

KOELMANS, B.; PAHL, S.; BACKHAUS, T.; BESSA, F.; VAN CALSTER, G.; CONTZEN, N.; CRONIN, R.; GALLOWAY, T.; HART, A.; HENDERSON, L. A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society; SAPEA: Berlin, Germany, 2019.

KUMAR, Rakesh. et al. Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions. *SUSTAINABILITY* 2021; 13(17):9963. <https://doi.org/10.3390/su13179963>.

KUMARI, Arpna. et al. Microplastic pollution: an emerging threat to terrestrial plants and insights into its remediation strategies. *PLANTS* 2022; 11(3): 340. <https://doi.org/10.3390/plants11030340>.

LAN, Tao. et al. A comparative study on the adsorption behavior of pesticides by pristine and aged microplastics from agricultural polyethylene soil films. *ECOTOXICOLOGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY* 2021; 209: p. 111781. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111781>.

LAU, A.K. et al. Degradation of greenhouse twines derived from natural fibers and biodegradable polymer during composting. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT* 2009; 90(1): 668–671. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.03.001>.

LEE, Jechan. et al. Chemical recycling of plastic waste via thermocatalytic routes. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 2021; 321:128989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128989>.

LIU, Guangzhou. et al. Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater. *ENVIRONMENTAL POLLUTION* 2019; 246: 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.100>.

LIU, Jiawei. et al. Biodegradation of polyether-polyurethane foam in yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome. *CHEMOSPHERE* 2022a; 304:135263. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135263>.

LIU, Xianrui. et al. Rapid colonization and biodegradation of untreated commercial polyethylene wrap by a new strain of *Bacillus velezensis* C5. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT 2022b; 301:113848. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113848>.

LIU, Zhanzhi. et al. Enhancement of PET biodegradation by anchor peptide-cutinase fusion protein. ENZYME AND MICROBIAL TECHNOLOGY 2022c; 156: p. 110004. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2022.110004>.

LUO, Liping. et al. Biodegradation of foam plastics by *Zophobas atratus* larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) associated with changes of gut digestive enzymes activities and microbiome. CHEMOSPHERE 2021; 282: 131006. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131006>.

LUSHER, A. L. et al. (2017). Microplastics in fisheries and aquaculture: Status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. FAO FISHERIES AND AQUACULTURE TECHNICAL PAPER 2017; (615). https://www.researchgate.net/publication/319644050_Microplastics_in_fisheries_and_aquaculture_Status_of_knowledge_on_their_occurrence_and_implications_for_aquatic_organisms_and_food_safety (acessado em 29 de setembro de 2024).

MADDELA, Naga Raju. et al. Additives of plastics: Entry into the environment and potential risks to human and ecological health. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT 2023; 348: 119364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119364>.

MENÉNDEZ-PEDRIZA, Albert. et al. Interaction of Environmental Pollutants with Microplastics: A Critical Review of Sorption Factors, Bioaccumulation and Ecotoxicological Effects. TOXICS 2020; 8(2):40. <https://doi.org/10.3390/toxics8020040>.

MILOLOŽA, Martina. et al. Biotreatment strategies for the removal of microplastics from freshwater systems. A review. ENVIRONMENTAL CHEMISTRY LETTERS 2022; 20(2): p. 1377–1402. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01370-0>.

MOHANAN, Nisha. et al. Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. FRONTIERS IN MICROBIOLOGY 2020; 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580709>.

MUHONJA, Christabel Ndahebwa. et al. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. PLOS ONE 2018; 13(7): p. e0198446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>.

NIKOLAIVITS, Efstratios. et al. A Middle-Aged Enzyme Still in Its Prime: Recent Advances in the Field of Cutinases. CATALYSTS 2018; 8(12): p. 612. <https://doi.org/10.3390/catal8120612>.

OLIVEIRA, M. et al. A micro(nano)plastic boomerang tale: A never ending story? *TRENDS IN ANALYTICAL CHEMISTRY* 2019; 112: p. 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.01.005>.

ORTIZ, David. et al. Insights into the degradation of microplastics by Fenton oxidation: From surface modification to mineralization. *CHEMOSPHERE* 2022; 309: 136809. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136809>.

OTHMAN, Ahmad Razi. et al. Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. *ENVIRONMENTAL CHEMISTRY LETTERS* 2021; 19(4): p. 3057–3073. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01197-9>.

PAÇO, Ana. et al. Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2017; 586:10–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.017>.

