



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2025) v. 12, n. 3, p. 20–28
<https://doi.org/10.21712/lajer.2025.v12.n3.p20-28>

1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes



Uso de macroalga para tratamento de águas residuais com corantes da indústria têxtil

Use of macroalgae for the treatment of dye-contaminated wastewater from the textile industry

Victor de Barcellos Tesolini¹, Paulo Sérgio da Silva Porto², Laura Marina Pinotti^{3,*}

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: laura.pinotti@ufes.br

Resumo: A deterioração do meio ambiente causada por uso de corantes sintéticos originário da indústria têxtil traça um desafio ambiental relevante, em virtude da dificuldade de degradação destes compostos em relação aos sistemas de tratamentos convencionais, uma vez que essas moléculas têm uma complexidade estrutural. Este estudo tem como objetivo estudar a viabilidade do uso de macroalgas como biossorventes na remoção de corantes de efluentes têxteis, aplicando uma abordagem bibliométrica e análise de anterioridade tecnológica. As buscas foram realizadas nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus* para seleção de artigos publicados, seguidas de análise quantitativa e qualitativa com auxílio do software R (pacote Bibliometrix). Investigou-se, ainda, o estado da técnica em patentes nacionais e internacionais. Os resultados evidenciam o aumento nas publicações em relação ao tema a partir de 2017, embora ainda pequeno, e em destaque estão a China e Irã como principais produtores científicos. A análise de patentes identificou escassez de tecnologias voltadas ao uso de macroalgas na remoção de corantes, o que ressalta oportunidades relevantes para inovação. Conclui-se que a técnica é uma alternativa promissora, sustentável e pouco explorada para o tratamento dos efluentes, justificando a demanda de novos estudos e desenvolvimento tecnológico na área.

Palavras-chave: macroalga; corantes; indústria têxtil; efluentes; biossorvente.

Abstract: The deterioration of the environment caused by the use of synthetic dyes originating from the textile industry poses a significant environmental challenge, due to the difficulty of degrading these compounds through conventional treatment systems, since these molecules have a complex structure. This study aims to evaluate the feasibility of using macroalgae as biosorbents for the removal of dyes from textile effluents, applying a bibliometric approach and a technological prior art analysis. The searches were carried out in the Web of Science and Scopus databases to select published articles, followed by quantitative and qualitative analyses using the R software (Bibliometrix package). In addition, the state of the art in national and international patents was investigated. The results show a marked increase in publications on the topic since 2017, although still limited, with China and Iran standing out as the main scientific producers. The patent analysis revealed a scarcity of technologies related to the use of macroalgae for dye removal, highlighting relevant opportunities for innovation. It is concluded that this technique represents a promising, sustainable, and underexplored alternative for effluent treatment, justifying the need for further studies and technological development in this area.

Keywords: macroalgae; dye; textile industry; effluents; biosorbents

1 Introdução

A poluição dos corpos d'água causada por atividades industriais constitui uma das principais ameaças à integridade dos ecossistemas e a saúde humana (Çetintaş et al., 2022). Em países em desenvolvimento, o crescimento populacional, a urbanização e a industrialização agravam a escassez e a deterioração da qualidade da água (Lee et al., 2022).

Entre os setores mais poluentes destaca-se a indústria têxtil, caracterizada pelo elevado consumo de água, energia e produtos químicos (Yasin e Sun, 2019). Os efluentes gerados nesse setor contêm corantes sintéticos persistentes, provenientes das etapas de tingimento e acabamento úmido, os quais apresentam elevada estabilidade química e causam significativo impacto ambiental (Khataee et al., 2010). O aumento da produção impulsionado pelo *fast fashion* e o uso de tecidos híbridos agravam o problema, ampliando a complexidade e a resistência à degradação de resíduos (Provin, Cubas e Dutra, 2021; Haslinger et al., 2019).

Os corantes sintéticos possuem estruturas complexas, baixa biodegradabilidade e potenciais efeitos mutagênicos e carcinogênicos. Quando liberados em ambientes aquáticos, reduzem a transparência da água e a penetração de luz solar, comprometendo o equilíbrio ecológico e a fotossíntese de organismos aquáticos (Akmeşe, 2025; Rocha et al., 2024; Aravindhan et al., 2007).

Embora diversos métodos de remoção tenham sido desenvolvidos, muitos apresentam limitações relacionados ao alto custo operacional e à baixa eficiência (Lebron et al., 2021). Nesse contexto, a bioabsorção desporta como uma alternativa promissora, por se tratar de um processo biotecnológico que utiliza materiais de origem biológica, como microrganismos, resíduos vegetais, algas e subprodutos agroindustriais, para remover ou recuperar compostos de soluções aquosas. Entre suas principais vantagens destacam-se a simplicidade, o baixo custo, a eficiência e a possibilidade de reutilização dos bioabsorventes (Albayari et al., 2024).

