



**Aquacultura de algas marinhas em alto mar: Estudo
exploratório de plataformas multiusos em Portugal**

Mestrado em Economia Azul e Circular

Letícia Pereira da Cunha

Portugal, setembro de 2024



Aquacultura de algas marinhas em alto mar: Estudo exploratório de plataformas multiusos em Portugal

Mestrado em Economia Azul e Circular

Letícia Pereira da Cunha

Dissertação realizada sob a orientação da Professora Doutora Teresa Margarida Lopes da Silva Mouga e da Professora Doutora Maria Eduarda da Silva Teixeira Fernandes

Portugal, setembro de 2024

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a dissertação foi realizada, a saber, Curso de Mestrado em Economia Azul e Circular, no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão e da Escola Superior de Turismo e Tecnologia do Mar, do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Agradecimentos

Às minhas orientadoras, Professora Teresa e Professora Eduarda: obrigada pelo incentivo de cada reunião e pelo entusiasmo de cada avanço. Obrigada por me permitirem desenvolver o trabalho ao meu ritmo, por compreender as minhas dificuldades e por confiarem em mim e no meu trabalho!

Um agradecimento especial à Helena e à Raísa: sem o projeto *Luso Blue Wave*, o tema desta dissertação seria outro. Obrigada pelo início desta jornada! Um obrigada também a todos os colegas de Biologia e de Economia Azul e Circular, pelos significativos contributos para assemelhar este projeto tanto quanto possível com a realidade!

À minha família: obrigada pelo incentivo, por perceberem a ausência e os picos de ansiedade e pela proeza de me conseguirem aturar nos momentos mais complicados!

E Eduardo: obrigada pelas discussões do tema e, com isso, me permitires chegar a outras e melhores conclusões. Obrigada por estares comigo mesmo desde o início, por me incentivares e não me deixares desistir! Obrigada pelo apoio!

Resumo

As florestas marinhas desempenham um papel crucial na regulação climática, sendo responsáveis pela absorção de uma grande parte do carbono atmosférico. Além do seu papel na mitigação climática, estes ecossistemas marinhos fornecem outros serviços de ecossistemas, como habitat e suporte para a biodiversidade marinha. A conservação e o restauro destes ecossistemas são essenciais para manter o equilíbrio e o bom funcionamento, bem como para assegurar o sequestro de carbono. A combinação de aquacultura de algas com energias renováveis em plataformas multiuso representa uma solução inovadora para maximizar a utilização sustentável dos recursos oceânicos, embora exija uma avaliação cuidadosa dos impactos ambientais e sociais. Esta dissertação analisa o crescimento económico azul em Portugal, com um foco específico na aquacultura de algas laminárias em alto mar, adjacente a estações de exploração de energia eólica. O objetivo central do estudo é avaliar o valor associado à aquacultura dessas algas através da análise do seu potencial de crescimento de biomassa e de sequestro de carbono, assim como o seu valor comercial, seja como matéria-prima ou pela venda de créditos de carbono. A metodologia adotada resume-se na projeção de uma aquacultura, baseada em pressupostos climáticos, estruturais e biológicos, proporcionando uma avaliação abrangente dos fatores que influenciam a viabilidade e a eficácia desta abordagem. Os resultados indicam que esta solução é promissora para maximizar o uso sustentável das áreas marinhas em Portugal, destacando-se pela produção significativa de biomassa e pelo seu potencial de sequestro de carbono. Os resultados obtidos neste estudo apontam para uma produção de 585 toneladas de biomassa fresca e num sequestro de cerca de 60 toneladas de dióxido de carbono equivalente, por ano. O valor económico da biomassa produzida pode tomar diferentes vias, como venda da biomassa ou venda de créditos de carbono, entre outras. Os preços médios registados por transação de produto indicam que a viabilidade económica depende da otimização dos processos e de um planeamento estratégico. Ambientalmente, a aquacultura de macroalgas proporciona vários serviços de ecossistemas, mas são necessários mais estudos para avaliar os impactos e benefícios, especialmente em escala comercial.

Palavras-chave: aquacultura, laminárias, carbono, economia azul

Abstract

Kelp forests play a crucial role in climate regulation, accounting for the uptake of a large part of atmospheric carbon. In addition to their role in climate mitigation, these marine ecosystems provide other ecosystem services such as habitat and support for marine biodiversity. Conservation and restoration of these ecosystems are essential to maintaining balance and smooth functioning as well as to ensure carbon sequestration. The combination of algae aquaculture with renewable energy on multi-purpose platforms represents an innovative solution to maximize sustainable use of ocean resources, although it requires careful assessment of environmental and social impacts. This dissertation analyses blue economic growth in Portugal, with a specific focus on deep-sea aquaculture of laminaria algae, adjacent to wind energy exploration stations. The central objective of the study is to evaluate the value associated with the aquaculture of these algae through the analysis of their potential for biomass growth and carbon sequestration, as well as their commercial value, whether as raw material or through the sale of carbon credits. The methodology adopted is summarized in the projection of an aquaculture, based on climatic, structural and biological assumptions, providing a comprehensive assessment of the factors that influence the feasibility and effectiveness of this approach. The results indicate that this solution is promising for maximizing the sustainable use of marine areas in Portugal, highlighted by the significant production of biomass and its carbon sequestration potential. The results obtained in this study point to a production of 585 tons of fresh biomass and a sequestration of around 60 tons of carbon dioxide equivalent, per year. The economic value of the biomass produced can take different paths, such as selling the biomass or selling carbon credits, among others. The average prices recorded per product transaction indicate that economic viability depends on process optimization and strategic planning. Environmentally, macroalgal aquaculture provides several ecosystem services, but more studies are needed to evaluate the impacts and benefits, especially on a commercial scale.

