

Article

Estudo Prospectivo sobre Biomassa Algal: Identificação de Oportunidades para Fortalecimento da Bioeconomia Brasileira

Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos¹, Natália Moreno Viana², Simone Mendonça³, Letícia Jungmann Caçado⁴, Mônica Caraméz Triches Damaso⁵

¹ Doutorando. Universidade de Brasília (UnB). ORCID: 0000-0003-3723-3513. E-mail: sergio.saraiva@embrapa.br

² Graduada. Universidade de Brasília (UnB). ORCID: 0000-0002-8702-0906. E-mail: nataliamviana@gmail.com

³ Doutora. Embrapa Agroenergia. ORCID: 0000-0002-3647-6989. E-mail: simone.mendonca@embrapa.br

⁴ Doutora. Embrapa Agroenergia. ORCID: 0000-0002-2244-832X. E-mail: leticia.jungmann@embrapa.br

⁵ Doutora. Embrapa Agroenergia. ORCID: 0000-0002-5293-7490. E-mail: monica.damaso@embrapa.br

RESUMO

As microalgas e as cianobactérias são versáteis para diversos segmentos industriais, sendo insumos importantes para o fortalecimento da bioeconomia e para garantir a sustentabilidade de processos agroindustriais ao promover o uso racional do capital natural. A grande diversidade de mercados que podem ser contemplados pela exploração de microalgas e cianobactérias sinaliza a necessidade de investigar aspectos positivos e negativos do mercado brasileiro para impulsionar o mercado. O objetivo deste trabalho foi, pela aplicação do método Delphi de consulta a especialistas, identificar oportunidades científicas e tecnológicas para exploração de microalgas e cianobactérias no Brasil nos próximos dez anos. Segundo os especialistas consultados, os gêneros de maior destaque são *Arthrospira* sp., *Chlorella* sp., e *Dunaliella* sp. para os mercados farmacêutico/cosmético e de alimentação e suplementação animal. O Brasil tem grande potencial para se destacar no mercado de microalgas e cianobactérias, conforme já existe para outros microrganismos. No entanto, há empecilhos para explorar o potencial industrial das microalgas e cianobactérias para incluir o Brasil no mercado internacional a preços competitivos, dentre eles a baixa disponibilidade de recursos financeiros para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação e a escassez de profissionais para escalonamento de cultivo para oferta de biomassa.

Palavras-chave: prospecção tecnológica; microalgas; cianobactérias.

ABSTRACT

Microalgae and cyanobacteria are versatile for various industrial segments and are important inputs for strengthening the bioeconomy and ensuring the sustainability of agroindustrial processes by promoting the rational use of natural capital. The wide range of markets that can be covered by the exploration of microalgae and cyanobacteria indicates the need to investigate positive and negative aspects of the Brazilian market in order to boost the market. The objective of this study was to identify scientific and technological opportunities for the exploration of microalgae and cyanobacteria in Brazil over the next ten years by applying the Delphi method of consulting experts. According to the experts consulted, the most prominent genera are *Arthrospira* sp., *Chlorella* sp., and *Dunaliella* sp. for the pharmaceutical/cosmetic and animal feed and supplement markets. Brazil has great potential to stand out in the microalgae and cyanobacteria market, as it already does for other microorganisms. However, there are obstacles to exploring the industrial potential of microalgae and cyanobacteria to include Brazil in the international market at competitive prices, including the low availability of financial resources for investments in research, development and innovation and the shortage of professionals to scale up cultivation to supply biomass.

Keywords: technological prospection; microalgae; cyanobacteria.



Submissão: 06/09/2023



Aceite: 29/08/2024



Publicação: 14/11/2024



Introdução

A biodiversidade e os serviços ecossistêmicos, considerados ativos estratégicos, estão diretamente relacionados a ações para coibir a degradação ambiental e, ao mesmo tempo, promover o crescimento econômico e atender demandas da sociedade como segurança alimentar e lazer. Segundo Gois et al. (2022), a associação entre a biodiversidade e a economia, também chamado de bioeconomia, não é um conceito recente, mas ganhou novos contornos a partir do entendimento de que os sistemas econômicos são dependentes do capital natural, de forma direta ou indireta.

A utilização racional da biodiversidade tem promovido o Brasil como um país estratégico para o desenvolvimento e o fortalecimento da sua bioeconomia, por meio de estratégias *Environmental, Social, Governance* (ESG) e em apoio ao cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Pärli & Fischer 2020; Gois et al. 2022). Bueno e Torres (2022) complementam a questão ao conectar a bioeconomia como novo paradigma para apoiar crises econômicas alinhada a questões ambientais como a mitigação do aquecimento global e a garantia à segurança alimentar e energética, não só no Brasil como em todos os outros países.

O conceito atual de bioeconomia está intimamente relacionado ao de biotecnologia, que se resume ao uso de organismos biológicos para desenvolvimento de produtos, processos e serviços em benefício da sociedade e que tem caráter multidisciplinar com grande leque de oportunidades (Andrade 2017; Anjos 2020). Com isso, abrem-se novas frentes de estudos científicos, desenvolvimento tecnológico e mercados pela materialização do novo paradigma de uso de recursos biológicos renováveis (Silva et al. 2018).

Microalgas e cianobactérias são microrganismos presentes em quase todos os ecossistemas, são versáteis e cultiváveis em diferentes meios e condições experimentais ou ambientais. Têm grande importância ecológica ao converterem CO₂ e água em O₂, posteriormente liberado na atmosfera, e uma eficiência expressiva de fotoconversão, incluindo em terras não aráveis e que sejam competitivos em processos de biorrefinarias (Hariskos & Posten 2014; Show 2022). As microalgas e cianobactérias produzem metabólitos de importância econômica como carotenóides, vitaminas, polissacarídeos e ácidos graxos poliinsaturados. Também têm teores diversificados de carboidratos, lipídeos e proteínas que são alternativas a diversos segmentos industriais como alimentação animal, alimentação humana, biopolímeros, biofertilizantes, cosméticos, medicamentos, biogás e hidrogênio renovável, e serviços como remediação de águas residuais e monitoramento ambiental (Rumin et al. 2020; Silva et al. 2020; Show 2022).

Visando aproveitar o potencial da biodiversidade brasileira para reduzir a dependência dos produtores rurais em relação a insumos importados e ampliar oferta de matéria-prima para setor, o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) lançou, por meio do Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020, o Programa Nacional de Bioinsumos. Este programa estimula a execução de ações que promovam o desenvolvimento tecnológico de insumos agropecuários ambientalmente sustentáveis e a partir de matérias-primas renováveis, levando em conta as dimensões econômicas, sociais e produtivas (MAPA, 2020), com a possibilidade de diversificar as matérias-primas, atender as demandas do mercado e fortalecer a competitividade no setor (Scur & Queiroz 2017).

A versatilidade das microalgas e das cianobactérias as tornam insumos importantes para o fortalecimento da bioeconomia para garantir a sustentabilidade de processos industriais e promover o uso racional do capital natural (Acién et al. 2018; Show 2022), fortalecendo o mercado de bioinsumos, em expansão no Brasil. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi identificar oportunidades científicas e tecnológicas para microalgas e cianobactérias no Brasil nos próximos dez anos a partir da consulta a especialistas usando o método Delphi.