As macroalgas, em particular, têm se mostrado bioabsorventes eficientes devido à sua disponibilidade, baixo custo e capacidade de adaptação a diferentes ambientes aquáticos. Sua dispersão em novas regiões tem sido favorecida por atividades antrópicas, como o transporte marítimo (Micael et al., 2021; Lebron et al., 2021). Assim, o uso de macroalgas no tratamento de efluentes têxteis representa uma alternativa sustentável, alinhada aos princípios da biotecnologia ambiental e da economia circular, e configura uma abordagem inovadora para a redução da poluição industrial, além de seu papel na remediação ambiental, a biomassa de macroalgas apresenta elevado potencial energético, do qual será posteriormente utilizada na produção de biocombustíveis, como o álcool de terceira geração, contribuindo para a geração de energia renovável e a mitigação do uso de combustíveis fósseis.

O presente estudo realiza uma revisão bibliográfica sistemática sobre a adsorção de corantes em efluentes têxteis utilizando macroalgas marinhas como bioabsorventes. A pesquisa inclui uma análise bibliométrica e um estudo de anterioridade, com o objetivo de mapear os principais avanços científicos na área. São destacados os principais indicadores bibliométricos relacionados aos estudos de adsorção, bem como os aspectos teóricos e experimentais discutidos na literatura, com ênfase nas contribuições envolvendo a bioabsorção por macroalgas.

2 Metodologia

2.1 Metodologia para o estudo bibliométrico

Para este estudo, adotou-se a análise bibliométrica visando identificar padrões em artigos científicos (Celso et al., 2014, p.16). Foram selecionadas as bases *Web of Science* e *Scopus*, utilizando os termos “macroalgae” e “dye adsorption”, combinados com operadores booleanos, sendo o AND o mais eficiente. A busca retornou 151 artigos de 2006 a 2025; após remoção de duplicatas, ficaram 105 artigos. Os dados foram processados no software *Biblioshiny* (pacote R bibliometrix) para análise e visualização, selecionando artigos com média de citações por ano ≤ 2 , resultando em 28 artigos. Após leitura de títulos e resumos, 21 artigos foram excluídos por falta de relevância ou acesso restrito, restando 7 artigos para análise final, permitindo construir um portfólio que subsidiou a análise quantitativa e qualitativa e a identificação de lacunas de pesquisa na área. A Figura 1 ilustra o fluxograma que retrata as etapas realizadas para levantamento dos dados dessa pesquisa.



Figura 1: Fluxograma utilizado para obtenção dos resultados bibliométricos.

2.2 Metodologia para o estudo de anterioridade

Após a análise realizada com o software *Biblioshiny* (pacote R bibliometrix), realizou-se o estudo de anterioridade afim de buscar nas bases de dados se há estudos relacionados a esta pesquisa patenteado.

Foi desenvolvida uma análise comparativa de diferentes plataformas de busca de patentes, com foco na verificação do estado da técnica, etapa fundamental no processo de busca de anterioridade. Essa busca é essencial para assegurar que uma invenção seja inédita e não infrinja direitos anteriores, evitando conflitos legais e otimizando investimentos em inovação.

Para isso, foram selecionadas as principais bases de dados nacionais e internacionais, incluindo: INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial – Brasil), Espacenet (Escritório Europeu de Patentes), Depatisnet (*Deutsches Patent- und Markenamt* – Alemanha) e Patentscope (Organização Mundial da Propriedade Intelectual – OMPI).

Inicialmente, realizou-se pesquisa em bases de dados para mapear a produção científica sobre o tema. As palavras-chave mais recorrentes foram agrupadas em sete conjuntos temáticos, complementadas por termos adicionais extraídos dos artigos. Cada conjunto orientou buscas de anterioridade em patentes, com análise de títulos e resumos para identificar registros relevantes.

Os sete conjuntos de palavras-chave foram: “*macroalgae*” and “*dye adsorption*”; “*macroalgae*” and “*adsorption*” and “*textile*”; “*macroalgae*” and “*adsorption of textile dye*”; “*macroalgae*” and “*adsorption*” and “*wastewater*” and “*textile industry*” and “*macroalgae*” and “*biosorption*” and “*wastewater*” and “*textile industry*”; “*macroalgae*” and “*removal of polluants*” and “*textile industry*”; “*macroalgae*” and “*water treatment*” and “*textile industry*”.

3 Resultados e discussão

3.1 Resultados para estudo bibliométrico

Este estudo bibliométrico realizou uma análise abrangente de 105 artigos científicos selecionados em bases de dados reconhecidas, com o objetivo de compreender as tendências, produtividade e o impacto da produção científica na área investigada. Observou-se um crescimento contínuo das publicações, especialmente a partir de 2017, quando a quantidade de estudos praticamente triplicou em relação aos anos anteriores. Esse aumento reflete o fortalecimento do interesse global pela temática, atingindo o pico em 2023, com mais de 15 artigos publicados. A redução observada entre 2024 a 2025 é atribuída ao fato de esses anos ainda não estarem completos no momento da coleta dos dados, fenômeno comum em análises em tempo real.