PARK, Seon Yeong. et al. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *CHEMOSPHERE* 2019; 222: 527–533. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>.

PRATA, Joana Correia. et al. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2020; 702: p. 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>.

QIAO, Ruxia. et al. Microplastics induce intestinal inflammation, oxidative stress, and disorders of metabolome and microbiome in zebrafish. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2019; 662:246–253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.245>.

QIN, Meng. et al. A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: Another ecological threat to soil environments? *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 2021; 312: p. 127816. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127816>.

QUAN, Zhaolin. et al. Biodegradation of polystyrene microplastics by superworms (larve of *Zophobas atratus*): Gut microbiota transition, and putative metabolic ways. *CHEMOSPHERE* 2023; 343: p. 140246. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140246>.

ROAGER, Line. et al. Bacterial candidates for colonization and degradation of marine plastic debris. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2019; 53(20):11636–11643. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02212>.

RU, Jiakang. et al. Microbial Degradation and Valorization of Plastic Wastes. *FRONTIERS IN MICROBIOLOGY* 2020; 11: 21. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00442>.

SAHU, Sudarshan. et al. A review on cutinases enzyme in degradation of microplastics. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT* 2023; 347: p. 119193 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119193>.

SÁNCHEZ, Carmen. Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro- and microplastics biodegradation. *BIOTECHNOLOGY ADVANCES* 2020; 40: p. 107501. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107501>.

SANTACRUZ-JUÁREZ, Ericka. et al. Fungal enzymes for the degradation of polyethylene: Molecular docking simulation and biodegradation pathway proposal. *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS* 2021; 411: p. 125118. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125118>.

SANTILLO, David. et al. Microplastics as contaminants in commercially important seafood species. *INTEGRATED ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AND MANAGEMENT* 2017; 13(3): p. 516–521. <https://doi.org/10.1002/ieam.1909>.

SAPEA, Science Advice for Policy by European Academies. A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society. Berlin: SAPEA. 2019 <https://doi.org/10.26356/microplastics>.

SHAH, Aamer Ali. et al. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *BIOTECHNOLOGY ADVANCES* 2008; 26(3): 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.

SHARMA, Madhu D. et al. Assessment of cancer risk of microplastics enriched with polycyclic aromatic hydrocarbons. *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS* 2020; 398: p. 122994. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122994>.

SHEN, Maocai. et al. Microplastics in landfill and leachate: Occurrence, environmental behavior and removal strategies. *CHEMOSPHERE* 2022; 305:135325. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135325>.

SINGH JADAUN, Jyoti. et al. Biodegradation of plastics for sustainable environment. *BIORESOURCE TECHNOLOGY* 2022; 347: p. 126697. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126697>.

SONG, Yang. et al. Biodegradation and disintegration of expanded polystyrene by land snails *Achatina fulica*. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2020; 746: p. 141289. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141289>.

SRIKANTH, Munuru. et al. Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *BIORESOURCES AND BIOPROCESSING* 2022; 9(1): p. 42. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>.

STANZIONE, Ilaria. et al. Innovative surface bio-functionalization by fungal hydrophobins and their engineered variants. *FRONTIERS IN MOLECULAR BIOSCIENCES* 2022;9. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2022.959166>.

SUMATHI, Tirupati. et al. Production of laccase by *cochliobolus* sp. isolated from plastic dumped soils and their ability to degrade low molecular weight PVC. *BIOCHEMISTRY RESEARCH INTERNATIONAL* 2016; 2016: 1–10. <https://doi.org/10.1155/2016/9519527>.

SURWASE, Swati V. et al. Interaction of small molecules with fungal laccase: A Surface Plasmon Resonance based study. *ENZYME AND MICROBIAL TECHNOLOGY* 2016; 82: p. 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2015.09.002>.

TEMPORITI, Marta Elisabetta Eleonora. et al. Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. *MICROORGANISMS* 2022; 10(6): p. 1180. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061180>.

THAKUR, Babita. et al. Biodegradation of different types of microplastics: Molecular mechanism and degradation efficiency. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2023; 877: p. 162912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162912>.

THEW, Crystal Xue Er. et al. Recent advances and challenges in sustainable management of plastic waste using biodegradation approach. *BIORESOURCE TECHNOLOGY* 2023; 374: p. 128772. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128772>.

THOMPSON, Richard C. et al. Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *SCIENCE* 2004; 304(5672): p. 838–838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.