Materiais e Métodos

Executou-se um semiquantitativo e exploratório usando o método Delphi para consultar especialistas sobre tendências de futuro para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) para microalgas e cianobactérias num horizonte temporal de dez anos. Esse método permite explorar oportunidades futuras para busca de consenso a partir do julgamento de especialistas geograficamente dispersos a partir de um questionário, cujo risco de eventual descontinuidade de informações não impede a avaliação quali-quantitativa dos dados, com a vantagem de incluir dados históricos e contemplar a expertise dos especialistas selecionados (Popper 2008; Borschiver & Silva 2016; Miles et al. 2016).

O público-alvo deste estudo foram pesquisadores de qualquer nacionalidade que atuam em instituições brasileiras, públicas ou privadas, e pesquisadores brasileiros lotados em instituições internacionais. Partindo dessa premissa, a seleção dos participantes iniciou-se em 24 de março de 2021 e ocorreu concomitantemente de três formas para levantamento da maior quantidade possível de especialistas sem a exigência metodológica de amostra mínima, conforme instrui Miles et al. (2016): busca de currículos na plataforma Lattes/CNPq, levantamento de publicações brasileiras na plataforma *Web of Science* (WoS) e busca de empresas e profissionais atuantes na área privada.

A busca na plataforma Lattes CNPq usou a estratégia de busca “*TOPIC: "microalga*" OR "cianobacteri*" OR "cyanobacteri*" NOT TOPIC: "macroalga*"*”. A busca de especialistas na base WoS usou como estratégia de busca “*TS=(microalga* OR c?anobacteri*)*”, refinado para o Brasil e no escopo temporal de 2011 a 2021. Os autores foram ranqueados em ordem decrescente de quantidade de publicações, sem mineração dos dados e análise individual de cada pesquisador pelos seus currículos na plataforma Lattes/CNPq. A busca de especialistas no setor privado foi feita por consultas *online* na plataforma *LinkedIn*.

A consolidação dos selecionados resultou em uma lista dividida em duas áreas: “Público e Academia” (universidades e institutos de pesquisa e desenvolvimento, públicos e privados); e “Privado” (empresas privadas). Chegou-se a 218 especialistas, sendo 189 do “Público e Academia” e 29 do “Privado”, com concentração nas regiões Sul (39,0%) e Sudeste (36,2%), além de pesquisadores brasileiros na Arábia Saudita, na Bélgica e na Costa Rica.

O questionário foi construído com nove questões para julgamento dos especialistas sobre mercados e produtos, processos de colheita e de cultivo e desafios, oportunidades e cenários, além de questões abertas. Ao final de cada questão objetiva, foi incluído um campo aberto de preenchimento opcional para que os participantes incluíssem comentários adicionais. O questionário foi enviado por meio eletrônico aos especialistas em 29/08/2022, reiterado duas vezes (15/09/2022 e 21/10/2022) e finalizado em 03/11/2022.

Na seção “Mercados e Produtos”, os especialistas responderam duas questões de múltipla escolha para apontar os mercados que julgam potenciais e os gêneros mais promissores para os mercados apontados. Assim, os mercados listados na pesquisa foram: alimentação e suplementação humana; alimentação e suplementação animal; farmacêutico e cosmético; bioinsumos para agricultura; bioinsumos para outras indústrias; biocombustíveis; química verde; e serviços ambientais. Assim, o uso industrial de microalgas e cianobactérias avaliado neste estudo se enquadra no ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 3 (Saúde e Bem-estar), ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 14 (Vida na Água) e ODS 15 (Vida Terrestre).

Ainda na seção “Mercados e Produtos”, os gêneros avaliados foram os mais citados em estudos como Rumin et al. (2020) e Schultz et al. (2021): *Anabaena* sp., *Arthrospira* sp., *Botryococcus* sp., *Chaetoceros* sp., *Chlamydomonas* sp., *Chlorella* sp., *Calothrix* sp., *Chlorococcum* sp., *Desmodesmus* sp., *Dunaliella* sp., *Engelma* sp.,



Haematococcus sp., *Isochrysis* sp., *Microcystis* sp., *Nannochloropsis* sp., *Nostoc* sp., *Pavlova* sp., *Phaeodactylum* sp., *Scenedesmus* sp., *Schizochytrium* sp., *Skeletonema* sp., *Synechocystis* sp., *Tetraselmis* sp. e *Thalassiosira* sp..

Na seção “Processos de Colheita e de Cultivo”, os especialistas responderam duas questões de múltipla escolha para apontar, no escopo dos mercados apontados na seção anterior, quais os processos de cultivo e de colheita de microalgas e cianobactérias mais promissores, considerando o cenário brasileiro no horizonte temporal de 10 anos. As questões foram respondidas usando uma escala Likert de 5 pontos, sendo nota 1 (não é promissor), 2 (pouco promissor), 3 (parcialmente promissor), 4 (promissor) e 5 (altamente promissor).

As questões da seção “Desafios, Oportunidades e Cenários” foram respondidas usando uma escala Likert de 5 pontos, sendo notas 1 (não importante ou não estratégico), 2 (pouco importante ou pouco estratégico), 3 (importante ou estratégico), 4 (mais importante ou mais estratégico) e 5 (extremamente importante ou extremamente estratégico). A escala foi aplicada para avaliar o macroambiente do tema em estudo usando a ferramenta PESTEL e desafios e oportunidades científicos e tecnológicos delineados a partir de brainstorming dos autores deste estudo. Nas duas seções foram incluídos campos abertos para inclusão opcional de observações e apontamentos dos especialistas.

A ferramenta PESTEL combina questões políticas, ambientais, sociais, tecnológicas, econômicas e legais para, a partir de uma abordagem multifacetada, promover a análise do ambiente externo da empresa, ou do tema de pesquisa, no caso deste estudo. Seus resultados são importantes na geração de *inputs* para orientação estratégica, alinhamento de objetivo e metas, além de se tornarem um apoio à tomada de decisões (Song et al. 2017).

As notas dadas às questões das seções “Processos de Colheita e de Cultivo” e “Desafios, Oportunidades e Cenários” foram tabuladas em planilha eletrônica. Inicialmente, as respostas “Não sei opinar” foram excluídas da análise. Posteriormente, a partir da quantidade de respostas válidas (notas de 1 a 5 da escala Likert), foram calculadas as porcentagens proporcionais de incidência de cada nota por item de cada questão.

A praxe do método Delphi é a realização de mais de um ciclo de avaliação, mas Gordon e Pease (2006) destacam que o método não se limita a mais de uma rodada, a depender dos objetivos do estudo e do público-alvo dos resultados. Marques e Freitas (2018) assinalam que não há na literatura científica padrões de corte para atestar a convergência de informações, já que cada pesquisa tem suas especificidades e o maior valor gerado pela aplicação do método Delphi é o conjunto de ideias e *insights* para as próximas etapas de um projeto (Gordon & Pease 2006). Assim, optou-se por realizar apenas uma rodada e sem a adoção de corte de convergência das respostas. Tal decisão se deu pelo caráter exploratório deste estudo e para melhor interpretação dos dados diante do potencial econômico das microalgas e cianobactérias destacadas por outras publicações da Embrapa como Schultz et al. (2021) e Viana et al. (2020).

