



Revisão crítica sobre o papel das macroalgas no sequestro de carbono e na regeneração ambiental marinha

Heloísa Arruda Soares de Oliveira¹, Dayanne Fonseca Bergamasco¹, Gabrielle Batista dos Santos¹,
Larissa Rebeka Fratucello Alves¹, Sofia Baccan Arena¹, Thayssa Duarte Costa^{2*}

¹Graduandas do Curso de Medicina Veterinária, Centro Universitário Anhanguera Leme, São Paulo, Brasil.

²Doutora em Ciências, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP), São Paulo, Brasil (*Autora correspondente: thayssa.costa20@gmail.com)

Histórico do Artigo: Submetido em: 02/11/2025 – Revisado em: 26/12/2025 – Aceito em: 17/01/2026

RESUMO

Macroalgas desempenham um papel central na mitigação das mudanças climáticas e na regeneração ambiental marinha, devido à sua capacidade de sequestrar carbono e fornecer serviços ecossistêmicos críticos. Esta revisão crítica sintetiza estudos recentes sobre a contribuição das macroalgas para o carbono azul, destacando mecanismos de captura, armazenamento e transferência de carbono para sedimentos marinhos. A análise enfatiza a importância da biomassa de macroalgas como recurso sustentável, capaz de apoiar práticas de mitigação de carbono e restaurar habitats costeiros degradados. Além disso, são discutidos os desafios da gestão ambiental e da implementação de sistemas de cultivo de macroalgas que conciliem produtividade, biodiversidade e sustentabilidade marinha. Lacunas de pesquisa são identificadas, incluindo a necessidade de padronização metodológica, monitoramento de longo prazo e avaliação integrada de impactos ecológicos e socioeconômicos. Os resultados indicam que políticas e práticas de manejo adequadas podem maximizar os benefícios das macroalgas para a mitigação de carbono e regeneração de ecossistemas costeiros, reforçando seu potencial como ferramenta estratégica na conservação marinha e no combate às alterações climáticas.

Palavras-Chaves: Carbono azul, Mitigação de carbono, Biomassa de macroalgas, Sustentabilidade marinha, Gestão ambiental.

Critical review on the role of macroalgae in carbon sequestration and marine environmental restoration

ABSTRACT

Macroalgae play a central role in climate change mitigation and marine environmental restoration due to their capacity to sequester carbon and provide critical ecosystem services. This critical review synthesizes recent studies on the contribution of macroalgae to blue carbon, highlighting mechanisms of carbon capture, storage, and transfer to marine sediments. The analysis emphasizes the importance of macroalgae biomass as a sustainable resource capable of supporting carbon mitigation practices and restoring degraded coastal habitats. Additionally, challenges related to environmental management and the implementation of macroalgae cultivation systems that balance productivity, biodiversity, and marine sustainability are discussed. Research gaps are identified, including the need for methodological standardization, long-term monitoring, and integrated assessment of ecological and socioeconomic impacts. Findings suggest that appropriate policies and management strategies can maximize the benefits of macroalgae for carbon mitigation and coastal ecosystem regeneration, reinforcing their potential as a strategic tool for marine conservation and climate change mitigation.

Keywords: Blue carbon, Carbon mitigation, Macroalgae biomass, Marine sustainability, Environmental management.

De Oliveira, H. A.; Bergamasco, D. F.; dos Santos, G. B.; Alves, L. R. F.; Arena, S. B.; Costa, T. D. (2026). Revisão crítica sobre o papel das macroalgas no sequestro de carbono e na regeneração ambiental marinha. **Meio Ambiente (Brasil)**, v.8, n.1, p.46-59.



Direitos do Autor. A Meio Ambiente (Brasil) utiliza a licença *Creative Commons* - CC BY 4.0.

Revisión crítica sobre el papel de las macroalgas en la captura de carbono y la regeneración ambiental marina

RESUMEN

Las macroalgas desempeñan un papel central en la mitigación del cambio climático y la restauración ambiental marina debido a su capacidad para secuestrar carbono y proporcionar servicios ecosistémicos críticos. Esta revisión crítica sintetiza estudios recientes sobre la contribución de las macroalgas al carbono azul, destacando los mecanismos de captura, almacenamiento y transferencia de carbono a los sedimentos marinos. El análisis enfatiza la importancia de la biomasa de macroalgas como recurso sostenible, capaz de apoyar prácticas de mitigación de carbono y restaurar hábitats costeros degradados. Además, se discuten los desafíos relacionados con la gestión ambiental y la implementación de sistemas de cultivo de macroalgas que equilibren productividad, biodiversidad y sostenibilidad marina. Se identifican brechas de investigación, incluyendo la necesidad de estandarización metodológica, monitoreo a largo plazo y evaluación integrada de impactos ecológicos y socioeconómicos. Los resultados sugieren que políticas y estrategias de manejo adecuadas pueden maximizar los beneficios de las macroalgas para la mitigación de carbono y la regeneración de ecosistemas costeros, reforzando su potencial como herramienta estratégica para la conservación marina y la lucha contra el cambio climático.

Palabras clave: Carbono azul, Mitigación de carbono, Biomasa de macroalgas, Sostenibilidad marina, Gestión ambiental.

1. Introdução

Nas últimas décadas, a intensificação das mudanças climáticas tem impulsionado uma busca global por soluções eficazes de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, especialmente do dióxido de carbono (CO₂). O aumento da temperatura média do planeta, a elevação do nível do mar e os eventos climáticos extremos são apenas algumas das consequências observadas do aquecimento global, fenômeno amplamente atribuído à concentração crescente de CO₂ na atmosfera; e diante desse cenário, o sequestro de carbono se consolidado como uma estratégia para conter o agravamento da crise climática, contudo as abordagens atualmente em desenvolvimento, como a captura e o armazenamento geológico de carbono (CCS), apresentam altos custos financeiros, demandas tecnológicas complexas e aplicabilidade limitada em larga escala, especialmente em países em desenvolvimento (Krause-Jensen; Duarte, 2016; Anderson et al., 2023).

Neste contexto, cresce o interesse por soluções baseadas na natureza, mais acessíveis e potencialmente regenerativas, entre as quais se destaca o cultivo de algas marinhas (Duarte et al., 2017). As macroalgas possuem alta capacidade de crescimento, não requerem solo, água doce ou fertilizantes para se desenvolver e realizam intensa fotossíntese, capturando grandes quantidades de CO₂ dissolvido na água; agregado a isso também contribuem para a regeneração de ecossistemas marinhos, promovem a biodiversidade e oferecem uma variedade de subprodutos com aplicações alimentares, industriais e agrícolas (Duffy et al., 2019). Estudos dos último sete anos discutem a viabilidade do afundamento controlado de biomassa desse material como mecanismo para armazenar carbono nas profundezas oceânicas, ampliando o potencial climático dessa prática; assim, as algas emergem como uma solução promissora, integrando benefícios ambientais, sociais e econômicos em uma abordagem alinhada aos princípios da sustentabilidade (Krause-Jensen et al., 2018; Queirós et al., 2019; Dahai et al., 2024).