TOURNIER, Vincent. et al. Enzymes' Power for Plastics Degradation. *CHEMICAL REVIEWS* 2023; 123(9): p. 5612–5701. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00644>

TSUCHIMOTO, Ichiro. et al. Recycling of Plastic Waste: A Systematic Review Using Bibliometric Analysis. *SUSTAINABILITY* 2022; 14(24): p. 16340. <https://doi.org/10.3390/su142416340>.

WANG, Hao. et al. Soil burial biodegradation of antimicrobial biodegradable PBAT films. *POLYMER DEGRADATION AND STABILITY* 2015; 116: 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.03.007>.

WANG, Shutao. et al. Biodegradation of decabromodiphenyl ethane (DBDPE) by white-rot fungus *Pleurotus ostreatus*: Characteristics, mechanisms, and toxicological response. *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS* 2022; 424. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127716>.

WANG, Yi. et al. Biodegradable Microplastics: A Review on the Interaction with Pollutants and Influence to Organisms. *BULLETIN OF ENVIRONMENTAL CONTAMINATION AND TOXICOLOGY* 2022; 108(6): p. 1006–1012. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03486-7>.

WRIGHT, Stephanie L. et al. Plastic and Human Health: A Micro Issue? *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2017; 51(12): 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>.

WU, Panfeng. et al. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. *ECOTOXICOLOGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY* 2019; 184: p. 109612. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109612>.

WU, Zeyu. et al. Biodegradation of conventional plastics: Candidate organisms and potential mechanisms. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2023; 885: p. 163908. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163908>.

XIANG, Peng. et al. Systematic Review of Degradation Processes for Microplastics: Progress and Prospects. *SUSTAINABILITY* 2023; 15(17): p. 12698. <https://doi.org/10.3390/su151712698>.

YANG, Yu. et al. Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2. Role of Gut Microorganisms. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2015; 49(20): p. 12087–12093. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02663>.

YEE, Maxine Swee-Li. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. *NANOMATERIALS* 2021; 11(2): p. 496. <https://doi.org/10.3390/nano11020496>.

YIN, Chao-Fan. et al. Biodegradation of polyethylene mulching films by a co-culture of *Acinetobacter* sp. strain NyZ450 and *Bacillus* sp. strain NyZ451 isolated from *Tenebrio molitor* larvae. *INTERNATIONAL BIODETERIORATION & BIODEGRADATION* 2020; 155: p. 105089. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105089>.

YOSHIDA, Shosuke. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *SCIENCE* 2016; 351(6278): p. 1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>.

ZETTLER, Erik R. et al. Life in the “Plastisphere”: Microbial Communities on Plastic Marine Debris. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY* 2013; 47(13): p. 7137–7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>.

ZHANG, Junqing. et al. Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2020; 704: p. 135931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135931>.

ZHANG, Kai. et al. Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 2018; 630: p. 1641–1653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.300>.

ZHANG, Ni. et al. Current Advances in Biodegradation of Polyolefins. *MICROORGANISMS* 2022; 10(8): p. 1537. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081537>.

ZHENG, Ying. et al. A Review of Plastic Waste Biodegradation. *CRITICAL REVIEWS IN BIOTECHNOLOGY* 2005; 25(4), p. 243–250. <https://doi.org/10.1080/07388550500346359>.

Autores

Luís Felipe Oliva dos Santos¹, Thaís Marques Uber², Vinícius Mateus Salvatori Cheute², José Rivaldo dos Santos Filho², Rúbia Carvalho Gomes Corrêa³, Cristina Giatti Marques de Souza², Rafael Castoldi, Adelar Bracht², Rosane Marina Peralta⁴

1. Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.
2. Programa de Pós-graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.
3. Programa de Pós-graduação em Tecnologias Limpas, Universidade Cesumar, Maringá, Brasil.
4. Programa de Pós-graduação em Biotecnologia Ambiental, Programa de Pós-graduação em Bioquímica, Laboratório de Bioquímica de Microrganismos e Alimentos, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

CAPÍTULO 5

Sinergia entre microalgas, biochar e fotocatalise: uma revolução no tratamento de águas residuais