Por fim, a seção “Finalização” consistiu em duas perguntas abertas para que os especialistas apontassem, segundo sua expertise, oportunidades e gargalos para o protagonismo do Brasil na produção e aplicação industrial de microalgas e cianobactérias. As respostas foram compiladas em uma matriz SWOT, sigla em inglês para *strengths*, *weaknesses*, *opportunities* e *threats*, ou forças, fraquezas, oportunidades e ameaças). Essa matriz apresenta as análises dos ambientes externo (oportunidades e ameaças) e interno (forças e fraquezas) de um tema a partir de dados primários ou secundários. O resultado é uma estratificação do cenário atual do tema em estudo e apresenta elementos que comporão o planejamento estratégico de uma linha de pesquisa ou de uma organização, como é o caso deste estudo, para aprovação e execução de projetos para obter produtos ou serviços competitivos para mercados-alvo (Santos et al. 2018).



Resultados e Discussão

Dos 218 especialistas convidados, 31 aceitaram participar da pesquisa (28 do segmento público/academia e três do setor privado), correspondendo a 14,2% do total. Miles et al. (2016) assinala que não há uma porcentagem mínima de respostas a um Delphi, que depende de fatores como a quantidade de especialistas levantados, perfil do tema de estudo, países/regiões ou mecanismo de coleta de respostas (presenciais ou eletrônicas). Um exemplo similar a este artigo é apresentado no estudo de Haven et al. (2020), que obteve 16% de retorno de um total de 295 especialistas contatados. O perfil acadêmico dos respondentes é composto por profissionais de áreas complementares e transversais entre si: Biotecnologia, Ciências Farmacêuticas, Química, Oceanologia, Engenharias (Agrônômica, de Alimentos, de Pesca, Química), Medicina Veterinária e tecnólogos em Alimentos e em Saneamento Ambiental).

Rumin et al. (2020) e Vieira et al. (2022) apontaram que as microalgas e cianobactérias têm um amplo espectro de aplicações industriais em potencial, como farmacêutico, cosmético, nutracêutico, alimentação animal e humana, bioinsumos, biocombustíveis, biopolímeros, tratamento de águas residuais ou poluídas e mitigação de gases de efeito estufa, com destaque para CO₂. Os respondentes iniciaram o Delphi informando na seção “Mercados e Produtos” os mercados e gêneros taxonômicos que julgaram promissores. Os mercados foram: alimentação humana e animal; farmacêutico e cosmético; e bioinsumos para agricultura. Os gêneros taxonômicos de microalgas e cianobactérias mais promissores segundo os especialistas são: microalgas *Chlorella* sp. e *Dunaliella* sp. e cianobactéria *Arthrospira* sp. As respostas compiladas de cada questão da seção “Mercados e Produtos” foram consolidadas em uma matriz de co-ocorrência e, posteriormente, plotados em um gráfico de barras empilhadas (Gráfico 1).

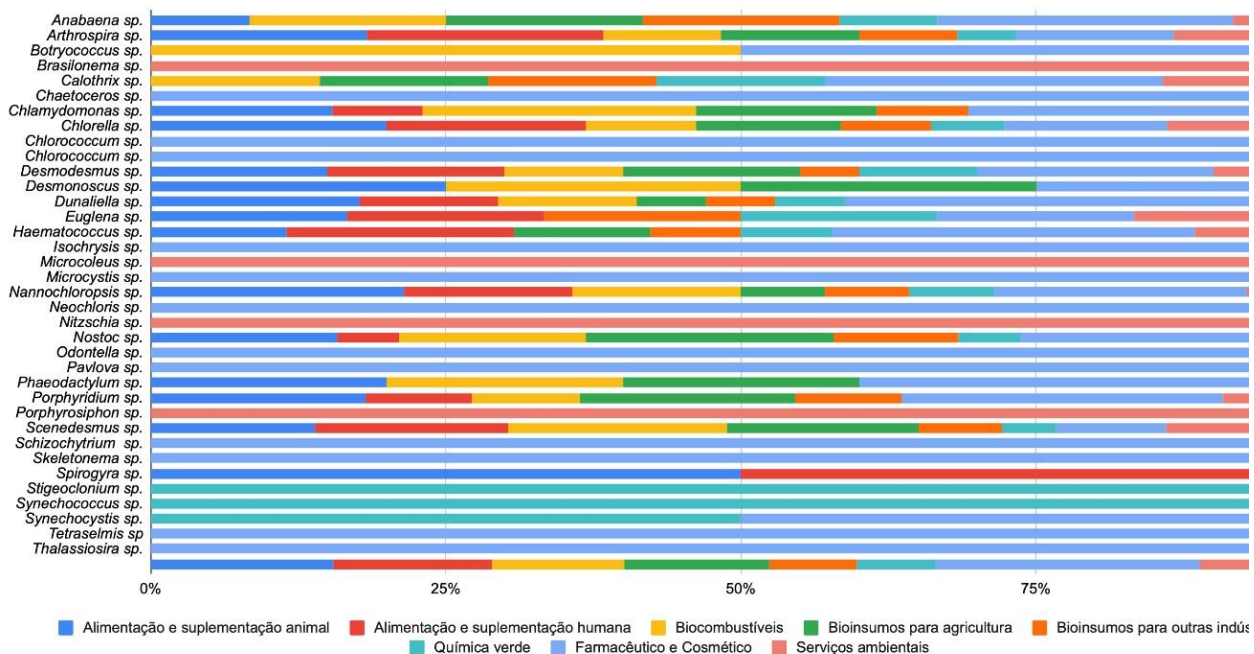


Gráfico 1: Gráfico de barras empilhadas de co-ocorrência dos gêneros taxonômicos de microalgas e cianobactérias com os mercados analisados, segundo os especialistas. Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os gêneros de maior destaque e indicações dos especialistas em todos os oito mercados avaliados são: *Arthrospira* sp., *Chlorella* sp., *Desmodesmus* sp., *Dunaliella* sp., *Haematococcus* sp., *Nostoc* sp. e *Scenedesmus* sp.. Destas, *Chlorella* sp., *Dunaliella* sp., *Arthrospira* sp., *Haematococcus* sp. e *Nannochloropsis* sp. são as principais



microalgas produzidas no mundo, com produtividade de 50 mil toneladas por ano (Vieira et al. 2022). Foram discutidos abaixo os gêneros apontados no Gráfico 1 e conectados com os mercados considerados promissores pelos especialistas (alimentação humana e animal; e farmacêutico e cosmético).

Chlorella sp. e *Arthrospira* sp. destacam-se pelo seu alto teor de proteínas, aminoácidos essenciais e ácidos graxos poliinsaturados e por já serem aprovados para consumo nos EUA e na União Europeia pelas respectivas agências reguladoras (FDA – *Food and Drug Administration* e EFSA – *European Food Safety Authority*). *Dunaliella* sp. tem grande peso pelo seu alto teor de carotenóides, principalmente betacaroteno pelas suas propriedades antioxidantes, corantes, cosméticas e nutracêuticas (Molino et al. 2018).

Os especialistas consultados indicaram outros gêneros promissores: *Desmodesmus* sp., *Nostoc* sp. e *Scenedesmus* sp. Rumin et al. (2020) indicam a relevância científica recente de *Nostoc* sp. para produção de poli-hidroxicarboxilatos e de substâncias antioxidantes e de proteção contra raios UV em cosméticos. Já o estudo de Molino et al. (2018) indicou que a biomassa seca de *Scenedesmus almeriensis* contém alta quantidade de ácido palmítico, ácido oleico e ácido gama-linoleico, todos com propriedades nutracêuticas. *Desmodesmus* sp. é uma fonte importante de proteínas e de indicadores de biodisponibilidade proteica (alto valor biológico, coeficiente de digestibilidade, aproveitamento líquido de proteína e razão de eficiência proteica), além de ser resistente a condições desfavoráveis de cultivo. Com isso, *Desmodesmus* sp. se torna apta para cultivo em larga escala e em tanques abertos e de grande potencial para uso em sistemas de biorrefinarias (Radkova et al. 2019; Ferreira et al. 2021).

