



Perspectivas de produção de biogás a partir de microalgas visando a economia circular: uma análise bibliométrica

Gabriela dos Santos Castro¹
Leonardo Motta da Costa Silva²
Luciani de Liz Souza³
Jeane de Almeida do Rosário⁴

Resumo

O aumento da demanda energética global e os impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis têm estimulado o desenvolvimento de fontes renováveis, como a bioenergia. As microalgas destacam-se como matéria-prima promissora para a produção de biogás, em consonância com os princípios da economia circular. Este estudo teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica da produção de biogás a partir de microalgas. A metodologia envolveu uma revisão exploratória com análise de 60 artigos indexados na base *Web of Science* (WoS), entre 2015 a 2025, utilizando os termos “*microalgae*”, “*biogas*” e “*anaerobic digestion*”, e processamento dos dados pelo software *VOSviewer*. Os resultados revelaram concentração de publicações na Índia e escassez de estudos latino-americanos e brasileiros. As principais áreas envolvidas foram: combustíveis energéticos, ciências ambientais e biotecnologia aplicada à microbiologia. A análise de coocorrência identificou 29 palavras-chave relevantes, destacando-se “*biogas*” e “*microalgae*” com forte conexão temática. O mapeamento bibliométrico organizou os estudos em quatro agrupamentos: produção de biogás por microalgas, produção de biomassa, impactos ambientais e aspectos energéticos. Foram identificados sete artigos-chave que evidenciam o potencial das microalgas como fonte sustentável de energia, destacando desafios técnicos relacionados à rigidez da parede celular e a necessidade de pré-tratamentos. Conclui-se que, apesar do potencial técnico e ambiental, a integração entre biotecnologias, economia circular e políticas públicas podem ampliar as perspectivas de aplicação dessa tecnologia. Nesse sentido, a adoção de uma abordagem interdisciplinar que associe gestão de resíduos, regulação ambiental e viabilidade econômica é essencial para consolidar o uso das microalgas como matriz bioenergética sustentável.

Palavras-chave: Análise bibliométrica; Biomassa algal; Combustíveis energéticos.

¹ Mestre em Ciências Ambientais, pelo Centro Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Lages, Santa Catarina, Brasil. E-mail: gbs.castro95@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0008-4115-6243> <http://lattes.cnpq.br/8022115462470907>

² Graduando em Agronomia, pelo Centro Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Lages, Santa Catarina, Brasil. E-mail: leonardomottasilva@outlook.com <https://orcid.org/0000-0001-7682-8339> <http://lattes.cnpq.br/6743692541537437>

³ Mestre em Ciências Ambientais, pelo Centro Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Lages, Santa Catarina, Brasil. E-mail: luciani.souza9@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-5878-1570> <http://lattes.cnpq.br/1532682026531716>

⁴ Doutora em Engenharia Química e Docente Permanente, do Departamento de Engenharia Ambiental pelo Centro Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Lages, Santa Catarina, Brasil. E-mail: jeane.rosario@udesc.br <https://orcid.org/0000-0002-7159-581X> <http://lattes.cnpq.br/4627049809253056>

Perspectives on biogas production from microalgae for circular economy: a bibliometric analysis

Abstract

The growing global energy demand and the environmental impacts associated with fossil fuel use have driven the development of renewable alternatives, such as bioenergy. Microalgae stand out as a promising raw material for biogas production, aligning with circular economy principles. This study presents a bibliometric analysis of biogas production from microalgae. An exploratory review of 60 articles indexed in the Web of Science (WoS) database from 2015 to 2025, using the terms “microalgae,” “biogas,” and “anaerobic digestion,” with data processing performed using VOSviewer software. Results revealed a concentration of publications in India and a noticeable gap in Latin American and Brazilian research. The most prominent subject areas included energy fuels, environmental sciences, and biotechnology applied microbiology. Co-occurrence analysis identified 29 relevant keywords, with “biogas” and “microalgae” showing strong thematic links. The bibliometric mapping grouped studies into four thematic clusters: biogas production from microalgae, biomass production, environmental issues, and energy-related topics. Seven key articles were highlighted, demonstrating the potential of microalgae as a sustainable energy source, while also addressing technical challenges such as rigid cell walls, the need for pretreatment methods, and the advantages of co-digestion to improve methane yields. The findings suggest that, despite the technical and environmental potential, the integration between biotechnologies, circular economy, and public policies can broaden the prospects for the application of this technology. In this sense, the adoption of an interdisciplinary approach that links waste management, environmental regulation, and economic viability is essential to consolidate the use of microalgae as a sustainable bioenergy source.

Keywords: Bibliometric analysis; Algal biomass; Energy fuels.

1 Introdução

O crescimento populacional e o agravamento das mudanças climáticas têm intensificado a busca por fontes energéticas sustentáveis que substituam os combustíveis fósseis, cuja exploração é ambientalmente danosa e insustentável a médio e longo prazo (Kumar e Singh, 2019). Nesse cenário, a bioenergia tem se consolidado como uma alternativa promissora, ao lado de outras fontes renováveis, como a solar e a eólica. Embora ainda represente uma fração, sua exploração é relativamente pequena. Ressalta-se que elas podem promover o desenvolvimento econômico regional, ao passo que tem potencial de mitigar emissões de gases de efeito estufa (GEEs), provendo opções de baixo carbono para geração de diferentes formas de energia (Welfle *et al.*, 2023).

Embora alinhada aos princípios da economia circular por permitir o aproveitamento de resíduos vegetais, animais, microbiológicos na geração de energia (Welfle *et al.*, 2014), a bioenergia, derivada de biomassa renovável, exige escalonamento para alcançar as metas

climáticas e garantir segurança. No entanto, a adoção em larga escala ainda enfrenta desafios tecnológicos, econômicos e logísticos. Entre as principais limitações, pode-se citar uma baixa razão de energia global (que consiste no retorno energético sobre o investimento energético), o alto custo de produção da biomassa, as emissões diretas e indiretas de GEEs, e as demandas por espaço, água potável e nutrientes (Kumar e Singh, 2019). Logo, é essencial a formulação de políticas facilitadoras, que permitam implementar a transição energética que, resulte em carbono neutro nas próximas décadas (Welfle *et al.*, 2023).