Luis Guillermo Ramírez Mérida

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-21-3.c5>

Resumo

A produção de biochar a partir de microalgas representa uma inovação promissora no campo da sustentabilidade ambiental e do tratamento de águas residuais. Ao cultivar microalgas em água contaminada, uma função dupla é alcançada: a água é purificada pela remoção do excesso de nutrientes e uma biomassa rica em carbono é produzida. Essa biomassa, quando submetida a um processo de pirólise, é transformada em biochar, um material carbonáceo com propriedades adsorventes e fertilizantes. O biochar resultante pode ser aplicado ao solo, melhorando sua fertilidade e retenção de água, e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono. Além disso, a capacidade do biochar de adsorver contaminantes o torna uma ferramenta valiosa para a remediação de solos e águas contaminados. A integração da fotocatalise neste processo aumenta ainda mais a capacidade de degradação de contaminantes, criando um sistema de tratamento de águas residuais altamente eficiente e sustentável. Essa estratégia não apenas contribui para a purificação da água e a melhoria da qualidade do solo, mas também promove uma economia circular ao aproveitar um recurso renovável e gerar produtos de alto valor agregado. Em resumo, a produção de biochar a partir de microalgas oferece uma solução inovadora e multifuncional para os desafios ambientais atuais, contribuindo para a sustentabilidade e o desenvolvimento de um futuro mais limpo e saudável.

Palavras-chave: Sustentabilidade ambiental, Bioeconomia, Recuperação ambiental, Inovação tecnológica, Microrganismos fotossintéticos.

1. INTRODUÇÃO

A crise global da água estimulou a busca por soluções inovadoras e sustentáveis para o tratamento de águas residuais. Poluentes emergentes são compostos que sofrem degradação complicada e podem causar vários efeitos adversos tanto na saúde humana quanto no meio ambiente (WANG et al., 2024). Na literatura científica, foram documentados diversos métodos para o tratamento de águas residuais contendo esses contaminantes; entretanto, o desenvolvimento de técnicas mais eficazes e viáveis continua sendo um desafio considerável. Entre as estratégias investigadas estão oxidação química, osmose reversa, adsorção, eletrocoagulação, filtração, separação por membrana, tratamentos biológicos e processos oxidativos avançados (DEY et al., 2024; SARKAR et al., 2024; LEICHTWEIS et al., 2023). Uma estratégia promissora combina a capacidade das microalgas de bioacumular poluentes e produzir biomassa com o poder da fotocatalise, potencializado pela alta capacidade adsorvente do biochar.

A integração de microalgas, biochar e fotocatalise em um sistema de tratamento de águas residuais representa uma estratégia inovadora e holística que busca maximizar a eficiência na purificação da água. Essa abordagem sinérgica combina as capacidades únicas de cada componente para criar um sistema coeso que não apenas remove poluentes, mas também promove a sustentabilidade e a recuperação de recursos (Khan et al., 2022).

As microalgas, organismos fotossintéticos que prosperam em ambientes aquáticos, desempenham um papel fundamental nesse sistema. Sua capacidade de absorver nutrientes como nitrogênio e fósforo os torna aliados essenciais na luta contra a eutrofização, um problema comum em corpos d'água poluídos. À medida que as microalgas metabolizam esses compostos, elas produzem oxigênio, melhorando as condições aeróbicas do ambiente e promovendo a degradação de poluentes orgânicos (Liberti et al., 2024). No entanto, seu potencial é maximizado quando combinado com biochar, um material carbonáceo obtido da pirólise de biomassa. O biochar não atua apenas como um meio adsorvente que retém metais pesados e compostos orgânicos, mas também fornece uma estrutura física que estimula o crescimento de

microalgas e serve como habitat para microrganismos benéficos (Law et al., 2022).

A fotocatálise, um processo que usa luz para ativar um catalisador e gerar espécies reativas, está efetivamente integrada a este sistema. Ao aplicar a fotocatálise, compostos orgânicos recalcitrantes que são difíceis de remover por métodos convencionais podem ser decompostos. A luz usada na fotocatálise não apenas ativa o biochar, mas também estimula o crescimento de microalgas, criando um ciclo virtuoso onde cada componente potencializa a ação do outro. Este processo integrado permite que as microalgas absorvam os contaminantes, enquanto o biochar adsorve os restantes e a fotocatálise é responsável por decompor aqueles que são mais resistentes (Subramaniam, 2023).

Em um sistema de tratamento de águas residuais que integra esses elementos, é possível visualizar um processo de vários estágios que flui harmoniosamente. Inicialmente, as microalgas são responsáveis pela absorção de nutrientes e poluentes, reduzindo a carga poluente da água (Li et al., 2019). À medida que a água flui pelo sistema, o biochar atua como um filtro que retém metais pesados e compostos orgânicos, enquanto simultaneamente as microalgas continuam seu processo de metabolização (Leong e Chang 2020). Na fase final, a fotocatálise é ativada, usando a luz para quebrar os poluentes que sobreviveram aos estágios anteriores. Essa abordagem não apenas melhora a qualidade da água tratada, mas também permite a recuperação de recursos valiosos, como a biomassa de microalgas, que pode ser usada na produção de biocombustíveis ou como fertilizante (Liu e Hong, 2021).