A distribuição geográfica das publicações indica a predominância de países asiáticos, com a China consolidando-se como a principal produtora científica a partir de 2020, superando o Irã, que liderava desde 2010. A crescente participação de países Egito, Índia e Indonésia indica a expansão e a descentralização dos centros de pesquisa, reforçando o fortalecimento científico em regiões em desenvolvimento. Por outro lado, países ocidentais como Brasil e Estados Unidos, mantêm contribuição estável, embora em níveis moderados. Regiões como a África Subsaariana e partes da América Central permanecem pouco representadas, refletindo desafios estruturais e necessidade de maior integração e investimento em pesquisa.

Quanto à produtividade individual, a análise evidenciou que Daneshvar E., lidera o ranking de publicações, seguido por Bhatnagar A. e Kousha M., configurando um núcleo autores de alta relevância

científica. Esses pesquisadores que não apenas ampliam o volume de estudos, mas também exercem influência significativa sobre metodologias, tendências e direções futuras, consolidando-se como referências internacionais no campo.

A análise dos periódicos com maior número de publicações mostra que a produção está concentrada em revistas de alto impacto, destacando-se o "Bioresource Technology" (nove publicações), "Biomass Conversion and Biorefinery" (oito) e "Journal of Hazardous Materials" (seis). Esses periódicos, voltados para as áreas de engenharia, tecnologia e sustentabilidade, representam as principais plataformas de disseminação de inovações e descobertas na área. Outros periódicos relevantes incluem "Chemical Engineering Journal", "Desalination and Water Treatment" e "Environmental Science and Pollution Research", que compõem o núcleo mais ativo e influente no campo.

Em relação ao impacto científico, a média de citações por artigo revelou maior relevância entre 2008 e 2010, com valores superiores a 15 citações por publicação, demonstrando alto reconhecimento acadêmico. Após 2011, observou-se uma queda gradual e posterior estabilização abaixo de 10 citações entre 2012 a 2021. Essa tendência decorre do tempo de publicação, que influencia o círculo de citações, e de fatores externos, como a pandemia de covid-19, que afetou a dinâmica de produção científica. Nos anos mais recentes (2023 - 2025), a média de citações permaneceu reduzida, consequência do curto intervalo temporal para citações.

Trabalhos de grande impacto, como os de Gadd (2009), publicado no *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* e com mais de 900 citações, exemplificam estudos pioneiros que fundamentaram pesquisas subsequentes. Tais publicações funcionam como marcos teóricos e metodológicos, orientando novos caminhos e padrões de excelência científica.

O panorama obtido confirma que a área se encontra em fase de amadurecimento, com crescimento expressivo, diversificação geográfica e consolidação de grupo de pesquisa. Esses resultados demonstram a relevância estratégica do campo na interface entre as engenharias e tecnologia, evidenciando seu papel essencial para o desenvolvimento sustentável e o tratamento de poluentes.

A Figura 2 aponta que os termos mais recorrentes concentram-se em "adsorption" (adsorção), refletindo o foco predominante dos estudos na utilização de materiais biológicos para remoção de poluentes em sistemas aquáticos. Observa-se ainda a presença destacada de palavras relacionadas à biosorção, remoção de contaminantes e corantes e tratamento de águas residuais, indicando forte ênfase na aplicação ambiental das macroalgas.



Figura 2: Nuvem de palavra formulada a partir das palavras-chave dos artigos selecionados para *macroalgae* e *dye adsorption*. using Bibliometrix/Biblioshiny (Aria e Cuccurullo, 2017).

A análise das palavras-chave demonstra que o campo está consolidado em torno do desenvolvimento de tecnologias baseadas em macroalgas, priorizando a compreensão dos mecanismos de remoção e a otimização das condições operacionais. A recorrência de termos como *equilibrium*, *kinetics* e *optimization* indica a preocupação com a modelagem dos processos, enquanto palavras como *biosorvents*, *low-cost* e *wastewater* ressaltam o foco em soluções sustentáveis e economicamente viáveis. Por outro lado, a diversidade de aplicações, evidenciada por termos relacionados ao tratamento de efluentes industriais e purificação de água, reforça o caráter multidisciplinar da área.

Esses resultados apontam a relevância e atualidade do tema, ao mesmo tempo em que revelam lacunas a serem exploradas, como a investigação de novas espécies de macroalgas, diferentes tipos de corantes e

métodos inovadores de preparação de bioassorventes. Assim, o campo se mostra em expansão, com elevado potencial para abordagens interdisciplinares envolvendo química, biotecnologia e engenharia.