Iniciativas ao redor do mundo já vêm explorando o potencial das macroalgas para o sequestro de carbono em escala experimental e pré-comercial. Por exemplo, o projeto *Seaweed Carbon Solutions*, apoiado pela Equinor e outras organizações, está conduzindo um piloto na costa da Noruega para cultivar algas marinhas e transformá-las em *biochar*, que é um material carbonizado obtido por pirólise de biomassa, visando justamente o armazenamento de carbono ao solo como estratégia de sequestro desse elemento químico a longo prazo; essa abordagem une os altos índices de fixação de CO₂ pelas algas através da fotossíntese com a estabilidade química do *biochar*, que pode permanecer no solo por centenas a milhares de anos, retardando o retorno do carbono na atmosfera. Portanto, esse processo seria uma alternativa sustentável para o uso de biomassa marinha, com potenciais benefícios agrônômicos e climáticos (Boettcher et al., 2023). Empresas nos Estados Unidos também estão investindo em tecnologias de cultivo automatizado e monitoramento remoto

para implementar o afundamento controlado de algas em regiões profundas dos oceanos. A principal vantagem dessa técnica é a possibilidade de capturar carbono de forma natural e eficiente, sem competir com terras agrícolas ou recursos de água doce, ao mesmo tempo em que gera efeitos colaterais positivos para a biodiversidade marinha e para a economia azul (Farghali et al., 2023; Park et al., 2024). Ademais, o cultivo de algas pode ser integrado a sistemas de aquicultura multitrófica, otimizando a produtividade de cadeias alimentares costeiras e contribuindo para a resiliência dos ecossistemas diante das mudanças climáticas. O estudo *Oceans 2050 Seaweed Study* analisou 20 fazendas de algas em cinco continentes, demonstrando que essas práticas podem enterrar carbono em sedimentos a taxas comparáveis a habitats de carbono azul, como manguezais e pradarias marinhas. Essas iniciativas destacam o potencial do cultivo de algas como uma solução natural e escalável para a mitigação das mudanças climáticas (Duarte et al., 2025).

Apesar do entusiasmo em torno do cultivo de algas para o sequestro de carbono, existem preocupações acerca do assunto (Schenuit et al., 2023; Fujita et al., 2023). A eficácia a longo prazo do afundamento de biomassa de algas para o armazenamento permanente de carbono ainda não é totalmente compreendida, especialmente considerando os complexos processos biogeoquímicos oceânicos; acrescentado a isso há riscos ecológicos associados à introdução de grandes cultivos de algas, como impactos nas comunidades bentônicas e possíveis desequilíbrios nos ecossistemas marinhos; ainda há questões legais e de governança que também surgem, dado que a regulamentação internacional sobre o descarte de biomassa no fundo do oceano é limitada (Anderson et al., 2023; Nemet et al., 2023). Portanto, é essencial que futuras pesquisas abordem essas lacunas de conhecimento e que políticas adequadas sejam desenvolvidas para garantir que tais práticas sejam implementadas de maneira segura e eficaz.

Diante do crescente interesse científico e comercial pelo uso de macroalgas como ferramenta natural para mitigação das mudanças climáticas, este artigo de revisão tem como objetivo sintetizar a literatura disponível sobre o potencial das algas marinhas no sequestro de carbono, com foco nos mecanismos envolvidos, nas aplicações práticas já em curso e nos principais desafios e incertezas que permeiam essa estratégia. Ao compilar evidências empíricas e discussões teóricas, busca-se oferecer uma visão crítica e atualizada sobre a viabilidade dessa abordagem no contexto das soluções baseadas na natureza. Além disso, o artigo pretende contribuir para o embasamento técnico e científico de futuras pesquisas, políticas públicas e decisões estratégicas relacionadas ao cultivo e manejo sustentável de algas marinhas em escala global.

2. Metodologia

Trata-se de uma revisão narrativa crítica da literatura, de abordagem qualitativa, com o objetivo de analisar o papel das macroalgas no sequestro de carbono e na regeneração ambiental marinha, integrando aspectos biológicos, ecológicos, ambientais e socioeconômicos. A revisão narrativa da literatura consiste na coleta, síntese e análise crítica de fontes relevantes para um tema específico, permitindo uma visão integrativa e interpretativa do estado atual do conhecimento; valendo comentar que esta abordagem não segue um protocolo pré-definido de replicabilidade, mas é amplamente utilizada para identificar tendências, lacunas conceituais e relações entre estudos anteriormente publicados (Green; Johnson e Adams, 2006).

A busca bibliográfica foi conduzida nas bases de dados SciELO, Scopus e PubMed, abrangendo publicações de aproximadamente dez anos, incluindo artigos científicos, revisões e estudos teóricos considerados relevantes para o tema em análise. Na busca bibliográfica foram utilizadas palavras-chave pertinentes ao tema, incluindo termos como macroalgas, sequestro de carbono, regeneração ambiental marinha, *sinking seaweed*, produção de algas e benefícios ambientais e econômicos; considerando publicações em português e inglês, de modo a abranger a literatura relevante e representativa sobre o assunto.

A seleção dos estudos foi conduzida com base em critérios de relevância conceitual, consistência científica e aderência aos objetivos da revisão, privilegiando trabalhos que abordassem diferentes dimensões do tema, incluindo as inter-relações entre biologia e ecologia do sequestro de carbono por macroalgas, os

potenciais co-benefícios ambientais e econômicos dessas espécies, bem como os desafios e limitações ecológicas associados à sua produção, além das perspectivas sobre o assunto. A análise dos estudos selecionados foi realizada por meio de interpretação crítica e síntese temática, permitindo integrar e articular os principais achados e debates presentes na literatura, sem recorrer a critérios de replicabilidade estrita típicos de revisões sistemáticas.