2. VANTAGENS DE OBTER BIOCHAR A PARTIR DE MICROALGAS

A produção de biochar a partir de microalgas se apresenta como uma alternativa inovadora e sustentável para o gerenciamento de resíduos orgânicos e melhoria da qualidade do solo. Este processo não apenas fornece material valioso para a agricultura e o tratamento de água, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental e a mitigação de problemas ecológicos. As principais vantagens de obter biochar a partir de microalgas são detalhadas abaixo.

2.1. Rico em nutrientes

Microalgas são organismos altamente eficientes na captura de nutrientes do ambiente aquático. Durante o seu crescimento, eles absorvem compostos como nitrogênio, fósforo e potássio, que são essenciais para o seu desenvolvimento. Quando submetidos à pirólise para produzir biochar, esses nutrientes são preservados até certo ponto, resultando em um biochar com alto teor de carbono e nutrientes (Yu et al., 2024).

Este biochar enriquecido pode ser usado como corretivo do solo, melhorando a fertilidade do solo e fornecendo às plantas os nutrientes necessários para seu crescimento. Além disso, a aplicação de biochar em solos agrícolas pode ajudar a melhorar a retenção de água e a estrutura do solo, o que é crucial em áreas propensas à seca. A riqueza de nutrientes do biochar derivado de microalgas o torna um recurso valioso para a agricultura sustentável, pois reduz a necessidade de fertilizantes químicos, que podem ser caros e prejudiciais ao meio ambiente (Ayaz et al., 2021).

2.2. Sustentabilidade

Usar microalgas para produção de biochar é uma abordagem sustentável que aproveita recursos renováveis. Microalgas podem ser cultivadas em águas residuais ou em ambientes onde outras culturas não seriam capazes de crescer, o que as torna uma opção viável para a produção de biomassa. Este cultivo não só ajuda a limpar a água absorvendo o excesso de nutrientes, como também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que as microalgas capturam dióxido de carbono durante o seu crescimento (Costa et al., 2024).

Além disso, a produção de biochar a partir de microalgas pode contribuir para a mitigação da poluição da água. Ao remover nutrientes como nitrogênio e fósforo das águas residuais, o risco de eutrofização em corpos d'água é reduzido, um fenômeno que pode levar à proliferação de algas nocivas e à morte de organismos aquáticos. Dessa forma, a produção de biochar não é apenas benéfica para o solo, mas também tem um impacto positivo na qualidade da água e na saúde dos ecossistemas aquáticos (González-Hourcade et al., 2022).

2.3. Propriedades adsorventes

Uma das características mais marcantes do biochar derivado de microalgas é sua capacidade adsorvente. Graças à sua estrutura porosa e alta área de superfície específica, o biochar pode reter contaminantes no solo e na água. Isso o torna um material eficaz para remediação de solos contaminados e tratamento de águas residuais (Kamali et al., 2021).

O biochar pode adsorver metais pesados, pesticidas e outros contaminantes orgânicos, reduzindo assim sua disponibilidade para plantas e organismos do solo. Essa propriedade é especialmente valiosa em locais contaminados, onde a remoção de contaminantes é crucial para restaurar a saúde do ecossistema. Além disso, o uso de biochar em sistemas de tratamento de água pode melhorar a qualidade da água ao remover toxinas e outros compostos nocivos, contribuindo para um ambiente mais limpo e saudável (Zhao et al., 2024).

2.4. Recuperação de Recursos

A produção de biochar a partir de microalgas também permite fechar o ciclo de nutrientes em sistemas agrícolas. Ao usar microalgas, nutrientes que de outra forma seriam perdidos podem ser recuperados e reciclados. O biochar resultante pode ser aplicado ao solo como um aditivo, fornecendo nutrientes essenciais às plantas e melhorando a produtividade agrícola. Este ciclo de recuperação é especialmente importante em um contexto de crescente demanda por alimentos e recursos. O uso de biochar não apenas promove a sustentabilidade na agricultura, mas também ajuda a reduzir o uso de fertilizantes sintéticos, que podem ter efeitos negativos no meio ambiente. Ao fechar o ciclo dos nutrientes, promove-se uma agricultura mais circular e responsável, onde os recursos são utilizados de forma mais eficiente (Rahim et al., 2024).