Diante das limitações mencionadas na adoção em larga escala da bioenergia, torna-se imperativo buscar matérias-primas mais eficientes e sustentáveis. Entre as diversas biomassas estudadas, as microalgas, organismos fotossintetizantes e polifiléticas, têm se destacado pelo conteúdo rico em lipídios, carboidratos, pigmentos e proteínas. Isso as torna muito promissoras na produção de biogás, especialmente devido ao seu alto rendimento de metano, que varia em torno de 0,47 a 0,79 L CH₄/g SV (Kendir e Ugurlu, 2018). Além disso, ao contrário das biomassas lignocelulósicas, sua membrana e parede celular não apresentam lignina e hemicelulose, o que as caracterizam por um crescimento rápido, alta capacidade de sequestro de dióxido de carbono (CO₂), a possibilidade de serem cultivadas em áreas improdutivas e de usarem efluentes como meio de cultivo (Khan *et al.*, 2022; Kumari *et al.*, 2021). Concomitantemente, haverá o tratamento do efluente e gerará produtos e coprodutos de alto valor da biomassa microalgal, como biofertilizantes. Assim, esses atributos posicionam as microalgas como insumo estratégico em sistemas de biorrefinaria, capazes de articular ganhos energéticos, ambientais e socioeconômicos, sem competir com a indústria de alimentos ou ocupar terras aráveis (Wang *et al.*, 2019). Entretanto, ainda há alguns desafios para a sua viabilidade, como a busca por métodos de cultivo que sejam mais comercialmente viáveis (Abusweireh *et al.*, 2023).

Silva e Oliveira (2023) realizaram uma revisão integrativa sobre o aproveitamento energético de resíduos orgânicos no contexto da economia circular, em que destaca o potencial de tecnologias sustentáveis para a valorização de resíduos, e aponta a necessidade de maior articulação entre pesquisa científica e políticas públicas. Essa perspectiva, reforça a importância de sistematizar o conhecimento técnico-científico disponível sobre rotas bioenergéticas alternativas, como a digestão anaeróbia de microalgas, para subsidiar estratégias sustentáveis de gestão energética.

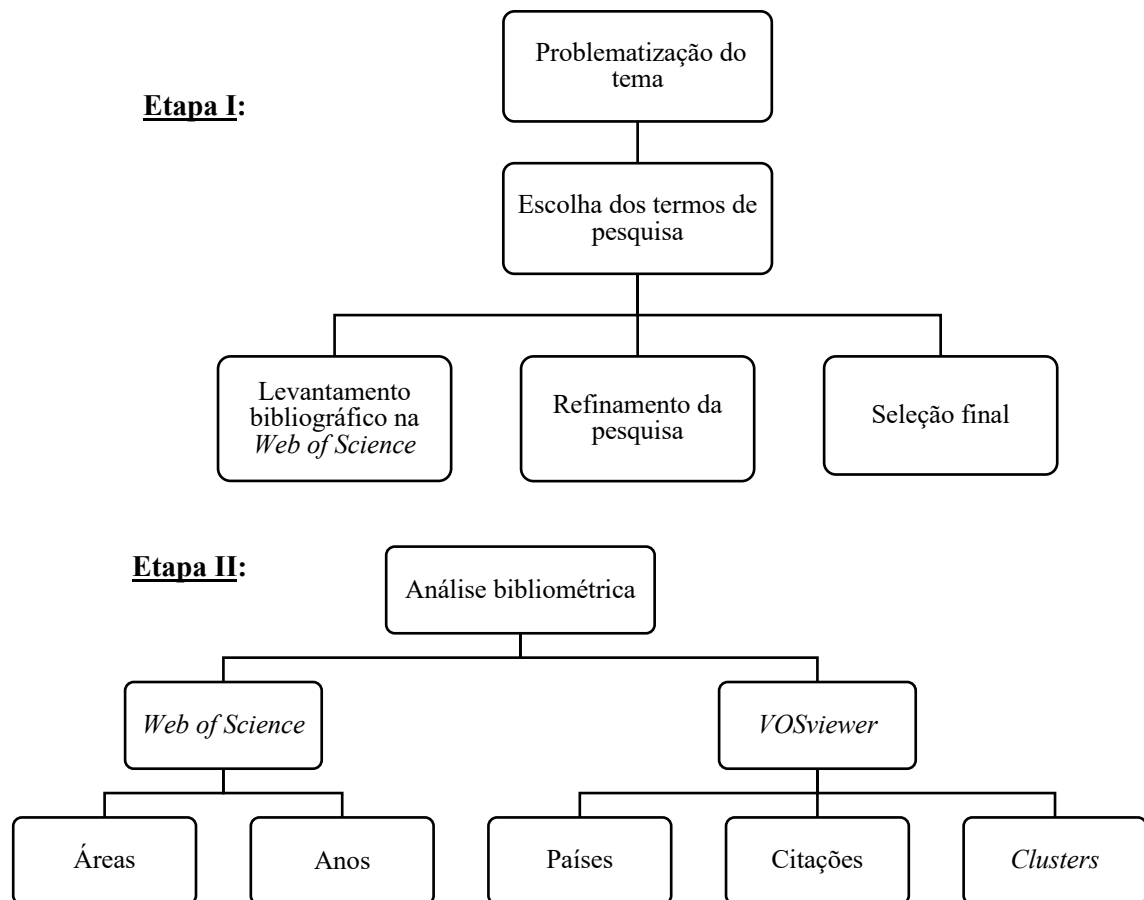
Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica da produção de biogás a partir de microalgas, identificando autores, países, áreas e tendências temáticas predominantes. Utilizou-se a base de dados da Plataforma *Web of Science* e o software *VOSviewer* como ferramentas de identificação, mapeamento e análise de redes, permitindo identificar lacunas e oportunidades de pesquisa relacionadas à integração entre biogás, biomassa à base de algas e economia circular.

2 Materiais e Métodos

Este trabalho consistiu em uma revisão bibliométrica de natureza exploratória, método indicado para aprofundar ou refinar o conhecimento sobre temas específicos e propiciar novas abordagens de pesquisa (Menezes *et al.*, 2019). O procedimento metodológico foi dividido em duas etapas: (i) delimitação do tema/problema; e (ii) execução da análise bibliométrica (Figura 1).