3. Conexões entre biologia, ecologia e o sequestro de carbono por algas marinhas

As macroalgas marinhas pertencem a três grandes grupos taxonômicos: *Chlorophyta* (algas verdes), *Phaeophyceae* (algas pardas) e *Rhodophyta* (algas vermelhas), os quais apresentam ampla diversidade em termos de morfologia, fisiologia e distribuição geográfica, e também lhes permite colonizar diferentes zonas litorâneas, desde áreas intertidais (ou zona entremarés) até regiões subtidais profundas (ou zona submersa permanente), além de ambientes pelágicos (Nauer; Lopes Filho, 2017). Dentre os grupos mais estudados destacam-se os *kelps* (Bertocci et al., 2015; Smale, 2020), as espécies de *Sargassum* (Zhang et al., 2020) e representantes dos gêneros *Gracilaria* (Baghel et al., 2014), *Ulva* (Taboada et al., 2010; Park et al., 2024) e *Porphyra* (Cao et al., 2016). Os *kelps*, especialmente aqueles do gênero *Macrocystis*, possuem talos de grande porte, com estrutura diferenciada em rizóides, cauloides e filoides, permitindo a formação de florestas subaquáticas densas e verticalizadas em águas temperadas e frias, como nas costas do Pacífico da América do Norte e do Sul (Bertocci et al., 2015); esses habitats funcionam como verdadeiros ecossistemas tridimensionais, oferecendo abrigo, substrato e fonte de alimento para uma elevada diversidade de organismos marinhos, incluindo peixes, invertebrados e mamíferos aquáticos (Smale, 2020). Por outro lado, as espécies de *Sargassum*, típicas de águas tropicais e subtropicais, apresentam vesículas aeríferas que lhes conferem flutuabilidade, permitindo a formação de bancos flutuantes; um exemplo notável é o Mar dos Sargaços, no Atlântico Norte, onde essas massas de algas sustentam comunidades faunísticas altamente especializadas, servindo como áreas de alimentação, refúgio e desenvolvimento para uma ampla gama de espécies, incluindo peixes pelágicos, invertebrados e tartarugas marinhas (Zhang et al., 2020).

Do ponto de vista biológico, as macroalgas apresentam ciclos de vida complexos, com a ocorrência de alternância de gerações heteromórfica ou isomórfica, dependendo do grupo taxonômico; o que significa que esse processo envolve uma transição sequencial entre fases haploides (gametofíticas) e diploides (esporofíticas), com marcadas diferenças morfológicas e fisiológicas entre essas etapas em diferentes espécies (Thursby; Steele, 2020). Nos *kelps*, por exemplo, como *Macrocystis pyrifera*, a fase esporofítica é macroscópica, perene e dominante, formando grandes estruturas multicelulares visíveis a olho nu, enquanto os gametófitos são microscópicos, de curta duração e com desenvolvimento restrito ao substrato bentônico. Essa estratégia reprodutiva, caracterizada por uma produção eficiente de esporos de dispersão ampla e gametas especializados, permite uma rápida colonização de novos habitats, além de favorecer a resiliência das populações frente a distúrbios naturais ou antrópicos, como tempestades, herbivoria ou mudanças na qualidade da água (Bertocci et al., 2015; Thursby; Steele, 2020). Tal plasticidade no ciclo de vida garante a manutenção e expansão das populações, mesmo em ambientes costeiros altamente dinâmicos.

Outro aspecto biológico de destaque nas macroalgas é a sua elevada taxa de crescimento, que varia entre espécies e condições ambientais. A *Macrocystis pyrifera* possui talos que podem apresentar incrementos superiores a 60 centímetros por dia em condições ideais de luminosidade, temperatura e disponibilidade de nutrientes e isso associada a uma alta eficiência fotossintética confere a espécie um papel relevante como fixadoras primárias de carbono nos oceanos (Smale, 2020). Outro grupo de interesse é representado pelas algas vermelhas do gênero *Gracilaria*, amplamente distribuídas em águas costeiras rasas de regiões tropicais e temperadas. Essas espécies são reconhecidas por seu rápido crescimento em sistemas de cultivo e por seu potencial em biotecnologia marinha, sendo utilizadas inclusive na produção de fitomassa para

biocombustíveis, além de servirem como matéria-prima na indústria de hidrocolóides (como o ágar-ágar) (Baghel et al., 2014).

Ecologicamente, as macroalgas atuam como engenheiras de ecossistemas, modulando condições ambientais e estruturando habitats essenciais para a sobrevivência de diversas espécies (De Jesus et al., 2014). Em recifes de coral, embora algumas macroalgas possam competir com corais por espaço e luz, seu papel como fonte de alimento e abrigo para peixes herbívoros e invertebrados é incontestável. Em costões rochosos, especialmente nas zonas intertidal e subtidal, as algas marinhas criam microhabitats com condições de umidade e temperatura mais estáveis, favorecendo a colonização por uma variedade de organismos bentônicos (Fabricius et al., 2023). Acrescentado a isso, são fundamentais na ciclagem de nutrientes e no fornecimento de matéria orgânica para a teia trófica marinha (Muniz et al., 2013). Vale comentar ainda que mesmo no ambiente pelágico, os bancos flutuantes de *Sargassum* representam *hotspots* de biodiversidade, funcionando como refúgios para espécies juvenis de peixes, invertebrados, aves marinhas e até mesmo tartarugas (Moisez, Spilmont e Seuront, 2020), portanto pode-se afirmar que a presença e a dinâmica das macroalgas estão intrinsecamente ligadas ao equilíbrio dos ecossistemas marinhos, à produtividade primária costeira e à regulação de processos globais, como o ciclo do carbono.

No contexto do ciclo biogeoquímico do carbono, destaca-se o papel fundamental das macroalgas marinhas como importantes fixadoras de CO₂, uma vez que, por meio da fotossíntese, esses organismos utilizam a energia solar para converter o carbono inorgânico dissolvido na água em matéria orgânica, sendo que a maioria realiza essa fixação pela via C₃, na qual o CO₂ é diretamente incorporado através da ação da enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO) (De Freitas Nunes-Neto et al., 2009; Valdespino et al., 2022). Algumas espécies de macroalgas desenvolvem até mesmo mecanismos de concentração de carbono (Carbon Concentrating Mechanisms – CCMs), que aumentam a disponibilidade intracelular de CO₂ para a fotossíntese, especialmente em condições de limitação de carbono inorgânico no ambiente aquático, exemplos incluem representantes dos gêneros *Ulva* (Chlorophyta), *Gracilaria* (Rhodophyta) e *Macrocystis* (Phaeophyceae), que possuem diferentes estratégias bioquímicas e morfofisiológicas para otimizar a captação e utilização de carbono inorgânico dissolvido (Queirós et al., 2019; Park et al., 2024). Esses processos resultam na produção de biomassa algal que pode ser transferida ao longo da cadeia trófica ou transportada para depósitos sedimentares profundos, contribuindo efetivamente para o sequestro de carbono em ecossistemas marinhos (Duarte et al., 2025).

4. Possíveis co-benefícios ambientais e econômicos do sequestro de carbono por macroalgas: perspectivas a partir do estudo *sinking seaweed*

A biomassa resultante da fotossíntese pelas macroalgas marinhas pode seguir diferentes destinos no ambiente costeiro: ser incorporada à teia trófica local ou exportada para compartimentos de armazenamento de longo prazo no oceano profundo. Um dos principais mecanismos envolvidos nesse processo de sequestro é o transporte vertical da biomassa para águas profundas, comumente referido como *sinking* (Dahai et al., 2024). Esse fenômeno ocorre por meio do desprendimento natural de estruturas das algas, como frondes, talos e, em alguns casos, a planta inteira, que ao perderem flutuabilidade devido a processos de senescência, degradação ou alteração da densidade, passam a ser transportadas por correntes marinhas em direção ao fundo oceânico. Os principais destinos desses materiais incluem cânions submarinos, taludes continentais e planícies abissais (Duarte et al., 2017).