3. Processo de Obtenção de Biochar a partir de Microalgas

A produção de biochar a partir de microalgas segue um processo bem definido que abrange desde o cultivo das microalgas até a caracterização do

biochar obtido. Esse processo não é apenas crucial para maximizar a qualidade do biochar, mas também garante que as propriedades únicas das microalgas sejam totalmente utilizadas. Cada etapa do processo é detalhada abaixo.

3.1. Cultivo de microalgas

O primeiro passo para obter biochar é o cultivo de microalgas. Este processo é realizado em condições controladas que permitem maximizar o crescimento e a produção de biomassa. As microalgas podem ser cultivadas em diferentes tipos de sistemas, como fotobiorreatores ou lagoas abertas, e são alimentadas principalmente com águas residuais ou meios ricos em nutrientes.

O uso de águas residuais é particularmente vantajoso, pois não só fornece um meio rico em nutrientes, como nitrogênio e fósforo, mas também ajuda a purificar a água absorvendo quaisquer contaminantes presentes. Essa abordagem de “cultivo em águas residuais” não apenas otimiza o crescimento de microalgas, mas também contribui para a sustentabilidade ao reduzir a carga poluente nos corpos d’água (You et al., 2022).

As condições de cultivo devem ser cuidadosamente controladas para garantir o crescimento ideal. Isso inclui a regulação de fatores como temperatura, luz, pH e concentração de nutrientes. As microalgas precisam de luz para realizar a fotossíntese, por isso é essencial fornecer uma fonte adequada de luz, seja natural ou artificial. Além disso, a temperatura do meio deve ser mantida dentro de uma faixa específica para promover o crescimento de microalgas (Yu et al., 2022).

Durante o cultivo, é essencial monitorar o crescimento das microalgas. Isso pode ser feito por meio de medições de biomassa, concentração de clorofila e outros indicadores de saúde. O monitoramento constante permite que sejam feitos ajustes nas condições de cultivo para maximizar a produção de biomassa (Jorge et al., 2024).

3.2. Colheita e Secagem

Quando as microalgas atingem seu potencial máximo de crescimento, elas são colhidas. Esta etapa é crucial, pois a qualidade do biochar obtido depende em grande parte da qualidade das microalgas coletadas.

Existem vários métodos de coleta de microalgas, sendo os mais comuns a centrifugação, a filtração e a floculação. A centrifugação é um método eficiente que utiliza força centrífuga para separar microalgas do meio de cultura. A filtração, por outro lado, envolve o uso de membranas ou filtros para capturar microalgas, enquanto a floculação usa agentes químicos para aglomerar microalgas, tornando-as mais fáceis de coletar (Zhu et al., 2024).

Após a colheita, as microalgas devem ser secas para reduzir seu teor de umidade. Esta etapa é essencial, pois o alto teor de umidade pode afetar negativamente o processo de pirólise. A secagem pode ser feita por métodos naturais, como exposição ao sol, ou por técnicas artificiais, como o uso de secadores de ar quente. A escolha do método de secagem dependerá da escala de produção e dos recursos disponíveis (Koyande e Show, 2024).

3.3. Pirólise

Depois que as microalgas estão secas, é realizada a pirólise, um processo térmico que decompõe a biomassa na ausência de oxigênio. Esta etapa é fundamental para converter microalgas em biochar.

A pirólise é realizada em temperaturas geralmente variando de 300 °C a 700 °C. A temperatura exata e o tempo de residência no forno de pirólise influenciam as propriedades finais do biochar. Em temperaturas mais baixas, é produzido biochar com maior teor de nutrientes, enquanto em temperaturas mais altas, é obtido biochar com maior estabilidade e capacidade adsorvente (Nawaz et al., 2024).

É essencial que a pirólise seja realizada em um ambiente anaeróbico para evitar a combustão. Isso é obtido por meio do uso de fornos projetados especificamente para pirólise, que permitem controlar o fluxo de gases e manter um ambiente livre de oxigênio. Durante esse processo, também são gerados subprodutos como gases e bio-óleos, que podem ser capturados e utilizados como fontes de energia renováveis (Guo et al., 2024).

3.4. Caracterización del Biochar

Após a pirólise, o biochar obtido deve ser caracterizado para avaliar suas propriedades físicas e químicas. Esta etapa é fundamental para determinar seu potencial em aplicações agrícolas e de tratamento de água.