Para determinar o tema, foram selecionadas três palavras-chaves principais, alinhadas ao objetivo principal deste trabalho, sendo elas: “*energy production*”, “*microalgae*” e “*biogas*”. Para refinar a busca, adotou-se os seguintes critérios: (i) artigos em inglês; (ii) artigos de revisão e de pesquisa; (iii) artigos publicados no período de 2015 a 2025.

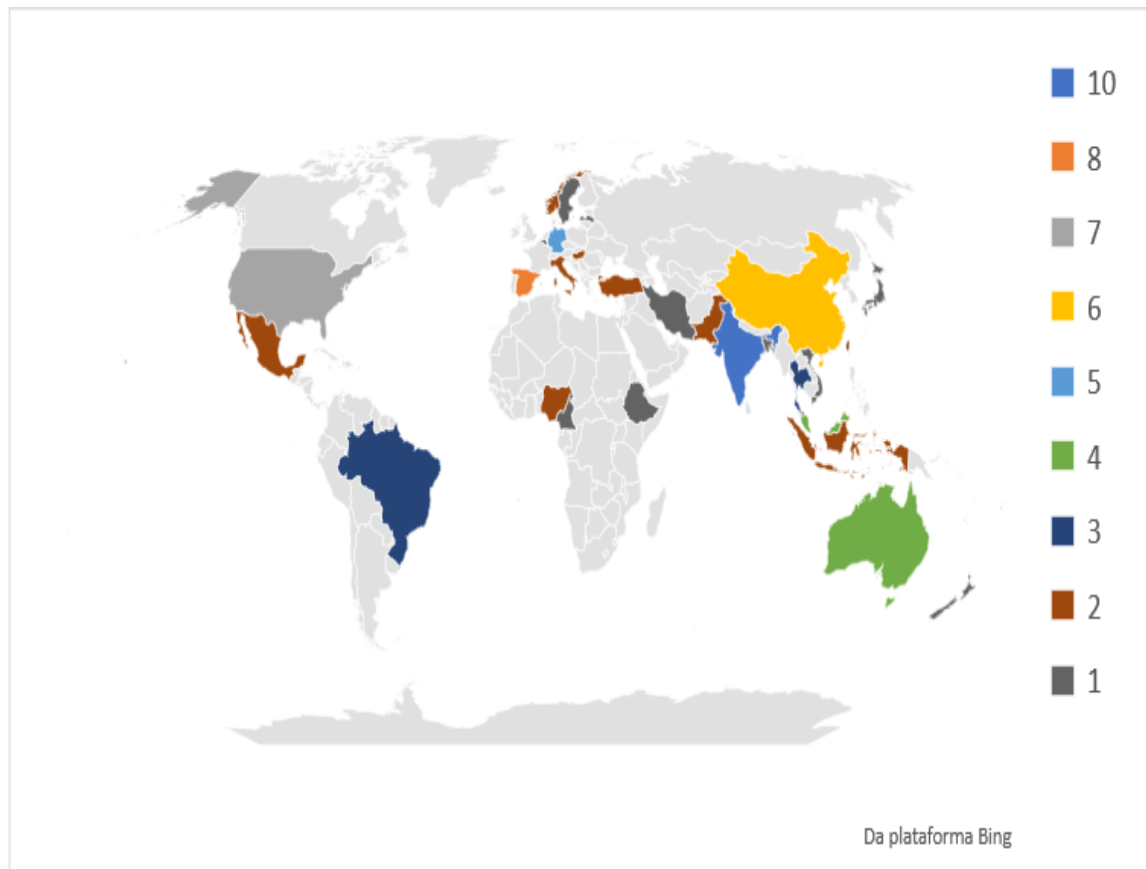
A plataforma *Web of Science* (WoS), foi escolhida para realizar a pesquisa bibliográfica, cujos dados foram coletados ao longo do mês de junho de 2025. E utilizou-se ferramentas de análise desta plataforma para, identificar as áreas de estudo dos artigos selecionados, avaliar os anos de publicação dos artigos e, verificar a tendência histórica de interesse neste assunto. Já a ferramenta *VOSviewer*, utilizou-a para gerar mapas de coocorrência de países, de termos, e de autores, a partir do banco de dados gerado. Para o mapeamento dos termos associados mais relevantes ao tema, limitou-se as palavras-chave que ocorreram no mínimo cinco vezes, nas referências encontradas. Para análise dos artigos relevantes na área, limitou-se em artigos com pelo menos 50 citações. A organização e quantificação dos dados foi complementada com o *Microsoft Excel*.

Figura 1: Fluxograma das etapas para a pesquisa.

3 Resultados e discussão

Na Etapa I do estudo, obteve-se 60 artigos, com maior concentração de publicações provenientes da Índia, seguida por Espanha, Estados Unidos e China (Figura 2). A baixa presença do Brasil, com apenas três artigos no período analisado, indica uma lacuna relevante, na produção nacional sobre o tema. Essa ausência pode estar relacionada às incipientes pesquisas e infraestrutura limitadas para o escalonamento com microalgas, e à predominância do uso de biomassas de resíduos agropecuários na produção de biogás.

Figura 1: Relação dos números de artigos obtidos na Plataforma WoS por país de origem.