O potencial de microalgas e cianobactérias para o segmento farmacêutico é estudado desde os anos 1950 com a extração e purificação de moléculas e posterior avaliação *in vitro*. As microalgas e as cianobactérias são ativos biotecnológicos de elevado grau inovador para produção de moléculas de alto valor agregado para os segmentos farmacêutico e cosmético, como proteínas recombinantes, polissacarídeos, lipídeos e corantes, mas ainda em escala de bancada (*in vitro*) (Rumin et al. 2020). Já foram avaliados moléculas provenientes de biomassa algal com ação antimicrobiana como bromofenóis, terpenóides e cianotoxinas (nodularina, saxitoxina, ácido ocadaico); ação antineoplásica, como as cianotoxinas citoficina e acutificina para tratamento de carcinoma nasofaríngeo e acutificina para tratamento de carcinoma de Lewis (pulmonar) (Borowitzka, 1995). Assim, Estes dados ratificam o apontamento dos respondentes sobre os mercados farmacêutico e cosmético, com maior incidência na co-ocorrência e indicação de gêneros apenas para esses segmentos: *Chaetoceros* sp., *Chlorococcum* sp., *Isochrysis* sp., *Microcystis* sp., *Neochloris* sp., *Odontella* sp., *Pavlova* sp., *Schizochytrium* sp., *Skeletonema* sp., *Tetraselmis* sp. e *Thalassiosira* sp..

O segundo mercado com maior incidência na co-ocorrência é o de alimentação e suplementação animal, com destaque para *Chlorella* sp., já apontado por Schultz et al. (2021), com destaque também para *Arthrospira* sp., *Scenedesmus* sp. segundo os respondentes. Avaliações nutricionais e toxicológicas demonstraram a adequação da biomassa de microalgas e cianobactérias como componente de ração animal ou substituto de fontes proteicas usuais do mercado, como biomassa de *Arthrospira platensis* para substituir pólen para abelhas melíferas (Ricigliano & Simone-Finstrom 2020). O segmento pecuário de destaque é a aquicultura (Molino et al. 2018; Rumin et al. 2020), já indicado pelos especialistas na primeira seção do Delphi.

Na seção de processos de colheita e de cultivo, os respondentes avaliaram as opções listadas de processos de colheita e de cultivo de microalgas e cianobactérias no cenário brasileiro no horizonte temporal de 10 anos para atender os mercados apontados na primeira questão da primeira seção. Usou-se a escala Likert de 5 pontos para classificar cada opção entre as notas 1 (não é promissor), 2 (pouco promissor), 3 (parcialmente promissor), 4 (promissor) a 5 (altamente promissor). Os dados obtidos foram tratados conforme descrito em “Materiais e



Métodos”. Os dados estão apresentados a seguir em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”.

Para os mercados selecionados pelos respondentes, há convergência de processos de cultivo tanque *raceway*, fotobiorreator tubular, fotobiorreator *airlift*, sistemas híbridos, fermentadores e fotobiorreator de placas planas como altamente promissores, a depender da espécie-alvo, do bioproduto de interesse e respectivo mercado e do custo-benefício (Tabela 1). Um dos especialistas apontou que os fotobiorreatores *airlift* são muito propensos a causar cisalhamento e rompimento celular.

Em sentido contrário, o processo de cultivo de lagoas abertas teve convergência para a nota 2 na escala Likert (pouco promissor) e alta dispersão nas outras opções de resposta (Tabela 1). Lagoas abertas, apesar de terem menor custo de construção, não utilizam terras agricultáveis, são de fácil manutenção e têm baixo gasto energético, são facilmente contamináveis, têm baixa produtividade de biomassa e se aplicam a poucas espécies (Sarma et al. 2021). Assim, suscita-se que lagoas abertas produzam biomassa inadequada para atender os mercados avaliados neste estudo, que exigem maior pureza e pouca contaminação para o posterior processamento industrial a custos competitivos.

Tabela 1: Processos de cultivo em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”

Processo de cultivo	5 (altamente promissor)	4 (promissor)	3 (parcialmente promissor)	2 (pouco promissor)	1 (não é promissor)
Tanque <i>raceway</i>	74,1%	11,1%	0,0%	7,4%	7,4%
Fotobiorreator tubular	56,7%	20,0%	13,3%	3,3%	6,7%
Fotobiorreator <i>airlift</i>	51,9%	18,5%	18,5%	3,7%	7,4%
Sistemas híbridos	42,9%	28,6%	14,3%	10,7%	3,6%
Fermentadores	34,5%	20,7%	17,2%	10,3%	17,2%
Fotobiorreator de placas planas	33,3%	25,9%	22,2%	7,4%	11,1%
Lagoas abertas	20,0%	20,0%	20,0%	26,7%	13,3%

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os sistemas de colheita de centrifugação, floculação e floculação-flotação têm maiores porcentagem de convergência para “altamente promissor”, segundo os respondentes para os mercados em análise. Numa perspectiva contrária, o sistema de colheita por filtração natural apresentou maior convergência para “não é promissor” (Tabela 2).



Tabela 2: Processos de colheita em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas "5"

Processos de colheita	5 (altamente promissor)	4 (promissor)	3 (parcialmente promissor)	2 (pouco promissor)	1 (não é promissor)
Centrifugação	50,0%	20,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Floculação	40,7%	14,8%	29,6%	7,4%	11,1%
Floculação-Flotação	40,7%	22,2%	29,6%	3,7%	3,7%
Flotação com coagulantes	37,0%	14,8%	37,0%	11,1%	0,0%
Eletrofloculação	26,1%	30,4%	8,7%	30,4%	4,3%
Sedimentação Gravitacional	22,2%	11,1%	25,9%	18,5%	22,2%
Filtração natural	17,9%	21,4%	17,9%	17,9%	25,0%
Filtração sob pressão	15,4%	23,1%	26,9%	15,4%	19,2%
Eletrocoagulação	9,1%	27,3%	27,3%	31,8%	4,5%

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Centrifugação é um método rápido, com alta eficiência na colheita e adequada a todas as espécies de microalgas e cianobactérias e é mais vantajoso para obtenção de produtos de maior valor agregado, mas tem alto custo de operação, até US\$ 13,20 por litro e pode gerar a lise celular a velocidades altas de rotação (Shen et al. 2009; Barros et al. 2015; Sarma et al. 2021). Já a floculação tem baixo custo de operação, US\$ 2,64 por litro e, pela alta disponibilidade de diversos tipos de floculantes no mercado, pode diminuir ainda mais seus custos. No entanto, uma especialista consultada nesta pesquisa ressaltou que a floculação envolve a inclusão de um produto extra no processo de colheita que pode conter metais que exigem a posterior remoção e ainda correr o risco de a microalga absorver tais metais (Lu et al. 2023)

A tecnologia de filtração tem alta eficiência na colheita (até 90%) e na separação de biomassa de mais de uma espécie de microalga ou cianobactéria, tem baixo custo de operação (até US\$ 5,28 por litro), mas é mais adequada a espécimes com tamanho celular maior, como os dos gêneros *Chroococcidiopsis* sp. e *Cyanotheca* sp. (Shen et al. 2009; Barros et al. 2015; Graham et al. 2016). Métodos em que processos elétricos como eletrofloculação e eletrocoagulação, indicados pelos especialistas como pouco promissores, podem ser usados para diversas espécies, mas são métodos de alto custo e pouco disseminados no mercado (Barros et al. 2015). Os mesmos autores apontam que a sedimentação gravitacional tem baixo custo, mas exige tempo alto para seu uso e, com isso, ter o risco de deterioração da biomassa.