Após a triagem dos títulos e resumos, foram selecionados sete artigos principais (Tabela 1), analisados qualitativamente para extrair informações metodológicas e resultados relevantes.

Tabela 1: Artigos selecionados para a pesquisa, detalhando os respectivos autores e os processos metodológicos empregados, com o intuito de fornecer uma visão clara e organizada das abordagens utilizadas na literatura relacionada ao tema.

AUTORES	PROCESSOS
Thinakaran et al. (2022)	Viabilidade do biocarvão de macroalgas usado para remoção do corante vermelho ácido 88 (ar) de sua solução aquosa
D Shah et al. (2021)	Estudo do potencial do biocarvão de macroalgas marinhas para remoção de corantes ácidos
Yanuhar et al. (2024)	Síntese verde de nano-óxido de cobre usando <i>Sargassum sp.</i> funcionalizado em membrana de acetato de celulose para adsorção de corantes
Escudero et al. (2017)	Macroalgas de <i>Iridaea cordata</i> como um eficiente biosorvente para remover corantes catiônicos perigosos de soluções aquosas
Daneshvar et al. (2015)	Aplicação da metodologia de superfície de resposta para a biosorção do corante azul ácido 25 usando macroalgas brutas e tratadas com HCl
Şahin et al. (2024)	Síntese verde de nanopartículas metálicas de macroalgas <i>codium</i> para remoção de poluentes de águas residuais por adsorção
Said Ali Akbar (2025)	Síntese fácil de ZnO/RGO/Fe2O3 usando a macroalga <i>Caulerpa taxifolia</i> como redutor de verde e sua aplicação como remoção de verde malaquita

Thinakaran et al. (2022) investigaram o uso de biocarvão derivado da macroalga *Kappaphycus alvarezii* para a remoção do corante Vermelho Ácido 88 de soluções aquosas. O biocarvão, obtido por carbonização hidrotérmica, alcançou 87,64% de remoção sob pH 7, temperatura de 35 °C e dose de 4 g/L. A adsorção seguiu a cinética de pseudo-segunda ordem e ajustou-se à isoterma de Freundlich. O estudo demonstra que resíduos de algas podem ser reaproveitados como adsorventes sustentáveis e eficazes no tratamento de efluentes têxteis.

D Shah et al. (2021) analisaram o uso de biocarvão produzido a partir da alga marinha *Ulva lactuca* para remoção do corante ácido Amarelo 19 de soluções aquosas. O biocarvão foi obtido por pirólise a 450 °C, com rendimento de 45%. O principal resultado foi a remoção de até 90% do corante sob pH 3, utilizando dose de 1 g e concentração inicial de 100 mg/L. A adsorção ajustou-se melhor à isoterma de Freundlich, indicando uma superfície heterogênea. O estudo evidencia que resíduos de algas podem ser reaproveitados como adsorventes sustentáveis e eficazes no tratamento de efluentes contendo corantes industriais.

Yanuhar et al. (2024) estudaram a síntese verde de nanopartículas de óxido de cobre (CuO) utilizando extrato da macroalga *Sargassum sp.* como agente redutor, posteriormente incorporadas em membranas de acetato de celulose bacteriano derivado de casca de abacaxi. O principal resultado foi a obtenção de nanopartículas com tamanho médio de cristalito de 19,5 nm e morfologia esférica, com alta eficiência na adsorção de corantes catiônicos (azul de metileno e verde malaquita), além de atividade antibacteriana aprimorada contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. A principal contribuição do estudo está na demonstração de uma rota ecológica, acessível e eficaz para a síntese de nanocatalisadores metálicos aplicáveis à remediação ambiental e a materiais antimicrobianos.

Escudero et al. (2017) avaliaram a biomassa da macroalga marinha vermelha *Iridaea cordata* como biosorvente para remoção dos corantes cristal violeta e azul de metileno de soluções aquosas. Utilizando planejamento fatorial 3², investigaram o efeito do pH e da concentração da biomassa sobre a eficiência de remoção. O principal resultado foi a remoção de 75% de CV e 90% de MB, com capacidades de biosorção de 36,5 mg/g e 45,0 mg/g, respectivamente, sob condições ótimas (pH 7; 1 g/L). A cinética seguiu o modelo de pseudo-segunda ordem e o equilíbrio ajustou-se à isoterma BET. O estudo demonstra que *I. cordata* é um biosorvente promissor, sustentável e eficiente para o tratamento de águas contaminadas com corantes catiônicos.