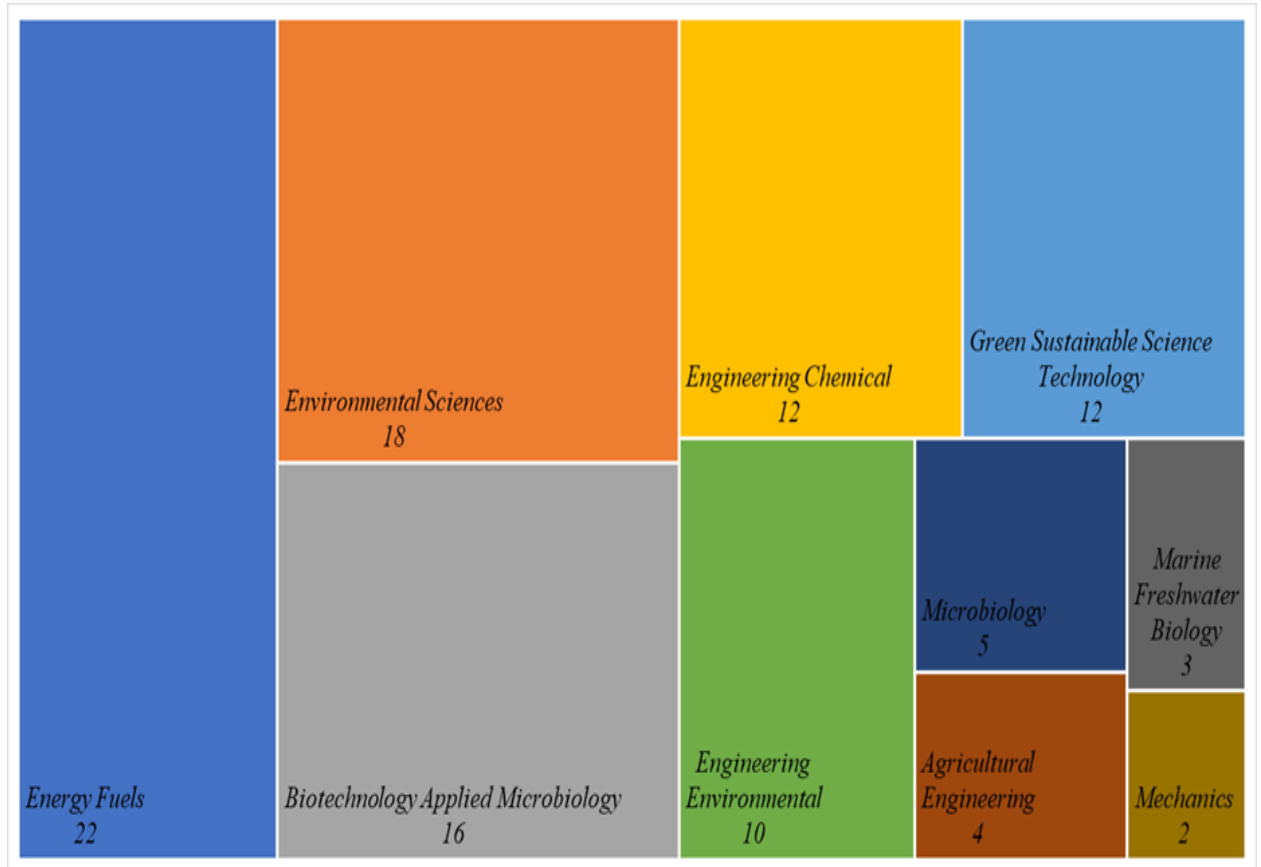


Fonte: Adaptado da base de dados WoS (2025).

Outro ponto, observa-se a escassez de artigos nos países da América Latina, evidenciado apenas pela baixa produção brasileira. Essa ausência, limita e compromete a regionalização de soluções tecnológicas. Assim, há uma oportunidade estratégica de ampliar os estudos locais, que incorporem variáveis contextuais e promovam a inserção de soluções bioenergéticas, em políticas ambientais regionais.

Na análise de áreas abrangidas pelos artigos, a plataforma *WoS* identificou 23 entradas no total e, destacou-se as 10 áreas mais relevantes (Figura 3). Em que “*Energy Fuels*” obteve 22 artigos, essa área apresenta avanços significativos nos últimos 50 anos. Deve-se ao fato que, algumas microalgas podem produzir 70% da sua biomassa em lipídios, tornando-as mais promissoras que outros grupos investigados para biocombustíveis (Katiyar *et al.*, 2017). Além desta área, observa-se a multidisciplinaridade delas, consequentemente a importância dos diferentes campos do conhecimento.

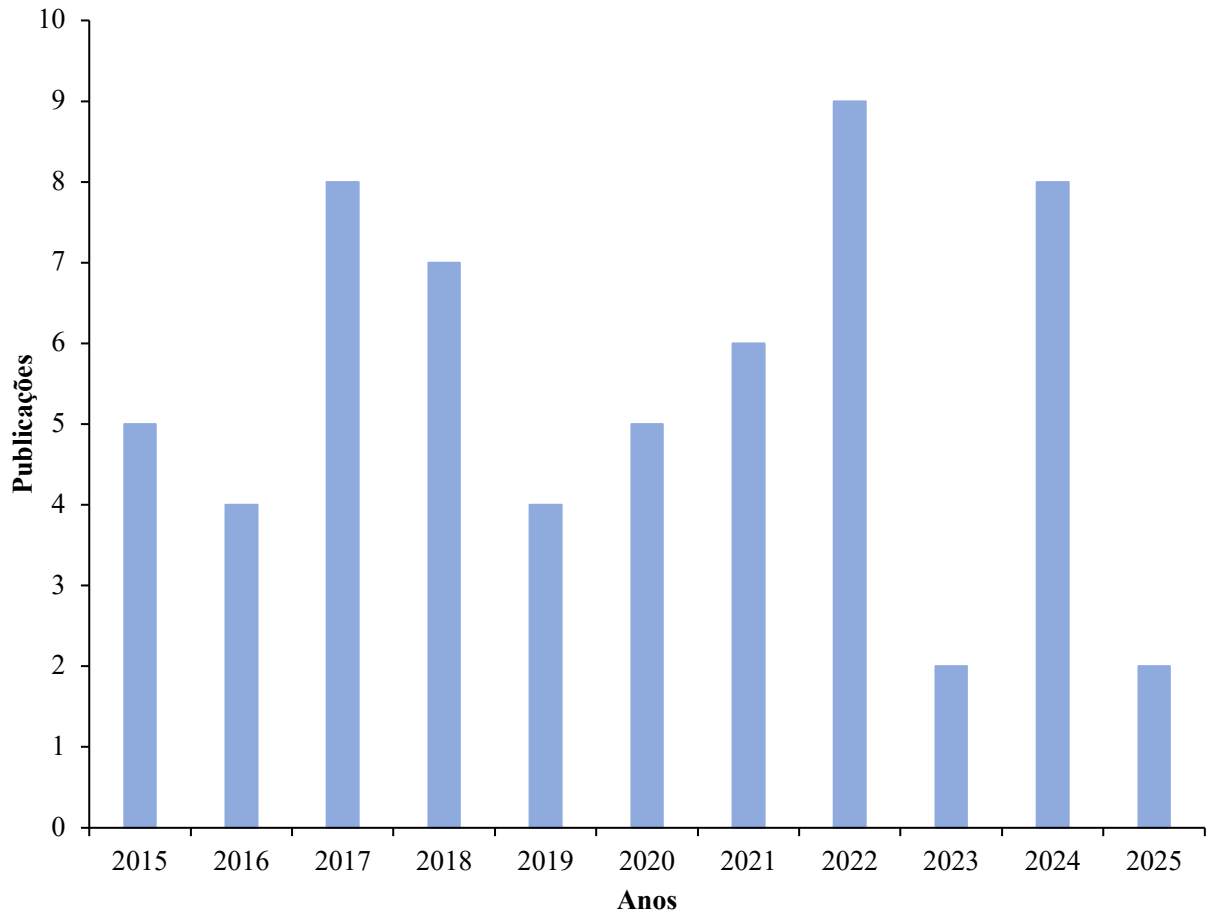
Figura 2: Identificação das áreas temáticas dos artigos obtidos na Plataforma WoS com os respectivos números.