Outro especialista frisou que a escolha do sistema de colheita depende da espécie, do recurso disponível e dos produtos-alvo do produtor. Tal afirmação é corroborada por Barros et al. (2015), que frisam que os sistemas de colheita representam até 30% do custo de cultivo de microalgas e cianobactérias e que ainda não há soluções tecnológicas robustas e ambientalmente sustentáveis que sejam economicamente viáveis. Assim, suscita-se que



a grande variação nas respostas sobre processos de cultivo e de colheita permite inferir que o mercado de microalgas e cianobactérias ainda tem campo para execução de atividades científicas com foco em desenvolvimento tecnológico.

Na seção de desafios e oportunidades, os respondentes avaliaram as opções listadas de desafios e oportunidades científicos e tecnológicos para aproveitamento de microalgas e cianobactérias no cenário brasileiro no horizonte temporal de dez anos para atender os mercados apontados na primeira questão da seção anterior. A Tabela 3 apresenta cada opção de desafios e oportunidades em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”, a partir da escala Likert de 5 pontos para classificar cada opção entre as notas 1 (não importante), 2 (pouco importante), 3 (importante), 4 (mais importante) e 5 (extremamente importante). Em seguida, os dados foram tratados conforme descrito em “Materiais e Métodos”.

Tabela 3: Desafios e oportunidades em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5”

Critério	5 (extremamente importante)	4 (mais importante)	3 (importante)	2 (pouco importante)	1 (não importante)
Estabilidade no suprimento de biomassa de microalgas e cianobactérias para aplicação industrial	71,0%	22,6%	0,0%	3,2%	3,2%
Capacitação de mão de obra em tecnologias de cultivo e processamento da biomassa de microalgas e cianobactérias	71,0%	19,4%	3,2%	6,5%	0,0%
Incentivos legais e/ou fiscais à adoção de tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias pela iniciativa privada e pelo terceiro setor	70,4%	25,9%	3,7%	0,0%	0,0%
Desenvolvimento de programas para indução científica e tecnológica para viabilização das tecnologias baseadas em microalgas e cianobactérias	69,0%	17,2%	6,9%	3,4%	3,4%
Uso de microalgas e cianobactérias como fontes de produtos de alto valor agregado (carotenóides, PUFA, polímeros etc.)	67,9%	21,4%	7,1%	3,6%	0,0%
Desenvolvimento tecnológico e expansão de cadeias produtivas e de suprimentos	67,7%	22,6%	6,5%	3,2%	0,0%
Escalonamento de processos de cultivo	66,7%	16,7%	16,7%	0,0%	0,0%
Viabilização de sistemas de produção para fornecimento de biomassa algal no mercado nacional	64,5%	32,3%	3,2%	0,0%	0,0%



Aproveitamento de coprodutos e resíduos algais para integração de processos produtivos em conceito de biorrefinarias	64,3%	28,6%	3,6%	3,6%	0,0%
Reuso de águas poluídas, contaminadas ou residuais de outros processos agroindustriais (vinhaça, manipueira, POME, chula etc.) no cultivo de microalgas e cianobactérias	62,1%	20,7%	10,3%	3,4%	3,4%
Desenvolvimento de pesquisas para substituição de matérias-primas não renováveis (petroquímicos) por biomassa de microalgas e cianobactérias	60,0%	20,0%	13,3%	3,3%	3,3%
Construção de Análises de Ciclo de Vida de processos utilizando microalgas e cianobactérias, para subsidiar entrada no mercado de carbono	57,7%	15,4%	19,2%	3,8%	3,8%
Uso de microalgas e cianobactérias na biofixação e mitigação de CO ₂ visando a redução da concentração na atmosfera	57,1%	25,0%	10,7%	3,6%	3,6%
Uso de ferramentas “ômicas” (genômica, transcriptômica, proteômica, metabolômica e lipidômica) no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras para os diferentes mercados	53,6%	21,4%	17,9%	0,0%	7,1%
Uso de ferramentas de edição gênica no melhoramento genético e no desenvolvimento de cepas promissoras para aproveitamento industrial	53,6%	17,9%	25,0%	0,0%	3,6%
Uso de microalgas e cianobactérias geneticamente modificadas como biofábricas para produção heteróloga de enzimas e outras proteínas	37,0%	25,9%	29,6%	3,7%	3,7%

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em seguida, os respondentes avaliaram indicadores macroambientais (tópicos políticos, ambientais, sociais, tecnológicos, econômicos e legais) que impactam nas tendências de futuro para PD&I de microalgas e cianobactérias num horizonte temporal de 10 anos no Brasil. A Tabela 4 apresenta cada tópico avaliado e listado em ordem decrescente de porcentagem de respostas notas “5” numa escala Likert de 5 pontos, com notas 1 (não estratégico), 2 (pouco estratégico), 3 (estratégico), 4 (mais estratégico) ou 5 (extremamente estratégico).



Tabela 4: Respostas à ferramenta PESTEL ordem decrescente de porcentagem de respostas notas "5"

Indicadores macroambientais	5 (extremamente estratégico)	4 (mais estratégico)	3 (estratégico)	2 (pouco estratégico)	1 (não estratégico)
Aumento das viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias	77,8%	18,5%	3,7%	0,0%	0,0%
Uso de águas não potáveis e reuso de águas residuais (água salobra, efluentes domésticos, efluentes industriais etc.) no cultivo	74,2%	16,1%	3,2%	3,2%	3,2%
Aumento da disponibilidade de recursos para investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação	73,3%	23,3%	3,3%	0,0%	0,0%
Menor ocupação de espaço para cultivo, incluindo cultivo vertical e áreas não agricultáveis	73,3%	13,3%	3,7%	6,7%	0,0%
Diversificação de biomassa para atender demandas industriais	71,0%	16,1%	12,9%	0,0%	0,0%
Alto custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil para obtenção de produtos	70,0%	16,7%	13,3%	0,0%	0,0%
Disponibilização de produtos de microalgas no mercado brasileiro com preços acessíveis ao consumidor	70,0%	20,0%	6,7%	3,3%	0,0%
Inclusão e fortalecimento de microempresas, pequenas empresas e de startups no mercado produtoras de bioprodutos à base de biomassa algal	65,5%	27,6%	3,4%	0,0%	3,4%
Aumento da demanda consumidora crescente por produtos de origem natural	64,5%	22,6%	12,9%	0,0%	0,0%
Automatização e impacto da Indústria 4.0 no cultivo, colheita e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias	63,3%	13,3%	10,0%	6,7%	6,7%