A caracterização física do biochar inclui a avaliação de sua textura, densidade, porosidade e área superficial específica. Essas propriedades são cruciais para entender como o biochar interage com o solo e os contaminantes. Um biochar com alta porosidade e área de superfície específica é mais eficaz na adsorção de nutrientes e contaminantes, o que aumenta sua utilidade em aplicações agrícolas. As propriedades químicas do biochar, como seu pH, teor de carbono e presença de nutrientes e metais pesados, também devem ser avaliadas. O pH adequado é essencial para garantir que o biochar seja benéfico ao solo, pois pH muito ácido ou muito alcalino pode ser prejudicial às plantas. Além disso, o conteúdo de nutrientes determinará sua eficácia como corretivo do solo (Dayoub et al., 2024). Por fim, a caracterização do biochar permite determinar seu potencial para aplicações específicas, seja como corretivo de solo, fertilizante ou em processos de remediação de água. Essas informações são cruciais para agricultores e pesquisadores que buscam usar o biochar de forma eficaz em suas práticas (Zanutel et al., 2024).

4. CONCLUSÃO

A obtenção de biochar a partir de microalgas oferece múltiplas vantagens que contribuem para a sustentabilidade e a melhoria da qualidade ambiental. A riqueza de nutrientes do biochar, sua capacidade de adsorver contaminantes, seu papel na mitigação da poluição da água e seu potencial para fechar o ciclo de nutrientes são aspectos que destacam sua importância na agricultura e na gestão ambiental.

À medida que a pesquisa e a tecnologia avançam, métodos mais eficientes para produzir biochar a partir de microalgas provavelmente serão desenvolvidos, potencialmente abrindo novas oportunidades na gestão de resíduos e melhorando a produtividade agrícola. Essa abordagem não apenas representa uma solução inovadora para os desafios ambientais atuais, mas

também promove um futuro mais sustentável e resiliente. A integração de microalgas na produção de biochar é, sem dúvida, um passo em direção a uma gestão mais responsável dos nossos recursos naturais e uma forma eficaz de abordar problemas críticos como a poluição da água e a degradação do solo.

5. REFERÊNCIAS

- Ayaz, M., Feizienė, D., Tilvikienė, V., Akhtar, K., Stulpinaitė, U., & Iqbal, R. (2021). Biochar role in the sustainability of agriculture and environment. *Sustainability*, 13(3), 1330.
- Costa, J. A. V., Zaparoli, M., Cassuriaga, A. P. A., Cardias, B. B., da Silva Vaz, B., de Moraes, M. G., & Moreira, J. B. (2023). Biochar production from microalgae: a new sustainable approach to wastewater treatment based on a circular economy. *Enzyme and Microbial Technology*, 110281.
- Dayoub, E. B., Tóth, Z., Soós, G., & Anda, A. (2024). Chemical and Physical Properties of Selected Biochar Types and a Few Application Methods in Agriculture. *Agronomy*, 14(11), 2540.
- DEY, S. et al. Removal of chlorides and hardness from contaminated water by using various biosorbents: A comprehensive review. *Water-Energy Nexus*, v. 7, p. 39–76, 1 dez. 2024.
- González-Hourcade, M., dos Reis, G. S., Grimm, A., Lima, E. C., Larsson, S. H., & Gentili, F. G. (2022). Microalgae biomass as a sustainable precursor to produce nitrogen-doped biochar for efficient removal of emerging pollutants from aqueous media. *Journal of Cleaner Production*, 348, 131280.
- Guo, K., Chang, H., Nie, Y., Zhu, L., Tan, L., Sheng, B., ... & Ho, S. H. (2024). Distinct Mechanisms on Accelerating Electron Transfer to Facilitate Two-Stage Anaerobic Digestion Modulated by Various Microalgae Biochar. *ACS ES&T Engineering*, 4(4), 966-977.
- Jorge, A. M., Pedroso, P. R., & Pereira, J. F. (2024). Sustainable extraction and utilization of chlorophyll from microalgae for eco-friendly wool dyeing. *Journal of Cleaner Production*, 451, 142009.
- Kamali, M., Appels, L., Kwon, E. E., Aminabhavi, T. M., & Dewil, R. (2021). Biochar in water and wastewater treatment-a sustainability assessment. *Chemical Engineering Journal*, 420, 129946.
- Khan, A. A., Gul, J., Naqvi, S. R., Ali, I., Farooq, W., Liaqat, R., ... & Juchelková, D. (2022). Recent progress in microalgae-derived biochar for the treatment of textile industry wastewater. *Chemosphere*, 306, 135565.