Daneshvar et al. (2015) investigaram a remoção do corante aniónico C.I. Acid Blue 25 (AB25) utilizando biomassa in natura e tratada com HCl das macroalgas marinhas *Padina australis* (marrom) e *Jania adhaerens* (vermelha). Por meio de planejamento experimental do tipo Box-Behnken, avaliaram os efeitos do pH, da concentração inicial do corante e da carga de biomassa sobre a eficiência de biosorção. O principal resultado indicou que a biomassa tratada com HCl de *J. adhaerens* apresentou a maior eficiência de remoção (85,19%), enquanto a biomassa não tratada atingiu apenas 50,56%. O estudo demonstra que a modificação química com ácido aumenta significativamente o desempenho de biosorventes naturais,

sendo uma estratégia eficaz e de baixo custo para o tratamento de efluentes industriais contendo corantes ácidos.

Şahin et al. (2024) desenvolveram a síntese verde de nanopartículas de paládio (Pd NP), platina (Pt NP) e óxido de ferro (Fe_3O_4 NP) a partir da macroalga *Codium* e avaliaram sua aplicação como nanoadsorventes na remoção de poluentes aquáticos. Os testes com águas reais e sintéticas mostraram que as Pd NP apresentaram a maior capacidade de adsorção para *cresol red* (37,19 mg/g) e naproxeno (50,03 mg/g), enquanto as Pt NP foram mais eficientes na remoção de azul de metileno (40,01 mg/g), todas em 150 minutos. A adsorção ajustou-se ao modelo de Langmuir e à cinética de pseudo-segunda ordem. O estudo demonstrou que nanopartículas metálicas obtidas via síntese verde a partir de algas podem ser reutilizadas e são altamente eficazes na remoção de fármacos e corantes de águas contaminadas, oferecendo uma alternativa sustentável para o tratamento de efluentes.

Said Ali Akbar (2025) sintetizou um compósito $\text{ZnO}/\text{rGO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ utilizando a macroalga *Caulerpa taxifolia* como agente redutor verde, com o objetivo de remover o corante verde malaquita de soluções aquosas. O material sintetizado apresentou elevada capacidade máxima de adsorção (454,5 mg/g) a pH 9, superando significativamente o desempenho de adsorventes convencionais e da rGO pura. A adsorção seguiu modelo cinético de pseudo-segunda ordem e a isoterma de Langmuir, indicando quimissão e adsorção monomolecular. O estudo propõe um adsorvente altamente eficiente, sustentável e de baixo impacto ambiental para o tratamento de águas contaminadas por corantes orgânicos.

Dentre os sete estudos analisados, seis possuem foco na indústria têxtil, o que evidencia não apenas a relevância do tema, mas também a existência de uma lacuna científica que demanda maior aprofundamento e ampliação das investigações nessa área.

3.2 Resultados para estudo de anterioridade

A análise demonstrou que cada plataforma de busca apresenta características específicas quanto à abrangência geográfica, qualidade e atualização dos dados, além das ferramentas de filtragem disponíveis.

Observou-se uma padronização entre os resultados obtidos nas diferentes plataformas, com variações mínimas nos dados recuperados pelas palavras-chave utilizadas. Isso indica que, embora existam particularidades nas ferramentas e formatos de apresentação, não houve distorções significativas nos resultados.

As Figuras 3 e 4 sintetizam os resultados obtidos em cada base de dados, permitindo evidenciar a quantidade de patentes identificadas por banco pesquisado. Essa análise comparativa é relevante para orientar pesquisadores na escolha da base mais adequada aos seus objetivos, seja uma busca focada no mercado nacional ou uma análise em escala internacional.

O estudo também reforça a importância da busca de anterioridade para assegurar os requisitos legais de patenteabilidade, como novidade e atividade inventiva, conforme estabelecido pela Lei da Propriedade Industrial brasileira (Lei nº 9.279/96) (Brasil, 1996 Para and Jurídicos n.d.).

Com o objetivo de avaliar o estado da técnica relacionado ao uso de macroalgas na remoção de poluentes de efluentes têxteis, foram analisadas patentes e publicações científicas relevantes.

O gráfico apresentado ilustra a quantidade de patentes relacionadas ao uso de macroalgas em processos de adsorção e tratamento de efluentes têxteis, distribuídas entre as bases de dados selecionadas e de acordo com os respectivos termos de busca.

A análise dos dados da Figura 3 indica que o termo “*macroalgae AND dye adsorption*” se destacou por apresentar o maior número de registros, totalizando 113 patentes na base Patentscope e 88 na Espacenet. As palavras chaves da quinta coluna revelam baixa ocorrência de patentes, indicando menor exploração tecnológica, enquanto as da última coluna mostram destaque também nas bases Espacenet (96) e Deutsches (49), sugerindo um crescente interesse em aplicações ambientais de maior abrangência.

Observa-se que as bases Espacenet e Patentscope constituem as principais fontes de depósitos de patentes, enquanto a Deutsches apresenta relevância para alguns termos de busca específicos. Por outro lado, o INPI não apresentou resultados para as pesquisas realizadas, evidenciando a ausência de registros nacionais e a limitada representatividade do Brasil neste campo tecnológico. O elevado número de patentes associadas à adsorção de corante reflete uma preocupação ambiental expressiva com os resíduos provenientes da indústria têxtil.