Aumento da pressão mundial por processos agropecuários mais sustentáveis	60,0%	20,0%	13,3%	0,0%	6,7%
Criação de políticas públicas para mitigação de emissões de gases de efeito estufa	58,1%	32,3%	3,2%	6,5%	0,0%
Fortalecimento do mercado de créditos de carbono	56,7%	33,3%	10,0%	0,0%	0,0%
Aumento do consumo de bioprodutos de microalgas ou desenvolvimento de novos hábitos do consumidor resultando no aumento do consumo de de bioprodutos de microalgas e cianobactérias	55,2%	31,0%	10,3%	0,0%	3,4%
Aumento da demanda consumidora crescente por produtos e processos produtivos com certificação ambiental	54,8%	22,6%	16,1%	6,5%	0,0%
Aumento do impacto do programa RenovaBio para a segurança energética, metas e créditos de descarbonização	51,9%	37,0%	11,1%	0,0%	0,0%
Dependência de importação de biomassa e de produtos derivados de microalgas e cianobactérias	44,8%	24,1%	13,8%	13,8%	3,4%
Dificuldade para desregulamentação de organismos geneticamente modificados (OGM) para comercialização	28,6%	35,7%	17,9%	14,3%	3,6%
Oscilação no preço do petróleo	20,7%	48,3%	6,9%	10,3%	13,8%
Alta resistência pelo mercado consumidor ao consumo de organismos geneticamente modificados (OGM)	17,2%	34,5%	20,7%	17,2%	10,3%

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A última seção, de Finalização, consistiu em duas perguntas abertas para que os especialistas apontassem, segundo sua expertise, oportunidades e gargalos para o protagonismo do Brasil na produção e aplicação industrial de microalgas e cianobactérias. As respostas às duas perguntas foram tratadas e consolidadas em uma matriz SWOT (Tabela 5), ferramenta importante para dar subsídios para analisar o posicionamento de uma organização, de uma solução tecnológica ou de um país em um mercado-alvo (Miles et al. 2016).



Tabela 5. Matriz SWOT*

	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
AMBIENTE EXTERNO	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolvimento de sistemas automatizados e monitoramento remoto para cultivo; • Estabelecimento de biorrefinarias que processam matérias-primas da biodiversidade brasileira e que também processem as microalgas; • Uso na agricultura devido ao aumento dos custos dos insumos tradicionais e como biomassa para biocombustíveis; • Desenvolvimento de fármacos (suplementos, óleos, antioxidantes) e uso em proteção e recuperação ambiental; • Substituição de componentes de produtos farmacêuticos, cosméticos, e de suplementos alimentares importados com base em algas, por produtos nacionais; • Mercado interessado em novas fontes de bioprodutos; • Uso industrial da biomassa após biorremediação de efluentes industriais e de esgotos domésticos; • Mitigação das emissões de CO₂ e bioeconomia, com destaque para o uso agrícola de produtos à base de microalgas eficientes na mitigação dos estresses ambientais nos cultivos agrícolas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Barreiras regulatórias no processo produtivo e no aproveitamento industrial; • Ainda faltam estudos mais aprofundados de viabilidade técnica para cultivos em grande escala e de biorrefinarias; • Não há tecnologias nacionais desenvolvidas para aplicação em grande escala das microalgas, seja para o cultivo, para a colheita e para a extração de biocompostos; • Poucas empresas produtoras de biomassa de microalgas no Brasil; • Falta de políticas públicas de incentivo à adoção do uso da biomassa de microalgas; • Dificuldade de competir em custos com China e Índia.
	FORÇAS	FRAQUEZAS
AMBIENTE INTERNO	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade de profissionais com alta qualificação acadêmica; • O Brasil tem uma biodiversidade imensa de microalgas e cianobactérias ainda desconhecida para aplicações na indústria; • Clima favorável e luz disponível a maior parte do dia e durante o ano todo e a temperatura elevada, principalmente no Nordeste; 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de comunicação com o setor acadêmico e produtivo para estimular o uso de microalgas e cianobactérias; • Falta de investimento, pesquisa e treinamento de profissionais especializados no escalonamento e na implementação dos processos produtivos em escala industrial; • Desconhecimento dos potenciais das microalgas e cianobactérias pelo próprio setor industrial brasileiro;



	<ul style="list-style-type: none"> Disponibilidade de terra e de áreas pouco agricultáveis para expansão do cultivo de microalgas e cianobactérias. 	<ul style="list-style-type: none"> Não há no mercado nacional equipamentos específicos para microalgas e cianobactérias; Disponibilidade de muitas soluções tecnológicas em escala laboratorial e poucos em escala piloto ou industrial aptos para transferência da tecnologia.
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O incentivo às ações de PD&I com maior alocação de recursos e valorização da ciência, juntamente com a conexão das microalgas e cianobactérias com bioeconomia e com desenvolvimento sustentável, dominaram as respostas obtidas na Tabela 4. Notou-se predominância de respostas do setor público e/ou da academia (universidades e institutos de pesquisa) e apenas 10% de respostas do setor privado, ratificado pelo indicador macroambiental “Aumento da disponibilidade de recursos para investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação” (Tabela 4) e pela fraqueza “Falta de comunicação com o setor acadêmico e produtivo para estimular o uso de microalgas e cianobactérias” na matriz SWOT (Tabela 5).

No modelo da hélice tríplice, um ecossistema de inovação é composto pelo relacionamento mútuo entre governo, empresas e instituições de ciência e tecnologia (ICT), em quase sua totalidade composto por universidades públicas e instituições como Embrapa e Fiocruz. As atividades de ciência e tecnologia são executadas pelas ICT, cujos resultados obtidos, prototipados e validados passam pelo processo de transferência formal por licenciamento ou fornecimento da invenção para escalonamento e finalização nas empresas, responsáveis por lançar no mercado. Tal fluxo é mediado pelo governo, que tem o papel de catalisar a relação empresa-ICT por meio de legislações e mecanismos de controle de mercado e defesa da concorrência (Closs & Ferreira, 2012; Dias & Porto, 2013; Fanhaimpork & Melo, 2023).

No ecossistema de inovação, empresas e ICT têm relação de dependência mútua, com aportes financeiros e econômicos em contrapartida entre si para codesenvolvimento e cocriação de soluções tecnológicas. No entanto, o cenário de falta de articulação entre políticas industriais e governamentais apontado Closs e Ferreira (2012) continua vigente, reforçado pela falta de articulação entre pesquisadores do ICT e demandas do mercado (Dias & Porto, 2013), que suscitam a maciça participação de especialistas de ICT em detrimento de instituições privadas e prejudica uma cultura de empreendedorismo científico para que inovações cheguem à sociedade (Amorim et al. 2019).

O desenvolvimento de microalgas e cianobactérias geneticamente modificadas (OGM), incluindo o melhoramento genético por ferramentas de edição gênica como CRISPR/Cas9, foi um destaque no estudo de Rumin et al. (2020). No entanto, esses autores suscitaram que ainda não há, na Europa, a exploração comercial de microalgas e cianobactérias OGM e muito menos alguma atividade científica e tecnológica em escala piloto ou industrial, que provavelmente é extensiva a outros continentes.

Os respondentes deste estudo atribuem a esse cenário negativo a baixa quantidade de profissionais para o *scale up* dos processos de cultivo, baixa conexão entre academia e indústria e falta de estudos aprofundados de viabilidade técnica para cultivos em escala industrial. Esses apontamentos podem justificar a baixa convergência de critérios que envolvem OGM e edição gênica tanto na Tabela 3 (desafios e oportunidades) quanto na Tabela 4 (indicadores macroambientais). As observações dos especialistas, em uma análise ampla, ratificam o que já está disponível na literatura científica. Enzing et al. (2016) apontam que um clima favorável (tropical e de



temperaturas altas) e com alta insolação são os ideais para cultivo de microalgas e cianobactérias e posterior disponibilidade de biomassa para aproveitamento industrial, condição contrária da Europa.