Koyande, A. K., & Show, P. L. (2024). Microalgae harvest technology. In *Handbook of Biorefinery Research and Technology: Production of Biofuels and Biochemicals* (pp. 705-730). Singapore: Springer Nature Singapore.

Law, X. N., Cheah, W. Y., Chew, K. W., Ibrahim, M. F., Park, Y. K., Ho, S. H., & Show, P. L. (2022). Microalgal-based biochar in wastewater remediation: Its synthesis, characterization and applications. *Environmental research*, 204, 111966.

LEICHTWEIS, J. et al. NiFe₂O₄/biochar decorated porous polymer membranes for the flow-through photo-Fenton degradation of tetracycline. *Chemical Engineering Journal*, v. 477, p. 147203, 1 dez. 2023.

Leong, Y. K., & Chang, J. S. (2020). Bioremediation of heavy metals using microalgae: recent advances and mechanisms. *Bioresource technology*, 303, 122886.

Li, K., Liu, Q., Fang, F., Luo, R., Lu, Q., Zhou, W., ... & Ruan, R. (2019). Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource technology*, 291, 121934.

Liberti, D., Pinheiro, F., Simões, B., Varela, J., & Barreira, L. (2024). Beyond bioremediation: the untapped potential of microalgae in wastewater treatment. *Water*, 16(19), 2710.

Liu, X. Y., & Hong, Y. (2021). Microalgae-based wastewater treatment and recovery with biomass and value-added products: a brief review. *Current Pollution Reports*, 7, 227-245.

Nawaz, A., Rohman, G. A. N., Jameel, A. G. A., Ummer, A. C., & Razzak, S. A. (2024). Engineered biochar-based catalytic pyrolysis of *Spirulina plantensis* microalgae for the production of high value compounds in microwave reactor. *Algal Research*, 81, 103583.

Rahim, H. U., Allevato, E., Vaccari, F. P., & Stazi, S. R. (2024). Biochar aged or combined with humic substances: fabrication and implications for sustainable agriculture and environment-a review. *Journal of Soils and Sediments*, 24(1), 139-162.

SARKAR, D. et al. A comprehensive review of production and characterization of biochar for removal of organic pollutants from water and wastewater. *Water-Energy Nexus*, 13 nov. 2024.

Subramaniam, M. N., Wu, Z., Goh, P. S., & Zhou, S. (2023). The state-of-the-art development of biochar based photocatalyst for removal of various organic pollutants in wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 139487.

WANG, F. et al. Emerging contaminants: A One Health perspective. *The Innovation*, v. 5, n. 4, 1 jul. 2024.

You, X., Yang, L., Zhou, X., & Zhang, Y. (2022). Sustainability and carbon neutrality trends for microalgae-based wastewater treatment: A review. *Environmental Research*, 209, 112860.

Yu, D., Yan, L., Shi, J., Liu, Y., Zhang, A., Wang, Y., ... & Xie, T. (2024). Phosphorus Removal and Recovery During Microalgae-Based Wastewater Treatment: A Mini-review. *International Journal of Environmental Research*, 18(3), 34.

Yu, H., Kim, J., Rhee, C., Shin, J., Shin, S. G., & Lee, C. (2022). Effects of different pH control strategies on microalgae cultivation and nutrient removal from anaerobic digestion effluent. *Microorganisms*, 10(2), 357.

Zanutel, M., Garré, S., Sanglier, P., & Biolders, C. (2024). Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. *Vadose Zone Journal*, 23(1), e20301.

Zhao, Y., Li, X., Xu, G., & Nan, J. (2024). Multilevel investigation of the ecotoxicological effects of sewage sludge biochar on the earthworm *Eisenia fetida*. *Chemosphere*, 142455.

Zhu, J., Wakisaka, M., Omura, T., Yang, Z., Yin, Y., & Fang, W. (2024). Advances in industrial harvesting techniques for edible microalgae: Recent insights into sustainable, efficient methods and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 140626.

Autores

Luis Guillermo Ramírez Mérida

Profesor Titular, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Valencia – Venezuela. Profesor Asociado Ingeniería en Agua y Desarrollo Sostenible, Instituto Tecnológico Regional Centro-Sur, Universidad Tecnológica del Uruguay, Durazno - Uruguay



www.meridapublishers.com