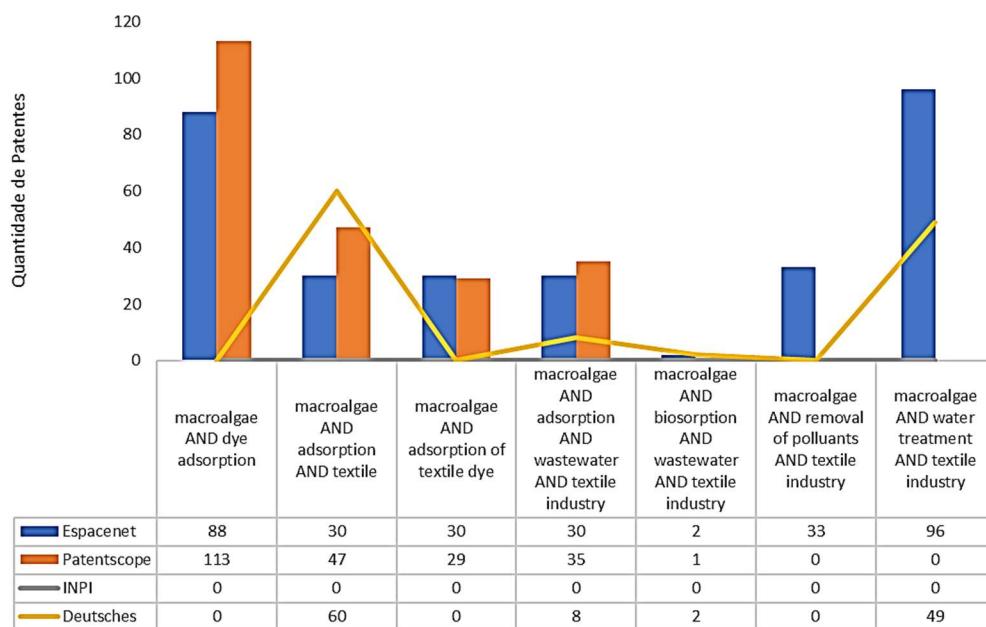


Figura 3: Análise dos sete conjuntos de palavras-chave utilizados na realização da pesquisa de anterioridade nas bases de dados mencionadas, pesquisa antes do refinamento.

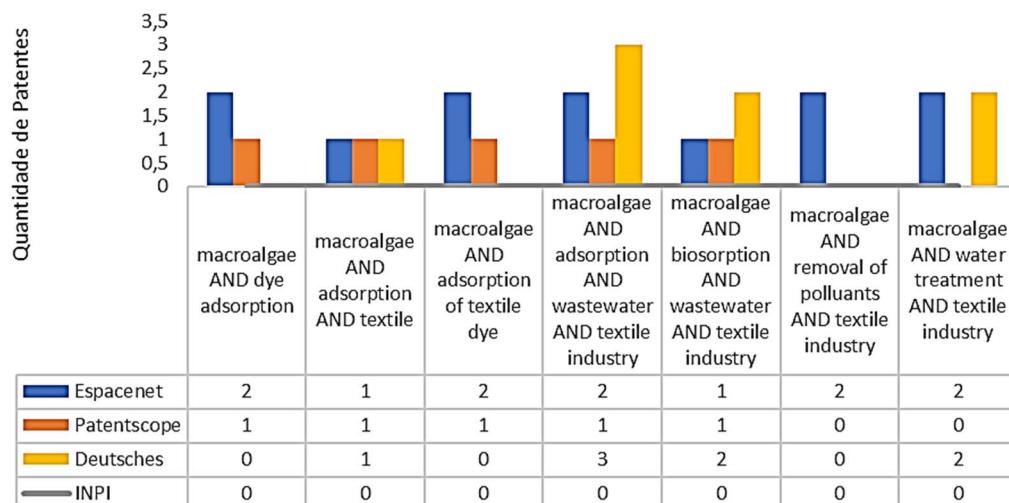


Figura 4: Análise dos sete conjuntos de palavras-chave utilizados na realização da pesquisa de anterioridade nas bases de dados mencionadas.

A Figura 4 apresenta a análise realizada a partir da leitura dos títulos e resumos das patentes identificadas inicialmente, envolvendo processos de adsorção, biossorção e tratamento de efluentes da indústria têxtil, distribuídas em diferentes bases de dados e termos de buscas específicos. Essa etapa permitiu o refinamento dos resultados, selecionando os documentos com maior similaridade técnica em relação à proposta deste estudo. Tal procedimento é fundamental para assegurar a relevância e a precisão na avaliação do estado da técnica, contribuindo para a identificação de lacunas e potenciais inovações associadas ao tema investigado.