Fonte: Adaptado da base de dados WoS (2025).

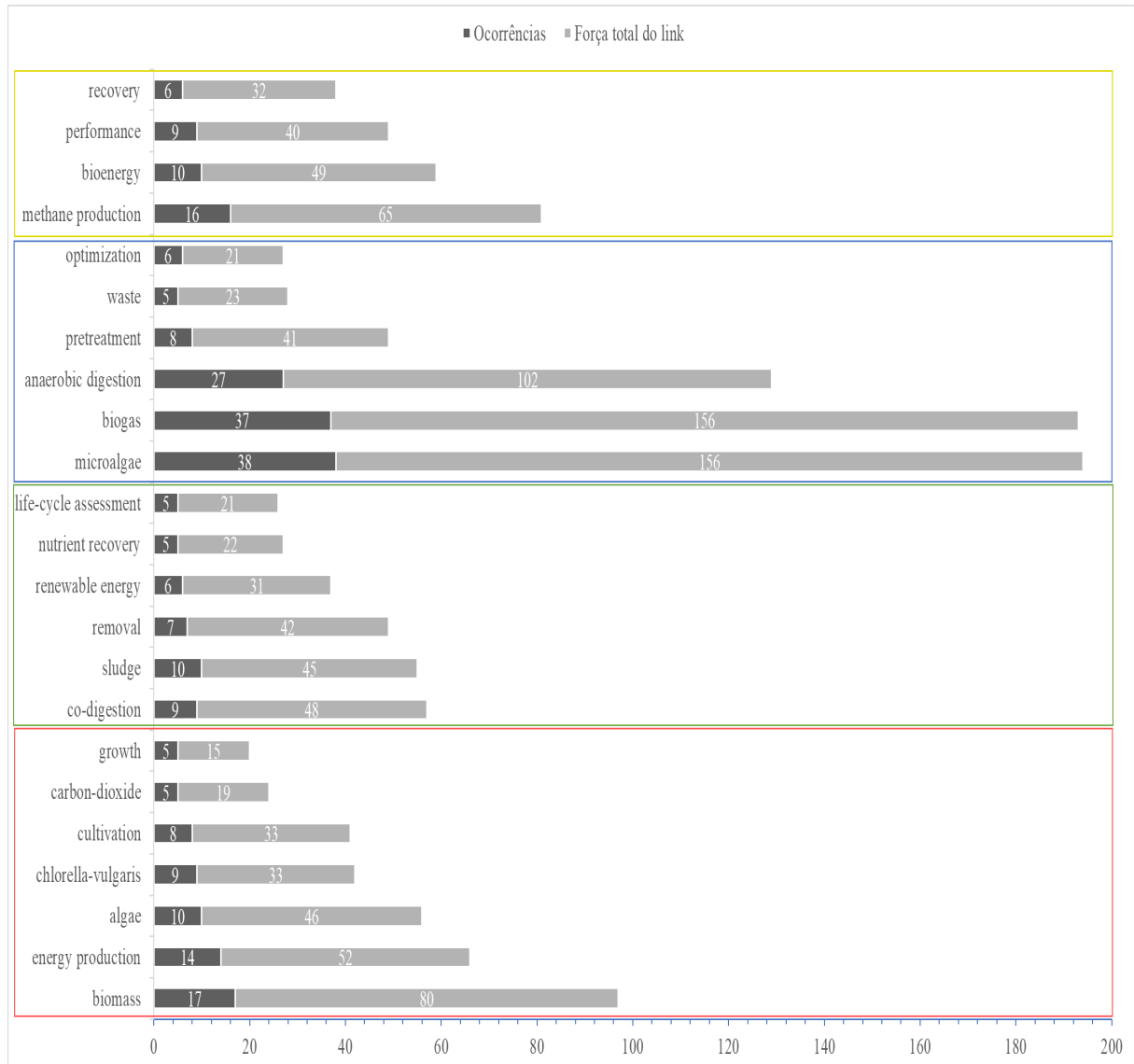
A Figura 4, apresenta-se a tendência das publicações ao longo dos últimos 10 anos, observando uma oscilação ao longo dos anos. e em 2022 foi o ano que apresentou o maior número de artigos publicados, nove. Ressalta-se que em 2025, os dados correspondem apenas às publicações realizadas até junho.

Figura 3: Número de artigos publicados ao longo dos anos (2015-2025), obtidos da plataforma WoS.