A deposição de matéria orgânica de origem macroalgal em sedimentos profundos reduz significativamente a taxa de remineralização do carbono, promovendo sua retenção em escalas de tempo geológicas. A eficiência desse sequestro depende de múltiplos fatores físicos, biológicos e geoquímicos, incluindo a taxa de exportação de biomassa, a profundidade de deposição e as condições redox do sedimento (Krause-Jensen et al., 2018).

Embora persistam incertezas substanciais quanto à magnitude global do sequestro de carbono mediado por macroalgas evidências recentes têm avançado na quantificação desse processo. Krause-Jensen e Duarte (2016) estimam que cerca de 173 teragramas (Tg) de carbono por ano derivados da produção primária de macroalgas podem ser exportados para regiões oceânicas profundas, onde o carbono pode ser efetivamente sequestrado por escalas de tempo centenárias a milenares. Este fluxo de exportação ocorre predominantemente por meio do afundamento de biomassa particulada e da incorporação de matéria orgânica em detritos transportados lateralmente para além da zona costeira, ultrapassando os limites dos ecossistemas de origem.

Essas estimativas, embora ainda conservadoras, sugerem que as macroalgas desempenham um papel ativo, porém historicamente negligenciado, no ciclo global do carbono azul. O termo “carbono azul” refere-se ao carbono orgânico capturado e armazenado por ecossistemas marinhos e costeiros, tradicionalmente associado a habitats como manguezais, marismas e pradarias marinhas. Esses sistemas são reconhecidos pela capacidade de sequestrar carbono de forma eficiente e duradoura, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Duarte et al., 2025). No entanto, os fluxos de carbono associados às macroalgas, que frequentemente não estão diretamente vinculados a sedimentos anóxicos tradicionalmente considerados como compartimentos de armazenamento de carbono, permanecem sub-representados nos modelos globais de ciclo biogeoquímico e nas métricas de contabilização climática (Queirós et al., 2019).

Avanços recentes em modelagem biogeoquímica e hidrodinâmica têm aprimorado significativamente as estimativas do potencial de sequestro de carbono associado ao afundamento de biomassa macroalgal. Esses modelos incorporam variáveis fundamentais, como a dinâmica do transporte lateral, taxas de decomposição microbiana e físico-química da biomassa, bem como a variabilidade espacial e temporal da produção primária, permitindo uma representação mais realista dos fluxos de carbono entre zonas costeiras produtivas e compartimentos oceânicos profundos. A integração dessas variáveis tem sido crucial para elucidar os mecanismos que regem a transferência de matéria orgânica particulada além da zona eufótica, onde o carbono pode ser efetivamente removido da atmosfera e armazenado em escalas geológicas (Fujita et al., 2023).

Paralelamente, estudos empíricos utilizando armadilhas de sedimentos, análises de isótopos estáveis e técnicas de rastreamento com carbono marcado têm sido fundamentais para validar e refinar essas modelagens, fornecendo evidências diretas do destino da biomassa algal no ambiente marinho. Esses métodos têm demonstrado que uma fração significativa da produção primária de macroalgas pode escapar da remineralização nas zonas superficiais e alcançar camadas profundas da coluna d'água ou o fundo oceânico, onde o carbono é potencialmente armazenado por décadas a milênios, dependendo das condições locais (Zhu et al., 2025).

Do ponto de vista econômico, a valorização dos serviços ecossistêmicos prestados pelas macroalgas tem impulsionado iniciativas voltadas à sua quantificação e monetização no contexto dos mercados emergentes de créditos de carbono (Vindel, Trincado e Sánchez-Bayón, 2021). Com a crescente demanda por soluções baseadas na natureza (Nature-based Solutions, NbS), o cultivo de macroalgas está sendo cada vez mais explorado como estratégia promissora para a geração de créditos de carbono azul, ainda que desafios regulatórios e metodológicos persistam quanto à elegibilidade, adicionalidade e permanência do carbono sequestrado (Boettcher, Geden e Schenuit, 2023). A ausência de um arcabouço normativo específico que reconheça plenamente a contribuição das macroalgas nos mecanismos formais de compensação climática representa um entrave à sua integração plena nos instrumentos financeiros internacionais de descarbonização.

A biomassa algal, além de seu valor climático, apresenta elevado potencial para aplicações industriais sustentáveis, configurando-se como uma matéria-prima versátil para diversos setores da bioeconomia. Entre suas aplicações mais promissoras destacam-se a produção de biocombustíveis de segunda geração, como bioetanol, biogás e hidrogênio verde; o desenvolvimento de ingredientes funcionais para a indústria alimentícia, incluindo fibras solúveis, polissacarídeos e antioxidantes; e a extração de compostos bioativos com propriedades anti-inflamatórias, antivirais e antimicrobianas, com elevado valor agregado para os setores farmacêutico e cosmeceutico (Farghali et al., 2023). Derivados algais como carragenanas, alginatos e

fucoïdanos vêm sendo amplamente estudados por sua aplicabilidade como espessantes, emulsificantes e agentes terapêuticos, destacando o potencial da biotecnologia marinha para impulsionar cadeias produtivas inovadoras e ambientalmente sustentáveis (Vindel, Trincado e Sánchez-Bayón, 2021).

A integração entre conservação ambiental e uso sustentável da biomassa macroalgal representa uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento socioeconômico de comunidades costeiras, especialmente em regiões onde alternativas econômicas são limitadas e a vulnerabilidade às mudanças climáticas é elevada. Projetos de maricultura de macroalgas, quando manejados de forma ecológica e participativa, podem contribuir para a geração de empregos locais, a diversificação de fontes de renda e a valorização de saberes tradicionais associados ao uso de recursos marinhos (Olanrewaju et al., 2017; Fricke et al., 2024). Nesse contexto, as macroalgas são associadas à promoção de uma economia azul resiliente e inclusiva, orientada por princípios de circularidade, baixo impacto ambiental e equidade social, relevantes para processos de transição ecológica (Fricke et al., 2024).