A quantidade de processos industriais de beneficiamento de algas em escala comercial é incipiente se comparar com outras fontes biotecnológicas como plantas superiores, bactérias, fungos filamentosos e leveduras (Vieira et al. 2022). Os respondentes também indicaram gargalos que complementam Vieira et al. (2022) e Lu et al. (2023): alta disponibilidade de cientistas e baixa de profissionais para o *scale up* dos processos de cultivo, que está intimamente ligada à gestão do conhecimento; baixa conexão entre academia e indústria, que gera falhas na comunicação; e falta de estudos aprofundados de viabilidade técnica para cultivos em escala industrial.

De forma complementar, Lu et al. (2023) afirmam que a dissonância entre academia e indústria limita o avanço do desenvolvimento de tecnologias da escala de bancada para as escalas piloto e industrial, que, por conseguinte, diminuirá os custos finais da biomassa para aplicação em qualquer segmento industrial e aumentará as viabilidades técnica e econômica, que também é corroborado pelos respondentes como ameaças. Vieira et al. (2022) inclui como outra fraqueza a falta de gestores com capacitação técnica adequada para garantir o gerenciamento e funcionamento das plantas industriais.

O desafio “Capacitação de mão de obra em tecnologias de cultivo e processamento da biomassa de microalgas e cianobactérias” foi reforçado tanto pelos especialistas quanto por Vieira et al. (2022) como força e como fraqueza. Representa uma força pela disponibilidade de profissionais qualificados por universidades e instituições de ciência e tecnologia no Brasil, mas também é uma fraqueza pela falta de profissionais especialistas para estruturação das escalas industriais de cultivo e de beneficiamento da biomassa algal. Essa fraqueza, inclusive, pode ser uma das justificativas para a quantidade menor de respondentes que se classificaram como “especialistas”. Vieira et al. (2022) inclui como outra fraqueza a falta de gestores com capacitação técnica adequada para garantir o funcionamento das plantas industriais.

O estudo de Viana et al. (2020) já assinalou a necessidade de aumento de escala de cultivo para favorecimento de um produto de alto valor agregado (betacaroteno de *Dunaliella* sp.) e que ratifica outros indicadores macroambientais como “Diversificação de biomassa para atender demandas industriais”, “Alto custo de produção e processamento de biomassa de microalgas e cianobactérias no Brasil para obtenção de produtos” e “Disponibilização de produtos de microalgas no mercado brasileiro com preços acessíveis ao consumidor”. Rashid et al. (2013) assinalaram como outra ameaça a inexistência de rotas tecnológicas consolidadas para o aproveitamento de biomassa de microalgas e cianobactérias.

O indicador macroambiental “Aumento das viabilidades técnica e econômica que garantam a sustentabilidade dos processos produtivos baseados em microalgas e cianobactérias” está na matriz SWOT como ameaça ao ambiente externo que, quando atendido, gerará competitividade ao Brasil no mercado mundial de microalgas e cianobactérias a custos competitivos e economicamente viável. A versatilidade metabólica das microalgas e cianobactérias, juntamente com o potencial agropecuário do Brasil, políticas públicas associadas e a possibilidade de diversificar matérias-primas geram oportunidades para o uso da biomassa algal e estimular investimentos no desenvolvimento de tecnologias para fortalecer as forças e as oportunidades e mitigar as ameaças e fraquezas listados na matriz SWOT (Scur & Queiroz 2017; Bueno & Torres, 2022).

Considerações Finais

O incentivo às ações de PD&I com maior alocação de recursos e valorização da ciência, juntamente com a conexão entre microalgas e cianobactérias com bioeconomia e com desenvolvimento sustentável, dominaram as respostas aos indicadores macroambientais indicados pelos especialistas.



Denota-se que as microalgas e cianobactérias têm potencial de expansão em diversos mercados nos próximos 10 anos, tanto pela expansão do mercado de algas no mundo quanto pelas condições climáticas e disponibilidade de terras para o cultivo. Com isso, as algas seriam biomassas competitivas com outros microrganismos consolidados (bactérias e fungos) para fortalecer o mercado nacional e diminuir a dependência de importação em diversos mercados, com destaque para os segmentos de alimentação humana, alimentação animal, farmacêutico e cosmético. Com isso, a Plataforma Industrial de Algas tem um grande leque de oportunidades para desenvolvimento de soluções tecnológicas e que se encontra ainda em etapas de pesquisa e desenvolvimento para avançar de um funil de inovação.

No entanto, a baixa conexão entre academia e mercado, refletido na quantidade de especialistas prospectados para este estudo, foi considerado um empecilho importante para o mercado brasileiro ao não ter canais para avanço na escala de maturidade de soluções tecnológicas, da bancada do laboratório ao mercado. O aumento do investimento em PD&I e de fomento a pequenas empresas foram considerados os caminhos para tornar o uso de microalgas e cianobactérias economicamente viáveis.

Por fim, os especialistas consideraram que o Brasil tem grande potencial para se destacar no mercado de microalgas e cianobactérias, como já tem para outros microrganismos, mas faltam incentivos monetários, formação de profissionais para escalonamento de cultivo para oferta de biomassa para incluir o país no mercado internacional a preços competitivos nos próximos dez anos. O destrinchamento dos mercados avaliados é a próxima etapa da evolução deste estudo, para afinar informações e apresentar informações de cunho estratégico às instituições brasileiras de ciência e tecnologia.

Referências

Acién FG, Fernández JM, Molina E. 2018. Contribución de las microalgas al desarrollo de la bioeconomía. In Aguilar A, Ramón D, Egea FJ (Coord.). Bioeconomía y desarrollo sostenible. Almería, Cajamar Caja Rural, p. 309-331.

Amorim GM, Pires EA, Santos FL 2019. Desafios na Transferência de Tecnologia Universidade-Empresa: um relato de experiência do Núcleo de Transferência de Tecnologia da UFRB. Cadernos de Prospecção 12(1): 59-78. Available from: <http://dx.doi.org/10.9771/cp.v12i1.27265>.

Anjos SSN 2020. Análise prospectiva da produção científica de valoração econômica de biotecnologia entre os anos de 1945 e 2019. Revista de Economia da UEG (16)2: 71-86. Available from: <https://www.revista.ueg.br/index.php/economia/article/view/10411>.

Andrade KMP 2017. Bioeconomia: um estudo das vocações, fragilidades e possibilidades para o desenvolvimento no estado do Amazonas. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 185 pp.

Barros AI, Gonçalves AL, Simões M, Pires JCM 2015. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 41: 1489–1500. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037>.