Apesar do grande número de patentes identificadas, o refinamento dos termos de busca resultou em uma redução significativa, com no máximo três registros por combinação. Esse resultado evidencia que, embora o tema apresente alta relevância ambiental e científica, ainda é pouco explorado em termos tecnológicos e de proteção intelectual. Para a exclusão dos documentos não pertinentes, foram analisados os títulos e resumos, e, para aprimorar a compreensão dos textos, utilizou-se o apoio de ferramentas de inteligência artificial na elaboração de resumos expandidos. Após essa triagem, mantiveram-se apenas os registros considerados relevantes ao escopo da pesquisa.

Dentre os resultados, duas patentes apresentaram maior relevância técnica e metodológica, estando diretamente relacionadas ao presente estudo. Além dessas, foi identificada uma terceira patente de interesse, porém, por estar publicada em língua chinesa e não haver tradução disponível, não foi possível realizar uma

análise aprofundada desse estudo. Essa limitação reforça a importância de ampliar o acesso a bases internacionais para a realização de revisões tecnológicas mais abrangentes.

- Patente n.º US11504694B2 (2020) – Autores: Nazal Mazen Khaled [SA], Abuzaid Nabeel Saeed [SA] (Nazal et al., (54) ‘Reusable biomass-derived biochar adsorbent for phenolic compound, 2019’EUSABLE BIOMASS-DERIVED BIOCHAR ADSORBENT FOR PHENOLIC COMPOUND, 2019).
- Patente n.º WO2023134221 (2022) – Autores: Keh Edwin Yee Man [CN], Sin Addy [CN], Chan Alex [CN], Chan Jason [CN], Chueng Patrick [CN] (‘Macroalgal compositions and methods for decolorization and removal of pollutants from textile production effluents’).

4 Considerações finais

A análise bibliométrica e o estudo de anterioridade indicam que o uso de macroalgas como biosorventes na remoção de corantes têxteis é uma área promissora, sustentável e ainda pouco explorada. Desde 2017, observa-se crescimento da produção científica, com destaque para China e Irã. Apesar disso, há poucas patentes registradas, sinalizando oportunidades para inovação tecnológica.

No Brasil, a pesquisa sobre macroalgas é limitada, o que restringe o aproveitamento da biodiversidade e o desenvolvimento de aplicações com potencial ambiental e econômico. A literatura concentra-se em estudos experimentais voltados à eficiência da adsorção, mas carece de avanços na conversão desses dados em tecnologias aplicadas e protegidas.

A predominância de estudos voltados à indústria têxtil reforça a relevância do tema, mas aponta a necessidade de diversificação de espécies, rotas e aplicações. Conclui-se que as macroalgas apresentam elevado potencial para o tratamento de efluentes, sendo fundamental incentivar a pesquisa interdisciplinar, a proteção intelectual e a transferência de tecnologia.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Referências bibliográficas

- Akmese B (2025) ‘Removal of Brilliant Blue R and Victoria Blue R dyes from textile wastewater by adsorption method using pomegranate peel’, *BMC Chemistry*, v.19, n.1. <http://doi.org/10.1186/s13065-025-01476-4>.
- Albayari M, Nordin N, Adnan R, Khalili F and Nazal M (2024) ‘Biosorption of uranium(VI) and thorium(IV) from aqueous solution by marine *Sargassum aquifolium* macroalgae’, *Biomass Conversion and Biorefinery*, v.14, n.19, p.23501–23514. <http://doi.org/10.1007/s13399-023-04492-3>.
- Aravindhan R, Rao JR and Nair BU (2007) ‘Removal of basic yellow dye from aqueous solution by sorption on green alga *Caulerpa scalpelliformis*’, *Journal of Hazardous Materials*, v.142, n.1–2, 68–76. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.07.058.
- Aria M and Cuccurullo C (2017) ‘bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis’, *Journal of Informetrics*, v.11, n.4, p. 959–975, doi:10.1016/j.joi.2017.08.007.
- Machado Jr C, Saraiva de Souza MT, Palmisano A, Campanário MA, Parisotto IRS (n.d.) *Análise de viabilidade de Utilizar as Leis da Bibliometria em Diferentes Bases de Pesquisa*.
- Çetintas S, Ergül HA, Öztürk A and Bingöl D (2022) ‘Sorptive performance of marine algae (*Ulva lactuca* Linnaeus, 1753) with and without ultrasonic-assisted to remove Hg(II) ions from aqueous solutions: optimisation, equilibrium and kinetic evaluation’, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, v.102, n.6, p.1428–1451. <http://doi.org/10.1080/03067319.2020.1738415>.
- Daneshvar E, Kousha M, Sohrabi MS, Panahbehagh B, Bhatnagar A, Younesi H and Sternberg SPK (2015) ‘Application of response surface methodology for the biosorption of Acid Blue 25 dye using raw and HCl-treated macroalgae’, *Desalination and Water Treatment*, v.53, n.6, p.1710–1723. <http://doi.org/10.1080/19443994.2013.855666>.