5. Desafios e limitações da produção de macroalgas: questões ecológicas, logísticas e tecnológicas

Apesar do crescente interesse na produção de macroalgas como estratégia sustentável para o sequestro de carbono e fornecimento de biomassa para diversos setores industriais, essa atividade enfrenta uma série de desafios e limitações que precisam ser cuidadosamente avaliados. A intensificação dos cultivos, especialmente sob sistemas de monocultura, pode comprometer a biodiversidade local e alterar os ecossistemas marinhos, isso porque a homogeneização biológica resultante da monocultura reduz a resiliência ecológica dos sistemas, tornando-os mais vulneráveis a doenças, pragas e mudanças ambientais (Fujita et al., 2023). Por exemplo, o cultivo intensivo de *Kappaphycus alvarezii*, uma espécie de alga vermelha amplamente utilizada na indústria de ficocolóides para a extração de carragena, tem sido adotado em diversos países tropicais, inclusive no Brasil, que demonstra crescente interesse em sua exploração comercial (Santos, 2023). Essa espécie apresenta alta produtividade e facilidade de propagação vegetativa, características que a tornam atrativa para programas de bioeconomia marinha e geração de renda em comunidades costeiras, porém, seu cultivo em larga escala tem levantado preocupações ecológicas (Chandrasekaran et al., 2008). Estudos conduzidos em áreas de cultivo no litoral brasileiro indicam que a expansão não controlada dessa alga pode alterar a estrutura de comunidades bentônicas, principalmente por sombreamento do substrato e possível liberação de compostos alelopáticos, além de que, por se tratar de uma espécie exótica, existe o risco de dispersão e naturalização em ambientes sensíveis, o que reforça a necessidade de regulamentação ambiental específica e estratégias de manejo sustentável (Castelar, de Siqueira e Sánchez-Tapia, 2015; Araújo et al., 2020).

Além disso, a introdução de espécies exóticas para cultivo, frequentemente selecionadas por seu rápido crescimento ou maior teor de biomoléculas de interesse, pode levar à dispersão acidental dessas espécies no ambiente natural, desencadeando processos de invasão biológica. Um caso emblemático é o da alga *Undaria pinnatifida*, nativa do leste asiático, que se tornou invasora em diversas regiões temperadas após ser introduzida para fins comerciais. Essa espécie se estabelece com facilidade, competindo com as nativas e modificando as estruturas ecológicas costeiras (South et al., 2017; Epstein; Smale, 2017).

Outro ponto crítico a ser considerado diz respeito às barreiras logísticas e tecnológicas que limitam a escalabilidade da produção de macroalgas em ambientes marinhos. O cultivo em mar aberto, especialmente em regiões com alta energia hidrodinâmica, como o litoral nordeste brasileiro, áreas do Pacífico Sul e zonas costeiras do Japão, exige a implementação de sistemas flutuantes ou submersos capazes de resistir a correntes, ventos e à ação das ondas (Olanrewaju et al., 2017; Bak, Gregersen e Infante, 2020). Por exemplo, o cultivo de *Macrocystis pyrifera* no Chile requer estruturas flutuantes ancoradas em profundidade e confeccionadas com materiais anticorrosivos, elevando consideravelmente os custos de instalação e manutenção (Camus, Infante e Buschmann, 2019).

A ancoragem estável em fundos marinhos móveis ou profundos, assim como o monitoramento remoto em tempo real para detecção de bioincrustações, rupturas e perdas de biomassa, ainda representam gargalos tecnológicos (Mora-Soto et al., 2020). Tais dificuldades são ainda mais pronunciadas em países com baixa capacitação em engenharia oceânica aplicada à aquicultura, como ocorre em várias regiões da América Latina e África Subsaariana, onde a ausência de infraestrutura portuária adequada e logística costeira funcional dificulta o transporte, armazenamento e processamento da biomassa (Bannister et al., 2019; Morro et al., 2022).

A automatização dos processos de plantio, monitoramento e colheita permanece um desafio para a produção de macroalgas. Em cultivos de *Eucheuma* e *Kappaphycus*, em países como Filipinas e Indonésia, as operações são predominantemente manuais, demandando intensa mão de obra e expondo os trabalhadores a condições marítimas adversas (Largo et al., 2017; Nisa, Jatayu e Alfiani, 2024). Embora existam avanços em sistemas mecanizados, incluindo o uso de veículos subaquáticos autônomos (AUVs) para inspeção e colheita em projetos-piloto na Noruega e o desenvolvimento de plataformas modulares de cultivo vertical em Singapura, a viabilidade econômica e a adaptação dessas tecnologias para ambientes tropicais e comunidades tradicionais permanecem restritas (Solvang et al., 2021; Stenius et al., 2022; Kang, Ong e Roël, 2022).

A produção em larga escala de macroalgas envolve desafios tecnológicos e institucionais, incluindo a necessidade de políticas públicas específicas, regulamentações ambientais claras e incentivos econômicos. Muitos países, incluindo o Brasil, ainda apresentam lacunas nos marcos regulatórios adaptados à maricultura de algas, o que limita a segurança jurídica de projetos comerciais e a atração de investimentos de longo prazo. A ausência de diretrizes ambientais voltadas à ocupação do espaço marinho, ao controle de espécies exóticas e ao monitoramento de impactos ecológicos contribui para incertezas sobre a sustentabilidade dessa atividade.

Embora promissor em termos teóricos emerge o debate ético e científico em torno do afundamento deliberado de biomassa algal como estratégia de sequestro de carbono. Esse método suscita questionamentos sobre sua eficácia real na mitigação climática, os possíveis efeitos adversos nos ecossistemas bentônicos profundos, e os riscos de transferência de impactos ambientais da superfície para o fundo oceânico. Ainda não há consenso quanto aos critérios que definem quando, onde e como o afundamento pode ser considerado ambientalmente seguro e socialmente aceitável. Nesse contexto, torna-se fundamental promover uma governança científica e participativa, baseada em evidências e alinhada aos princípios da precaução e da justiça ambiental.

6. Perspectivas futuras e caminhos de pesquisa

O cultivo de macroalgas *offshore* representa uma fronteira tecnológica na aquicultura moderna, com grande potencial para suprir demandas globais por alimentos, bioenergia, produtos farmacêuticos e soluções baseadas na natureza, como o sequestro de carbono. No entanto, operar em áreas oceânicas distantes da costa, como comentado anteriormente impõe desafios substanciais, exigindo o desenvolvimento de tecnologias emergentes capazes de resistir a ambientes altamente dinâmicos e, ao mesmo tempo, otimizar a produtividade e a sustentabilidade das operações.

Entre as inovações em destaque estão os sistemas de cultivo flutuante de grande escala, como os utilizados no projeto *Ocean Rainforest*, nas Ilhas Faroé e na costa da Califórnia, que empregam *longlines* ancorados e sensores para monitoramento de variáveis como temperatura, salinidade e nutrientes (Whiting et al., 2020). Esse sistema tem demonstrado viabilidade técnica e produtividade elevada mesmo em regiões com forte hidrodinâmica. Outro exemplo relevante é o *Seaweed Carrier*, desenvolvido no Japão, sendo uma plataforma flutuante móvel concebida para transportar e cultivar macroalgas em mar aberto, com o objetivo de otimizar o aproveitamento de áreas com maior disponibilidade natural de nutrientes, como zonas de ressurgência oceânica (Bar-Shai et al., 2021; Killer et al., 2023). A estrutura pode se deslocar passivamente com as correntes oceânicas ou ser rebocada até locais estratégicos, reduzindo a necessidade de suplementação artificial de nutrientes, um dos principais limitantes da produtividade em cultivos estacionários. A tecnologia

facilita o cultivo em regiões remotas e serve como modelo experimental para o aprofundamento controlado de biomassa algal, permitindo estudar o comportamento das macroalgas em diferentes profundidades e testar estratégias de sequestro de carbono. Sua mobilidade, combinada com monitoramento remoto e sensores ambientais embarcados, permite avaliar soluções adaptativas para os desafios do cultivo offshore em larga escala, especialmente em países com áreas costeiras limitadas ou alta densidade de uso do litoral.