- Borowitzka MA 1995. Microalgae as sources of pharmaceuticals and other biologically active compounds. *Journal of Applied Phycology* 7(1): 3-15. Available from: <https://doi.org/10.1007/BF00003544>.
- Borschiver S, Silva ALR 2016. Technology roadmapping: planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia. Interciência, Rio de Janeiro, 120 pp.
- Brasil. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Ementa: Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. Available at: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10375.htm.
- Bueno AMC, Torres, DAP 2022. Experiências recentes da União Europeia e dos Estados Unidos em bioeconomia e oportunidades para o Brasil. *Revista Tempo do Mundo* 28: 177-208. Available from: <https://doi.org/10.38116/rtm28art7>.
- Closs LQ, Ferreira GC 2012. A transferência de tecnologia universidade-empresa no contexto brasileiro: uma revisão de estudos científicos publicados entre os anos 2005 e 2009. *Gestão & Produção* 19(2): 419-432. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000200014>.
- Dias AA, Porto GS 2013. Gestão de Transferência de Tecnologia na Inova Unicamp. *Revista de Administração Contemporânea* 17(1): 263-284. Available from: <https://doi.org/10.1590/S1415-65552013000300002>.
- Enzing C, Ploeg M, Barbosa M, Sijtsma L 2014. Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 78 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.2791/3339>.
- Fanhaimpork D, Melo DRA 2023. Mapeamento do Ambiente da Transferência de Tecnologia nas Universidades Brasileiras. *Cadernos de Prospecção* 16(4): 1256-1273. Available from: <https://doi.org/10.9771/cp.v16i4.50520>.
- Ferreira GF, Ríos Pinto LF, Carvalho PO, Coelho MB, Eberlin MN, Maciel Filho R, Fregolente LV 2021. Biomass and lipid characterization of microalgae genera *Botryococcus*, *Chlorella*, and *Desmodesmus* aiming high-value fatty acid production. *Biomass Conversion and Biorefinery* (11): 1675–1689. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00566-3>.
- Gois AB, Issifou M, Anjos SSN 2022. Responsabilidade socioambiental e desenvolvimento sustentável. In: Freire FS, Silva CAT, Gomes SMS, Sardeiro LSM (Org.). *Contabilidade Socioambiental*. Curitiba, Juruá, p. 15-44.
- Gordon T., Pease A 2006. RT Delphi: An efficient, “round-less” almost real time Delphi method. *Technological Forecasting and Social Change* v. 73, (4), 321-333. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.09.005>.
- Graham LE, Graham JM, Wilcox LW, Cook ME 2016. *Algae*. LJLM Press, Madison, 689 p.
- Hariskos I, Posten C 2014. Biorefinery of microalgae – opportunities and constraints for different production scenarios. *Biotechnology Journal* 9: 739–752. Available from: <https://doi.org/10.1002/biot.201300142>.



Haven TL, Errington TM, Gleditsch KS, Van Grootel L, Jacobs AM, Kern FG, Piñeiro R, Rosenblatt F, Mokkink LB 2020. Preregistering Qualitative Research: A Delphi Study. *International Journal of Qualitative Methods* 19. Available from: <https://doi.org/10.1177/1609406920976417>.

Lu Q, Lu Y, Yang L 2023. Challenging problems of applying microalgae for aquaculture environment protection and nutrition supplementation: A long road traveled and still a far way to go. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 11: e1151440. Available from: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1151440>.

Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). O Programa Nacional de Bioinsumos. [2024]. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa>

Marques JBV, Freitas D 2018. Método DELPHI: caracterização e potencialidades na pesquisa em Educação. *Pro-Posições* 29(2): 389-415. Available from: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-6248-2015-0140>.

Miles I, Saritas O, Sokolov A 2016. *Foresight for Science, Technology and Innovation*. Springer Nature, Cham, 279 p.

Molino A, Iovine A, Casella P, Mehariya S, Chianese S, Cerbone A, Rimauro J, Musmarra D 2018. Microalgae Characterization for Consolidated and New Application in Human Food, Animal Feed and Nutraceuticals. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15: e2436. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijerph15112436>.

Pärli R, Fischer M 2020. Implementing the Agenda 2030 – what is the role of forums? *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 27(5): 443-457. Available from: <https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1719546>.

Popper R 2008. Foresight Methodology. In Georghiou L, Cassingena J, Keenan M, Miles I, Popper R (Org). *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*. Edward Elgar, Cheltenham, p. 44-88.

Raheem A, Prinsen P, Vuppaladadiyam AK, Zhao M, Luque R 2018. A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: Recent developments. *Journal of Cleaner Production* 181: 42-59. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.125>.

Rashid N, Rehman MSU, Han J-I 2013. Recycling and reuse of spent microalgal biomass for sustainable biofuels. *Biochemical Engineering Journal* 75: 101-107. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2013.04.001>.

Radkova M, Stoyneva-Gärtner M, Dincheva I, Stoykova P, Uzunov B, Dimitrova C, Gärtner G 2019. *Chlorella vulgaris* H1993 and *Desmodesmus communis* H522 for low-cost production of high-value microalgal products. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 33(1): 243-249. Available from: <https://doi.org/10.1080/13102818.2018.1562381>.

Ricigliano VA, Simone-Finstrom M 2020. Nutritional and prebiotic efficacy of the microalga *Arthrospira platensis* (spirulina) in honey bees. *Apidologie* 51: 898–910. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00770-5>.



Rumin J, Nicolau E, Oliveira Junior RG, Fuentes-Grünewald C, Picot L 2020. Analysis of Scientific Research Driving Microalgae Market Opportunities in Europe. *Marine Drugs* 18(5): e264. Available from: <https://doi.org/10.3390/md18050264>.

Santos LCX, Andreato NSA, Anjos SSN, Ferreira EA, Gris EF, Martin AR 2018. Análise prospectiva da patente “Processo para a Aplicação da Biomineralização na Melhoria de Solos” – PI 1001279-6: estudo de viabilidade de patente brasileira por meio de informetria. *Cadernos de Prospecção* 11(4): 1182-1198. Available from: <https://doi.org/10.9771/cp.v11i4.27241>.

Sarma S, Sharma S, Rudakiya D, Upadhyay J, Rathod V, Patel A, Narra M 2021. Valorization of microalgae biomass into bioproducts promoting circular bioeconomy: a holistic approach of bioremediation and biorefinery. *3 Biotech* 11: e378. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02911-8>.

Scur G, Queiroz RP de 2017. O impacto da diversificação na estratégia de operações de empresas de bens de capital. *Gestão & Produção* 24(2): 206-220. Available from: <https://doi.org/10.1590/0104-530X1048-13>.

Shen Y, Yuan W, Pei ZJ, Wu Q, Mao E 2009. Microalgae Mass Production Methods. *Transactions of the ASABE* 52(4): 1275-1287. Available from: <https://doi.org/10.13031/2013.27771>.

Show PL 2022. Global market and economic analysis of microalgae technology: Status and perspectives. *Bioresource Technology* 357: e127329. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127329>.

Schultz EL, Quintino RP, Anjos SSN 2021. Estudo prospectivo de tecnologias baseadas na biomassa de microalgas e cianobactérias: abordagens bibliométrica e patentométrica. Embrapa Agroenergia, Brasília, 59 p.

Silva SC, Ferreira ICFR, Dias MM, Barreiro MF 2020. Microalgae-Derived Pigments: A 10-Year Bibliometric Review and Industry and Market Trend Analysis. *Molecules*, 25: e3406. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules25153406>.

Song J, Sun Y, Jun L 2017. PESTEL analysis of the development of the waste-to-energy incineration industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80: 276-289. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.066>.

Viana NM, Santos AC, Anjos SSN, Miranda CHB 2020. Caracterização do mercado de betacaroteno a partir da microalga *Dunaliella* sp. In: Mendonça S, Salum, THC. *Anais do VI Encontro de Pesquisa e Inovação da Embrapa Agroenergia*. Embrapa Agroenergia, Brasília, p. 22-28.

Vieira VV, Cadoret J-P, Acien FG, Benemann J 2022. Clarification of Most Relevant Concepts Related to the Microalgae Production Sector. *Processes*, 10(1): e175. Available from: <https://doi.org/10.3390/pr10010175>.