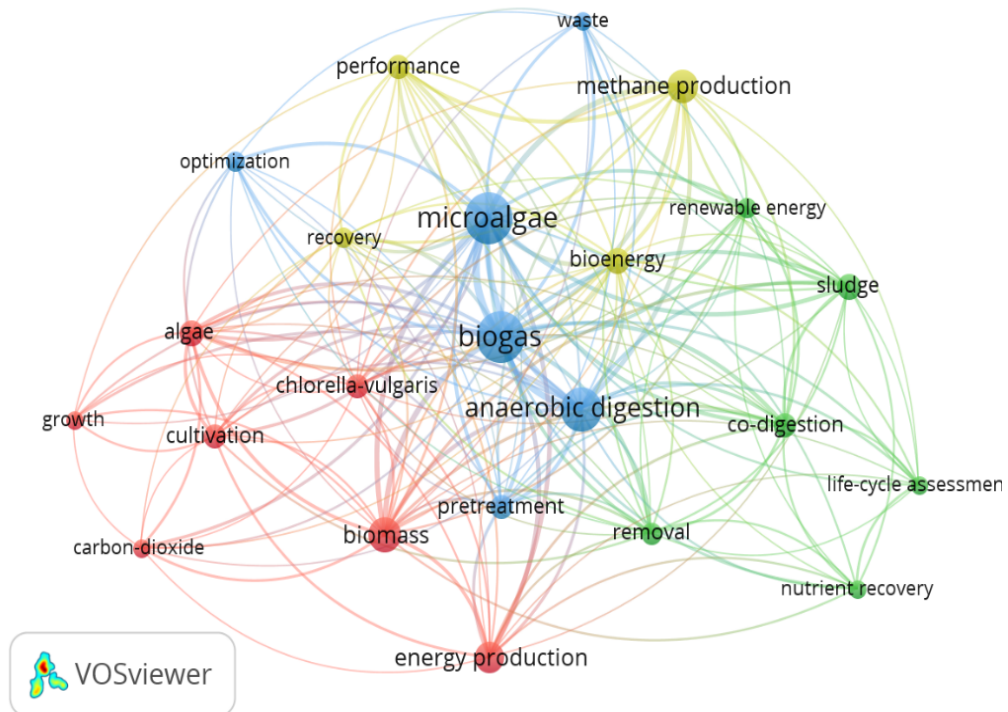


Fonte: Adaptado da base de dados WoS (2025).

Na Etapa II do estudo, identificaram-se 447 palavras-chave, em que 29 foram selecionadas, por ocorrerem ao menos cinco vezes. A análise destaca-se os termos “biogás” e “microalgas”, ambos com força total de link de 13,3% (Figura 5). A presença de termos como “dióxido de carbono”, “análise de ciclo de vida”, “resíduos” e “bioenergia”, reforça o caráter multidisciplinar e circular da abordagem. Indicando que, a produção de energia não ocorre de forma isolada, mas integrada ao reaproveitamento de resíduos (Kumari *et al.*, 2021) e sequestro de carbono. Por sua vez, a frequência elevada da “*Chlorella vulgaris*”, confirma o predomínio dessa espécie como espécie modelo, evidenciado pelo alto teor lipídico, facilidade de cultivo e elevada produtividade de biomassa.

Figura 4: Relação da ocorrência e força total do link dos termos obtidos da plataforma WoS.

O mapa de coocorrência de palavras-chave (Figura 6), destaca-se os termos “microalgas” e “biogás”, como principais pilares dos estudos. Esses termos apresentaram maior centralidade e interconectividade, sendo frequentemente associados a “digestão anaeróbia”, “biomassa”, “produção de metano”, “codigestão” e “lodo”.

Figura 5: Mapa de coocorrência de palavras-chave obtidos da plataforma VOSviewer.

O mapa também permite a visualização de quatro *clusters* temáticos, sendo eles:

1) Grupo azul: relacionado ao processo principal investigado, abrange os termos ligados ao tema principal que é a produção de biogás, por digestão anaeróbia através de microalgas. Além destas palavras-chave, também contempla outros termos que influenciam o processo, como a ocorrência de pré-tratamentos, a otimização de variáveis, e o uso concomitante de resíduos, demonstrando a relevância destes fatores no processo.

2) Grupo vermelho: concentrado na produção das biomassas usadas como substrato de alimentação no processo de digestão. Além do termo algas e *Chlorella vulgaris*, também indica outros fatores relacionados à produção das algas, como seu cultivo e crescimento. Também relaciona à biomassa a questões produtivas do biogás, como a geração de energia e a emissão de dióxido de carbono.

3) Grupo verde: relacionado a questões ambientais que norteiam o tema, como a contribuição em energias renováveis, e a aplicação da análise de ciclo de vida (ACV) na contabilização de impactos ambientais. Além disso, também menciona outros termos de

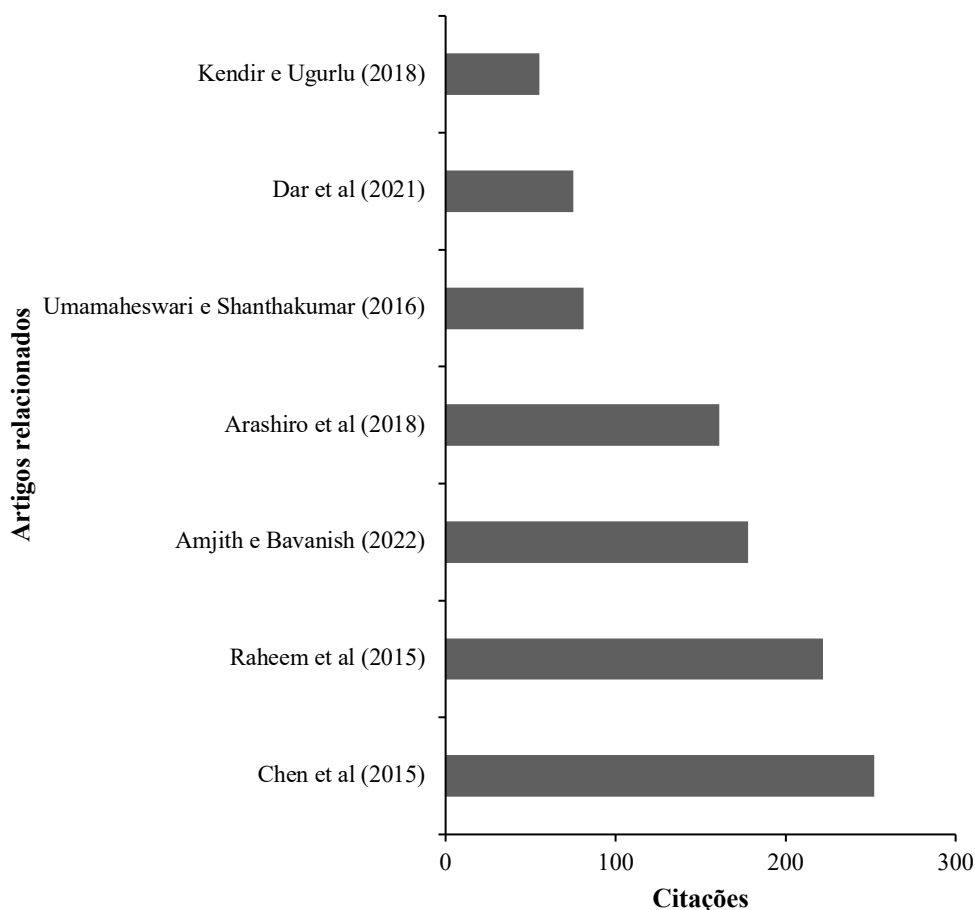
interesse ambiental, como a remoção de poluentes, a recuperação de nutrientes, e a codigestão com outros substratos orgânicos, como o uso de lodo de estações de tratamento.