O sucesso da expansão do cultivo *offshore* de macroalgas depende não apenas das inovações técnicas, mas também do desenvolvimento de modelos de governança colaborativos, nos quais a integração entre setor público, centros de pesquisa, empresas privadas e comunidades locais é essencial. As chamadas parcerias público-privadas (PPPs) têm se mostrado estratégicas para viabilizar projetos de maior escala, promovendo sinergias entre capacidade técnica, financiamento, inovação e regulação ambiental. A criação de ambientes de inovação multissetoriais tem acelerado a adoção de tecnologias emergentes, além de facilitar a formulação de marcos normativos adaptados à realidade da produção de algas; um exemplo notável é o consórcio europeu *EU4Algae*, uma iniciativa financiada pela União Europeia que reúne universidades, institutos técnicos, startups e órgãos reguladores (Fricke et al., 2024). O objetivo é promover a padronização de práticas de cultivo, a certificação de produtos de origem algal e a consolidação de uma cadeia produtiva europeia integrada, alinhada ao Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*) (Vindel, Trincado e Sánchez-Bayón, 2021; Boettcher, Geden e Schenuit, 2024). Essa plataforma também oferece suporte a empreendedores e governos interessados em implementar modelos sustentáveis de produção e uso de algas, fornecendo diretrizes para aspectos técnicos, regulatórios e mercadológicos.

Outro exemplo internacional é o *Seaweed Manifesto* (também conhecido como *Seaweed Revolution: A Manifesto for a Sustainable Future*), lançado por uma parceria de organizações — principalmente a Lloyd's Register Foundation em conjunto com a Sustainable Ocean Business Action Platform do UN Global Compact (que é um mecanismo de articulação/coordenação da ONU), que reúne organizações públicas e privadas com o objetivo de promover práticas sustentáveis no setor de macroalgas (Cai et al., 2021). O projeto estabelece diretrizes para a governança multilateral, incluindo a coordenação entre países produtores e consumidores, a definição de padrões de cultivo ambientalmente responsáveis e a integração de comunidades locais na cadeia produtiva. O manifesto propõe mecanismos de financiamento climático voltados à expansão sustentável da maricultura de macroalgas, incentivando investimentos em tecnologias de cultivo de baixo impacto, monitoramento ambiental e mitigação de emissões de gases de efeito estufa associadas à produção.

No Brasil, ainda que a produção de macroalgas em mar aberto esteja em estágio incipiente, iniciativas lideradas pela Embrapa, universidades federais costeiras e instituições estaduais têm buscado criar as condições iniciais para o avanço do setor. Projetos-piloto têm sido conduzidos em regiões como o litoral da Bahia e do Rio Grande do Norte, com foco na adaptação de técnicas de cultivo de espécies tropicais de interesse comercial, como *Kappaphycus alvarezii* e *Gracilaria spp.*. Essas ações envolvem parcerias com cooperativas de marisqueiras, empresas de biotecnologia marinha e órgãos ambientais, evidenciando a importância de envolver tanto o conhecimento técnico-científico quanto o saber tradicional na construção de soluções adaptadas ao contexto socioambiental brasileiro (Chiaromonte et al., 2019; Santos, 2023). Contudo, o país ainda carece de um arcabouço legal específico para o ordenamento espacial marinho, a concessão de áreas para cultivo *offshore* e a avaliação ambiental estratégica da atividade. Assim, o fortalecimento das PPPs deve ser acompanhado de políticas públicas estruturantes, capazes de garantir segurança jurídica, apoio técnico e mecanismos de incentivo à pesquisa aplicada, especialmente em regiões costeiras vulneráveis e de baixa infraestrutura.

Diante dos desafios ecológicos, logísticos e regulatórios comentados anteriormente e associados ao cultivo *offshore* de macroalgas, torna-se cada vez mais evidente a necessidade de adotar abordagens integradas que potencializem os benefícios ambientais dessa atividade. A aquicultura multitrófica integrada (IMTA) representa uma dessas abordagens promissoras, ao permitir o cultivo conjunto de organismos de diferentes níveis tróficos em um mesmo sistema produtivo (Zhu et al., 2025). Essa configuração promove a reciclagem

e o aproveitamento de resíduos orgânicos e inorgânicos, reduzindo a carga de nutrientes no ambiente e aumentando a eficiência ecológica do cultivo. A macroalga atua como um biofiltro natural, absorvendo nitrogênio e fósforo excedentes, o que pode ajudar a mitigar impactos como a eutrofização e a acidificação da água, contribuindo ainda para o sequestro de carbono e a melhoria da qualidade ambiental (Hossain, Senff e Glaser, 2022).

Exemplos de sucesso já são observados em países como o Canadá, onde o cultivo de *Saccharina latissima* é integrado com salmões e mexilhões na costa atlântica, demonstrando benefícios ecológicos e econômicos significativos (Lafeuille et al., 2023). Esse modelo também vem sendo testado em ambientes tropicais, como em projetos no sudeste asiático e no litoral brasileiro, em sistemas adaptados às características locais (Rombenso, Lisboa e Sampaio, 2014; Checa et al., 2024). Além de aumentar a produtividade e diversificar a renda de comunidades costeiras, a IMTA alinha-se aos princípios das soluções baseadas na natureza e da bioeconomia azul, promovendo resiliência climática, segurança alimentar e sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, fortalecer o investimento em pesquisa aplicada, capacitação técnica e regulamentação específica para sistemas integrados torna-se essencial para consolidar o cultivo de macroalgas como uma ferramenta estratégica de adaptação e mitigação frente às mudanças climáticas.

7. Conclusão

As macroalgas vêm ganhando destaque como aliadas potenciais em estratégias de mitigação climática e regeneração dos ambientes marinhos. Esta revisão crítica evidenciou que, além de sua capacidade de fixar carbono via fotossíntese e contribuir para seu transporte às camadas profundas do oceano, as macroalgas também atuam na melhoria da qualidade da água, no controle da acidificação local e na promoção da biodiversidade, especialmente quando manejadas em sistemas diversificados e ambientalmente sensíveis. No entanto, a expansão do cultivo em larga escala enfrenta limitações significativas, incluindo riscos ecológicos, barreiras tecnológicas para o cultivo *offshore*, e a ausência de regulamentação específica e políticas públicas estruturantes.

As possibilidades de integração do cultivo de macroalgas com outras estratégias, apontam caminhos promissores para o avanço de modelos produtivos sustentáveis e resilientes, com ganhos ambientais, econômicos e sociais. Tecnologias emergentes, parcerias público-privadas e mecanismos de financiamento verde serão cruciais para viabilizar esse avanço. Assim, o papel das macroalgas deve ser compreendido não como uma solução isolada, mas como parte de um conjunto de ações integradas dentro da economia azul, com potencial de contribuir de forma significativa para os objetivos globais de descarbonização, conservação marinha e desenvolvimento sustentável.