- D Shah K, Brahmbhatt NH and Thaker PN (2021) ‘Study of Potential of Marine Macroalgae Biochar for Acid Dyes Removal’, *Oriental Journal Of Chemistry*, v.37, n.6, p.1415–1420. <http://doi.org/10.13005/ojc/370620>.
- Escudero LB, Smichowski PN and Dotto GL (2017) ‘Macroalgae of Iridaea cordata as an efficient biosorbent to remove hazardous cationic dyes from aqueous solutions’, *Water Science and Technology*, v.76, n.12, p.3379–3391. <http://doi.org/10.2166/wst.2017.505>.
- Haslinger S, Hummel M, Anghelescu-Hakala A, Määttänen M and Sixta H (2019) ‘Upcycling of cotton polyester blended textile waste to new man-made cellulose fibers’, *Waste Management*, v.97, p.88–96. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.040>.
- Khataee AR, Dehghan G, Ebadi A, Zarei M and Pourhassan M (2010) ‘Biological treatment of a dye solution by Macroalgae Chara sp.: Effect of operational parameters, intermediates identification and artificial neural network modeling’, *Bioresource Technology*, v.101, n.7, p.2252–2258. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.079>.
- Lebron YAR, Moreira VR and de Souza Santos LV (2021) ‘Biosorption of methylene blue and eriochrome black T onto the brown macroalgae Fucus vesiculosus: equilibrium, kinetics, thermodynamics and optimization’, *Environmental Technology (United Kingdom)*, v.42, n.2, p.279–297. <http://doi.org/10.1080/09593330.2019.1626914>.
- Lee XJ, Ong HC, Ooi J, Yu KL, Tham TC, Chen WH and Ok YS (2022) ‘Engineered macroalgal and microalgal adsorbents: Synthesis routes and adsorptive performance on hazardous water contaminants’, *Journal of Hazardous Materials*, v.423. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126921>.
- Micael J, Rodrigues P and Gíslason S (2021) ‘Native vs. non-indigenous macroalgae in Iceland: The state of knowledge’, *Regional Studies in Marine Science*, v.47. <http://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101944>.
- Nazal, MK, Abuzaid, NS (2022) ‘Reusable biomass-derived biochar adsorbent for phenolic compound’. US Patent 11,504,694.
- Provin AP, Cubas ALV and Dutra AR de A (2021) ‘Alternativas de materiais e processos mais sustentáveis para a indústria têxtil atual: uma revisão’, *Modapalavra e-periódico*, v.14, n.32, p.122–149. <http://doi.org/10.5965/1982615x14322021122>.
- Rocha M dos S, Coutinho ML, Figueiredo PHB, Castro SC de, Medeiros TKS de, Barros AL da S, Leal IAC and Freitas R de CRQ de (2024) ‘Avaliação da eficiência adsorptiva de azul de metileno por biomassas de Cajanus cajan e Caryocar brasiliense camb’, *Revista Contemporânea*, v.4, n.9, e.5924. <http://doi.org/10.56083/rccv4n9-193>.
- Şahin M, Arslan Y, Tomul F, Akgül F and Akgül R (2024) ‘Green synthesis of metal nanoparticles from Codium macroalgae for wastewater pollutants removal by adsorption’, *Clean - Soil, Air, Water*, v.52, n.5, p.1–11. <http://doi.org/10.1002/clen.202300187>.
- Said Ali Akbar and MH (2025) ‘Facile synthesis of zno/rgo/fe₂o₃ using macroalgae *Caulerpa taxifolia* as green reductor and its application as malachite green removal’, *Chem. Soc. Ethiop.*, v.39, n.1, p.29–47.
- Thinakaran E, Brema J and Arumairaj PD (2022) ‘Feasibility of spent macroalgae biochar for removal of Acid Red 88 (AR) dye from its aqueous solution’, *Global Nest Journal*, v.24, n.3, p.392–400. <http://doi.org/10.30955/gnj.004322>.
- Yanuhar U, Suryanto H, Amin M, Binoj JS and Casuarina I (2024) ‘Green synthesis of nano-copper oxide using Sargassum sp. functionalized in cellulose acetate membrane for dye adsorption’, *Global Journal of Environmental Science and Management*, v.10, n.4, p.1933–1950. <http://doi.org/10.22034/gjesm.2024.04.26>.
- Yasin S and Sun D (2019) ‘Propelling textile waste to ascend the ladder of sustainability: EOL study on probing environmental parity in technical textiles’, *Journal of Cleaner Production*, v.233, p.1451–1464. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.009>.