4) Grupo amarelo: referente a questões energéticas relacionadas, cita a produção de metano como principal produto energético de interesse, a produção de energia através do uso de biomassas por meio do termo bioenergia, e ainda os termos recuperação e performance, que permitem avaliar energeticamente o processo de produção de biogás.

A análise da figura também indica uma tendência crescente de estudos que integram a produção de biogás ao tratamento de efluentes e à redução de gases de efeito estufa, aproximando-se dos princípios da economia circular. Contudo, o fato de existirem poucos *clusters* centrados em aspectos socioeconômicos ou político-regulatórios sugere que esses componentes ainda são marginalmente considerados na literatura técnica. Esse vácuo abre espaço para pesquisas que explorem a viabilidade econômica, modelos de negócios circulares e instrumentos de políticas públicas capazes de alavancar a adoção dessas tecnologias em escala.

A identificação dos trabalhos mais relevantes (Figura 7), revelou sete artigos com mais de 50 citações, que foram selecionados para discussão qualitativa. Dos artigos mais citados entre os trabalhos da área, seis consistem de artigos de revisão, o que justifica as suas amplas utilizações, uma vez que sintetizam as considerações mais relevantes do tema, sendo importantes para demais autores no desenvolvimento de seus respectivos trabalhos.

Figura 6: Número dos artigos publicados mais citados com seus respectivos autores, obtidos da plataforma WoS.



Fonte: Adaptado da base de dados WoS (2025).

Entre os artigos de revisão, o estudo de Chen *et al.* (2015) aborda os principais usos energéticos de macroalgas, e enfatiza os aspectos microestruturais e a biodegradabilidade da biomassa e como isto afeta diretamente o processo de biodigestão anaeróbia. O artigo publicado por Raheem *et al* (2015) oferece uma visão crítica dos principais processos aplicáveis à biomassa de microalgas, entre eles a digestão anaeróbia (DA), apontando a sua elevada capacidade de fixação de CO₂. Como uma das principais vantagens em relação a biomassas terrestres, podendo apresentar uma mitigação de carbono de 10 a 50 vezes maior. O trabalho de Amjith e Bavanish (2022) revisa alternativas energéticas aplicáveis a biomassas, demonstrando a viabilidade de sistemas híbridos com geração eólica para eletrificação rural *off grid*. Umamaheswari e Shanthakumar (2016), por sua vez, abordam o uso de microalgas no

tratamento de efluentes industriais, e como isso pode ser usado como estratégia de produção desta biomassa. Já o trabalho de Dar *et al* (2021), traz uma revisão moderna sobre a produção de biometano a partir de diferentes resíduos e produtos agrícolas, entre eles as microalgas, destacando o potencial do uso do digestato como biofertilizante. Por fim, o artigo de Kendir e Ugurlu (2018) ressalta o crescente interesse no uso de microalgas para a síntese de biogás, trazendo uma discussão estratégica sobre viabilidade econômica e escalabilidade industrial dos pré-tratamentos.

Apenas o trabalho de Arashiro *et al.*, (2018) se trata de um artigo de pesquisa que evidência, por meio da Análise de Ciclo de Vida (ACV), que sistemas de lagoas de alta taxa acoplados à produção de biogás são ambientalmente competitivos em relação aos sistemas de lodo ativado convencionais. Também mostra a influência da localização geográfica e das variáveis climáticas sobre a produtividade das microalgas, e a possibilidade de uso da biomassa algal como biofertilizante, ampliando os benefícios dentro de um modelo de economia circular.

Os resultados da análise bibliométrica realizada neste estudo evidenciam uma concentração significativa de pesquisas voltadas à digestão anaeróbia de microalgas, com ênfase crescente em estratégias que otimizem a conversão da biomassa em biogás. Diversos autores apontam como principal entrave técnico à eficiência do processo a presença de paredes celulares rígidas em espécies como *Chlorella* e *Scenedesmus*, as quais dificultam a etapa de hidrólise, limitando o acesso dos microrganismos ao conteúdo celular (Chen *et al.*, 2015; Kendir e Ugurlu, 2018).

Nesse contexto, torna-se evidente o papel central dos métodos de pré-tratamento, cuja adoção é uma forma de melhorar a degradabilidade da biomassa algal e elevar os rendimentos de metano (Kumari *et al.*, 2021). Tais métodos incluem abordagens físicas, químicas, térmicas, biológicas e híbridas, cada uma com vantagens e limitações, especialmente no que se refere ao consumo energético e viabilidade econômica em larga escala. Complementando esse cenário, Arashiro *et al.* (2018) reforçam a viabilidade ambiental da integração entre cultivo de microalgas, tratamento de efluentes e digestão anaeróbia.

Esses estudos convergem com a tendência observada neste trabalho, de valorização de sistemas multifuncionais e integrados, os quais se alinham aos princípios da economia circular. Entretanto, a análise de redes e palavras-chave mostra que aspectos técnico-científicos ainda predominam nas publicações, em detrimento de abordagens voltadas à viabilidade econômica, análise regulatória e aplicação em contextos regionais. Dessa forma, os dados aqui apresentados

confirmam as lacunas identificadas na produção científica atual e reforçam a relevância de fomentar pesquisas interdisciplinares e aplicadas, especialmente em países como o Brasil, que possuem potencial estratégico ainda subexplorado para o uso de microalgas na geração de bioenergia.

O estudo reforça a utilidade de análises bibliométricas como instrumento para a identificação de lacunas, tendências emergentes e formação de redes de colaboração. As informações aqui sistematizadas podem auxiliar pesquisadores, formuladores de políticas públicas e investidores no delineamento de projetos mais eficientes e conectados com os princípios de sustentabilidade e inovação.