8. Referências

- Anderson, K., Buck, H. J., Fuhr, L., Geden, O., Peters, G. P., & Tamme, E. (2023). Controversies of carbon dioxide removal. **Nature Reviews Earth & Environment**, 4(12), 808–814.
- Araújo, P. G., Nassar, C. A. G., Barros-Barreto, M. B., Oliveira, M. C., & Plastino, E. M. (2020). Monitoring environmental risk of the exotic species *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta), after two decades of introduction in southeastern Brazil. **Botanica Marina**, 63(6), 551–558.
- Baghel, R. S., Reddy, C. R. K., Jha, B., & Singh, R. P. (2014). Growth, pigments, and biochemical composition of marine red alga *Gracilaria crassa*. **Journal of Applied Phycology**, 26, 2143–2150.

- Bak, U. G., Gregersen, Ó., & Infante, J. (2020). Technical challenges for offshore cultivation of kelp species: Lessons learned and future directions. **Botanica Marina**, 63(4), 341–353.
- Bannister, J., Sievers, M., Bush, F., & Bloecher, N. (2019). Biofouling in marine aquaculture: A review of recent research and developments. **Biofouling**, 35(6), 631–648.
- Bar-Shai, N., Levi, T., & Shpigel, M. (2021). Seaweed cellulose scaffolds derived from green macroalgae for tissue engineering. **Scientific Reports**, 11(1), 11843.
- Bertocci, I., Araújo, R., Oliveira, P., & Sousa-Pinto, I. (2015). Potential effects of kelp species on local fisheries. **Journal of Applied Ecology**, 52(5), 1216–1226.
- Boettcher, M., Geden, O., & Schenuit, F. (2023). Into the blue: The role of the ocean in climate policy. Europe needs to clarify the balance between protection and use. **SWP Comment**.
- Cai, J., Lovatelli, A., Stankus, A., & Zhou, X. (2021). Seaweed revolution: Where is the next milestone? **FAO Aquaculture Newsletter**, 63, 13–16.
- Camus, C., Infante, J., & Buschmann, A. H. (2019). Revisiting the economic profitability of giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Ochrophyta) cultivation in Chile. **Aquaculture**, 502, 80–86.
- Cao, J., Wang, J., Zhang, X., & Zhao, B. (2016). Porphyra species: A mini-review of its pharmacological and nutritional properties. **Journal of Medicinal Food**, 19(2), 111–119.
- Castelar, B., de Siqueira, M. F., Sánchez-Tapia, A., & Reis, R. P. (2015). Risk analysis using species distribution modeling to support public policies for the alien alga *Kappaphycus alvarezii* aquaculture in Brazil. **Aquaculture**, 446, 217–226.
- Chandrasekaran, S., Nagendran, N. A., Pandiaraja, D., Krishnankutty, N., & Kamalakannan, B. (2008). Bioinvasion of *Kappaphycus alvarezii* on corals in the Gulf of Mannar, India. **Current Science**, 94(9), 1167–1172.
- Checa, D., Pérez, A., Rodríguez, J., & Morales, E. (2024). Circularity assessment in aquaculture: The case of integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) systems. **Fishes**, 9(5), 165.
- Chiaramonte, A. R., Gurgel, C. F. D., Oliveira, M. C., & Plastino, E. M. (2019). *Gracilaria caudata* (Gracilariales, Rhodophyta) is reproductively compatible along the whole Brazilian coast. **Journal of Applied Phycology**, 31, 931–937.
- Dahai, H., Zhihong, Y., Lin, Q., Yuhong, L., Lei, T., Jiang, L., & Liandong, Z. (2024). The application of magical microalgae in carbon sequestration and emission reduction: Removal mechanisms and potential analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 197, 114417.
- De Freitas Nunes-Neto, N., Do Carmo, R. S., & El-Hani, C. N. (2009). Uma conexão entre algas e nuvens: Fundamentos teóricos da hipótese CLAW e suas implicações para as mudanças climáticas. **Oecologia Brasiliensis**, 13(4), 596–608.

- De Jesus, P. B., Machado, G. E. M., & De Azeredo Muniz, R. (2014). Macroalgas marinhas como indicadores de impactos ambientais em Itacoatiara, Niterói, RJ: Subsídios para futuros programas de monitoramento ambiental. **Caderno de Estudos Geoambientais (CADEGEO)**, 4(1).
- Duarte, C. M., Hendriks, I. E., Krause-Jensen, D., Marbà, N., & Agustí, S. (2025). Carbon burial in sediments below seaweed farms matches that of Blue Carbon habitats. **Nature Climate Change**, 1–8.
- Duarte, C. M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2017). Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? **Frontiers in Marine Science**, 4, 100.
- Duffy, J. E., Stachowicz, J. J., Reynolds, P. L., Carr, M. H., Losi, V., Loreau, M., ... & Duarte, C. M. (2019). Toward a coordinated global observing system for seagrasses and marine macroalgae. **Frontiers in Marine Science**, 6, 317.
- Epstein, G., & Smale, D. A. (2017). *Undaria pinnatifida*: A case study to highlight challenges in marine invasion ecology and management. **Ecology and Evolution**, 7(20), 8624–8642.
- Fabrizius, K. E., Crossman, K., Jonker, M., Mongin, M., & Thompson, A. (2023). Macroalgal cover on coral reefs: Spatial and environmental predictors, and decadal trends in the Great Barrier Reef. **PLoS ONE**, 18(1), e0279699.
- Farghali, M., Mohamed, I. M., Osman, A. I., & Rooney, D. W. (2023). Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: A review. **Environmental Chemistry Letters**, 21(1), 97–152.
- Fricke, A., Schupp, M. F., D'Angelo, S., Barbier, M., Christie, H., Peteiro, C., ... & Buck, B. H. (2024). Ecosystem services provided by seaweed cultivation: State of the art, knowledge gaps, constraints and future needs for achieving maximum potential in Europe. **Reviews in Fisheries Science & Aquaculture**, 33(2), 238–256.
- Fujita, R., Wignall, T., Karr, K., Battista, W., Shumway, S. E., & Costa-Pierce, B. A. (2023). Seaweed blue carbon: Ready? Or not? **Marine Policy**, 155, 105747.
- Green, B. N.; Johnson, C. D.; Adams, A. (2006). Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: secrets of the trade. **Journal of Chiropractic Medicine**, 5(3), 101–117.
- Hossain, A., Senff, P., & Glaser, M. (2022). Lessons for coastal applications of IMTA as a way towards sustainable development: A review. **Applied Sciences**, 12(23), 11920.
- Kang, D., Ong, P., & Roël, J. (2022). Building floating aquaculture farms with expanded polystyrene in Singapore. In **WCFS2020: Proceedings of the Second World Conference on Floating Solutions** (pp. 201–218). Springer Singapore.
- Killer, M., Müller, J., Li, Y., & Friebe, S. (2023). Maximizing seaweed growth on autonomous farms: A dynamic programming approach for underactuated systems navigating on uncertain ocean currents. **arXiv preprint arXiv:2307.01916**.

- Krause-Jensen, D., & Duarte, C. M. (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. **Nature Geoscience**, 9(10), 737–742.
- Krause-Jensen, D., Lavery, P., Serrano, O., Marbà, N., Masque, P., & Duarte, C. M. (2018). Sequestration of macroalgal carbon: The elephant in the Blue Carbon room. **Biology Letters**, 14(6), 20180236.
- Lafeuille, B., Fleurence, J., Morançais, M., Stiger-Pouvreau, V., & Turgeon, S. L. (2023). Variation of the nutritional composition and bioactive potential in edible macroalga *Saccharina latissima* cultivated from Atlantic Canada subjected to different growth and processing conditions. **Foods**, 12(8), 1736.
- Largo, D. B., Chung, I. K., Phang, S. M., Gerung, G. S., & Sondak, C. F. A. (2017). Impacts of climate change on *Eucheuma–Kappaphycus* farming. In **Tropical Seaweed Farming Trends, Problems and Opportunities: Focus on Kappaphycus and Eucheuma of Commerce** (pp. 121–129).
- Moisez, E., Spilmont, N., & Seuront, L. (2020). Microhabitat choice in intertidal gastropods is species-, temperature-, and habitat-specific. **Journal of Thermal Biology**, 94, 102785.
- Mora-Soto, A., Palacios, M., Macaya, E. C., Huovinen, P., & Gómez, I. (2020). A high-resolution global map of giant kelp (*Macrocystis pyrifera*) forests and intertidal green algae (*Ulvophyceae*) with Sentinel-2 imagery. **Remote Sensing**, 12(4), 694.
- Morro, B., Vercelloni, J., Holon, F., & Bacher, C. (2022). Offshore aquaculture of finfish: Big expectations at sea. **Reviews in Aquaculture**, 14(2), 791–815.
- Muniz, R. A., Oliveira, M. C., & Bastos, E. (2013). Algas marinhas do Monumento Natural das Ilhas Cagarras. In **História, Pesquisa e Biodiversidade do Monumento Natural das Ilhas Cagarras – Série Livros** (Vol. 48, pp. 49–61).
- Nauer, F., & Lopes Filho, E. A. P. (2017). Introdução às macroalgas marinhas. In **Botânica no Inverno 2017** (p. 15). Laboratório de Algas Marinhas.
- Nemet, G. F., Fuss, S., Canadell, J. G., Tavoni, M., Smith, P., Peters, G. P., ... & Minx, J. C. (2023). Near-term deployment of novel carbon removal to facilitate longer-term deployment. **Joule**, 7(12), 2653–2659.
- Nisa, A. C., Jatayu, D., & Alfiani, P. P. (2024). Growth performances and productivities of *Kappaphycus alvarezii* and *Eucheuma spinosum* cultivated with long-line method in PT. Sea Six Energy Indonesia. **Journal of Aquaculture & Fish Health**, 13(3).
- Olanrewaju, S. O., Magee, A., Kader, A. S. A., & Tee, K. F. (2017). Simulation of offshore aquaculture system for macroalgae (seaweed) oceanic farming. **Ships and Offshore Structures**, 12(4), 553–562.
- Park, J., Lee, S., Kim, H., & Han, T. (2024). Harnessing green tide *Ulva* biomass for carbon dioxide sequestration. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, 23(4), 1041–1061.
- Queirós, A. M., Stephens, N., Widdicombe, S., Tait, K., McCoy, S. J., Ingels, J., ... & Quevedo, M. (2019). Connected macroalgal–sediment systems: Blue carbon and food webs in the deep coastal ocean. **Ecological Monographs**, 89(3), e01366.

- Rombenso, A. N., Lisboa, V., & Sampaio, L. A. (2014). Mariculture in Rio de Janeiro, Brazil: An approach to IMTA. In **World Aquaculture Society Conference** (pp. 1–6). Adelaide, Australia: WAS.
- Santos, A. A. (2023). Produção da macroalga *Kappaphycus alvarezii* em Santa Catarina, safra 2022/2023. **Agropecuária Catarinense**, 36(2), 7–9.
- Schenuit, F., Geden, O., Boettcher, M., & Honegger, M. (2023). Secure robust carbon dioxide removal policy through credible certification. **Communications Earth & Environment**, 4(1), 349.
- Smale, D. A. (2020). Impacts of ocean warming on kelp forest ecosystems. **New Phytologist**, 225(4), 1447–1454.
- Solvang, T., Stene, A., & Broch, O. J. (2021). Automation concepts for industrial-scale production of seaweed. **Frontiers in Marine Science**, 8, 613093.
- South, P. M., Floerl, O., Forrest, B. M., & Thomsen, M. S. (2017). A review of three decades of research on the invasive kelp *Undaria pinnatifida* in Australasia: An assessment of its success, impacts and status as one of the world's worst invaders. **Marine Environmental Research**, 131, 243–257.
- Stenius, I., Westerlund, A., Ruohonen, K., & Salonen, K. (2022). A system for autonomous seaweed farm inspection with an underwater robot. **Sensors**, 22(13), 5064.
- Taboada, C., Millán, R., & Míguez, I. (2010). Composition, nutritional aspects and effect on serum parameters of marine algae *Ulva rigida*. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 90(3), 445–449.
- Thursby, G. B., & Steele, R. L. (2020). Sexual reproduction tests with marine seaweeds (macroalgae). In **Fundamentals of Aquatic Toxicology** (pp. 171–188). CRC Press.
- Valdespino, P. M., López, A. A., Martínez, E. M., & Sánchez, M. G. (2022). Micromundos biominerales en las algas rojas. **Revista Digital Universitaria**, 22(6).
- Vindel, J. M., Trincado, E., & Sánchez-Bayón, A. (2021). European Union Green Deal and the opportunity cost of wastewater treatment projects. **Energies**, 14(7), 1994.
- Whiting, J. M., Berry, H. D., Parker, M., & Coleman, M. A. (2020). Simulating the trajectory and biomass growth of free-floating macroalgal cultivation platforms along the US west coast. **Journal of Marine Science and Engineering**, 8(11), 938.
- Zhang, R., Zhang, X., Tang, Y., & Wang, W. (2020). Composition, isolation, purification and biological activities of *Sargassum fusiforme* polysaccharides: A review. **Carbohydrate Polymers**, 228, 115381.
- Zhu, Y., Li, X., Wu, H., & Wang, J. (2025). The role of seaweed cultivation in integrated multi-trophic aquaculture (IMTA): The current status and challenges. **Reviews in Aquaculture**, 17(3), e70042.