4 Conclusões

A produção de biogás a partir de microalgas configura-se como uma alternativa promissora frente aos desafios globais de transição energética e mitigação dos impactos ambientais. A análise bibliométrica realizada por meio da base *Web of Science* e do software *VOSviewer* permitiu identificar lacunas significativas na literatura científica, como a concentração de estudos na Ásia e Europa e a baixa participação de países da América Latina, especialmente o Brasil. Essa escassez se evidencia a necessidade de fortalecer redes de pesquisa regionais e políticas de incentivo à inovação no campo da bioenergia, além de demonstrar uma oportunidade temática ainda pouco explorada, considerando o elevado potencial biotecnológico da região.

A literatura analisada evidencia avanços relacionados à digestão anaeróbia integrada ao aproveitamento de biomassa em sistemas circulares, porém aponta como um dos principais entraves à eficiência do processo a rigidez das paredes celulares das microalgas, que exige pré-tratamentos específicos e eleva os custos energéticos. Alternativas como a codigestão com outras fontes de biomassa têm se mostrado eficazes na otimização do rendimento de metano e na melhoria da viabilidade econômica do processo.

A análise bibliométrica mostrou-se uma ferramenta eficaz para acompanhar as principais tendências e limitações do conhecimento técnico atual, fornecendo subsídios à formulação de novas agendas científicas e estratégicas. Os resultados obtidos demonstram que a temática requer abordagens interdisciplinares que articulem biotecnologia, ciências ambientais, economia e políticas públicas, a fim de superar os entraves técnicos e promover modelos produtivos mais sustentáveis e circulares.

Dessa forma, destaca-se a importância de ampliar as investigações sobre viabilidade econômica, modelos regulatórios e estratégias regionais de implementação. Estudos futuros devem explorar o papel das microalgas na integração entre tratamento de efluentes, geração de energia e mitigação de gases de efeito estufa, consolidando o potencial dessa biomassa como vetor de inovação sustentável para o contexto latino-americano e microrregional.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, bem como ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV-UDESC) pelo suporte institucional.

Referências Bibliográficas

- ABUSWEIREH, R. S.; RAJAMOHAN, N.; SONNE, C.; VASSEGHIAN, Y. Algae biogas production focusing on operating conditions and conversion mechanisms – A review. **Heliyon**, v. 9, p. e17757, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17757>
- AMJITH, L. R.; BAVANISH, B. A review on biomass and wind as renewable energy for sustainable environment. **Chemosphere**, v. 293, p. 133579, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133579>
- ARASHIRO, L. T.; MONTERO, N.; FERRER, I.; ACIÉN, F. G.; GÓMEZ, C.; GARFÍ, M. Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. **Science of the Total Environment**, v. 622–623, p. 1118–1130, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.051>
- CHEN, H.; ZHOU, D.; LUO, G.; ZHANG, S.; CHEN, J. Macroalgae for biofuels production: Progress and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 427–437, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.086>
- DAR, R. A.; PARMAR, M.; DAR, E. A.; SANI, R. K.; PHUTELA, U. G. Biomethanation of agricultural residues: Potential, limitations and possible solutions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110217, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110217>
- KATIIYAR, R. *et al.* Microalgae: An emerging source of energy based bio-products and a solution for environmental issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1083–1093, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.028>
- KENDIR, E.; UGURLU, A. A comprehensive review on pretreatment of microalgae for biogas production. **International Journal of Energy Research**, v. 42, p. 3711–3731, 2018. <https://doi.org/10.1002/er.4100>
- KHAN, A. A.; GUL, J.; NAQVI, S.R.; ALI, I.; FAROOQ, W.; LIAQAT, R.; ALMOHAMADI, H.; ŠTĚPANEK, L.; JUCHELKOVÁ, D. Recent progress in microalgae-

derived biochar for the treatment of textile industry wastewater. **Chemosphere**, v. 306, p. 135565, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135565>

KUMAR, D.; SINGH, B. Algal biorefinery: An integrated approach for sustainable biodiesel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 131, p. 105398, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105398>

KUMARI, P.; VARMA, A.K.; SHANKAR, R.; THAKUR, L.S.; MONDAL, P. Phycoremediation of wastewater by *Chlorella pyrenoidosa* and utilization of its biomass for biogas production. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104974, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104974>

MENEZES, A. H. N.; DUARTE, F.R.; CARVALHO, L.O.R.; SOUZA, T.E.S. Metodologia científica: teoria e aplicação na educação a distância. Petrolina: Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, 2019.

RAHEEM, A.; WAN AZLINA, W. A. K. G.; TAUFIQ YAP, Y. H.; DANQUAH, M. K.; HARUN, R. Thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 990–999, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.186>

SILVA, J. R.; OLIVEIRA, A. C. Aproveitamento energético de resíduos orgânicos no contexto da economia circular: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 10, n. 20, p. 789–802, 2023. Disponível em: <https://revista.ecogestaobrasil.net/v10n20/pdf/08.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2025.

UMAMAHESWARI, J.; SHANTHAKUMAR, S. Efficacy of microalgae for industrial wastewater treatment: a review on operating conditions, treatment efficiency and biomass productivity. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 15, n. 2, p. 265–284, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9397-7>

WANG, S.; YERKEBULAN, M.; ABOMOHRA, A. E.; EL-KHODARY, S.; WANG, Q. Microalgae harvest influences the energy recovery: a case study on chemical flocculation of *Scenedesmus obliquus* for biodiesel and crude bio-oil production. **Bioresource Technology**, v. 286, p. 121371, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121371>

WELFLE, A. J.; ALMENA, A.; ARSHAD, M. N.; BANKS, S. W.; BUTNAR, I.; CHONG, K. J.; COOPER, S. J. G.; DALY, H.; FREITES, S. G.; GÜLEÇ, F.; HARDACRE, C.; HOLLAND, R.; LAN, L.; LEE, C. S.; ROBERTSON, P.; ROWE, R.; SHEPHERD, A.; SKILLEN, N.; TEDESCO, S.; THORNLEY, P.; BARBARÁ, P. V.; WATSON, I.; WILLIAMS, O. S. A.; RÖDER, M. Sustainability of bioenergy – Mapping the risks & benefits to inform future bioenergy systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 177, p. 106919, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106919>

WELFLE, A.; GILBERT, P.; THORNLEY, P. Securing a bioenergy future without imports. **Energy Policy**, v. 68, p. 1–14, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.079>