Keywords: aquaculture, kelp, carbon, blue economy

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	ix
Lista de siglas e acrónimos.....	x
1. Introdução	1
2. Enquadramento teórico	5
2.1. O oceano e as alterações climáticas.....	5
2.2. Papel do carbono nas alterações climáticas	6
2.3. Políticas de mitigação às alterações climáticas	7
2.4. O carbono azul e os serviços de ecossistemas marinhos	9
2.5. Florestas de algas marinhas.....	12
2.6. A aquacultura de algas marinhas e a economia azul	14
3. Metodologia.....	18
3.1. Caso de estudo - ZLT de Viana do Castelo	19
3.1.1. Caracterização climática.....	19
3.1.2. Caracterização geográfico-estrutural.....	21
3.1.3. Caracterização biológica.....	22
3.2. Estimativas de valores de carbono	24
4. Resultados	26
5. Discussão	35
5.1. Perspetiva da biomassa e carbono	35
5.2. Perspetiva económico-financeira.....	36
5.3. Perspetiva ambiental	38
6. Conclusões	40
Referências Bibliográficas	42

Lista de figuras

Figura 1 - Representação esquemática simplificada do ciclo do carbono do oceano.	5
Figura 2 - Mecanismos para potenciar o sequestro de carbono pelos ecossistemas marinhos.	10
Figura 3 - Distribuição geográfica das florestas de kelps.	13
Figura 4 - Intervalo de preços por tipo de créditos de carbono.	17
Figura 5 - Distribuição geográfica dos ecossistemas mediterrânicos.	19
Figura 6 - Regiões biogeográficas e marinhas na União Europeia.	20
Figura 7 - Fotografia do parque eólico <i>WindFloat Atlantic</i>	21
Figura 8 - <i>Saccharina latissima</i> em corda de crescimento de aquacultura.	23
Figura 9 - Representação esquemática de um conjunto de 5 cordas de crescimento da aquacultura. ..	27
Figura 10 - Representação esquemática de uma área do sistema de aquacultura.	28

Lista de tabelas

Tabela 1 - Características morfológicas e de crescimento de <i>Saccharina latissima</i>	23
Tabela 2 - Condições climáticas registadas nos locais de comparação e em Viana do Castelo.	26
Tabela 3 - Rendimento da aquacultura de <i>Saccharina latissima</i> na ZLT de Viana do Castelo.	29
Tabela 4 - Estimativas de sequestro de carbono da aquacultura a 4 anos, com 2 ciclos produtivos/ano.	30
Tabela 5 - Custos previstos para a instalação de 3 áreas de aquacultura em alto mar, de 10 conjuntos de 5 linhas de crescimento de laminárias.	33
Tabela 6 - Custos de produção de biomassa fresca e seca e CO ₂ eq absorvido da aquacultura, a 4 anos.	34

Lista de siglas e acrónimos

CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq	Dióxido de Carbono Equivalente
DOC	Carbono Orgânico Dissolvido
GEE	Gases com Efeito de Estufa
POC	Carbono Orgânico Particulado
RDOC	Carbono Orgânico Dissolvido Recalcitrante
ZLT	Zona Livre Tecnológica

1. Introdução

Num mundo cada vez mais consciente dos impactos das alterações climáticas, a necessidade de abordagens inovadoras e sustentáveis torna-se cada vez mais relevante. A Economia Azul traz consigo inovação, contribuindo com propostas sustentáveis para os desafios ambientais e económicos que a sociedade enfrenta. No presente, onde a sustentabilidade se torna indispensável, a Economia Azul destaca-se com um paradigma transformador, redefinindo a relação entre as atividades humanas e os recursos marinhos. Esta abordagem promove a utilização sustentável e responsável dos oceanos, estimulando o desenvolvimento de setores como aquacultura, energias renováveis, biotecnologia marinha, entre outros.

A crescente procura por recursos naturais e o aumento da pressão sobre os ecossistemas terrestres tornam a Economia Azul ainda mais importante, oferecendo um diverso leque de oportunidades para impulsionar o crescimento económico sustentável. Além disso, a Economia Azul não se limita apenas a uma abordagem exploratória, também tem em conta a preservação e restauração dos ambientes marinhos, reconhecendo a ligação entre a saúde dos oceanos e a prosperidade humana. Ao conciliar práticas sustentáveis, inovação tecnológica e gestão responsável dos recursos marinhos, a Economia Azul destaca-se como um estímulo essencial para a construção de um futuro equilibrado e resiliente, que alia a prosperidade económica com a conservação da vida como a conhecemos.

As atividades humanas, desde a agricultura ou o pastoreio, provocam pressões no meio ambiente, libertando gases com efeito de estufa (Jia et al., 2022). O aumento das emissões e da concentração destes gases na atmosfera verificou-se com o crescimento da industrialização, da urbanização e dos transportes (Benton, 1970), com o aumento da qualidade e da esperança média de vida, e, por consequência, o aumento da população mundial e a maior procura por alimentos, combustíveis e outros recursos. Diversos estudos relacionam a concentração destes gases, como o dióxido de carbono e o metano, com as alterações climáticas (Bindoff et al., 2022; Jia et al., 2022).

As alterações climáticas, em terra, aumentam as temperaturas médias registadas e a probabilidade de fenómenos extremos de precipitação e de seca, que, por sua vez, causam pressões fisiológicas e hidrológicas nos ecossistemas (Jia et al., 2022; Malhi et al., 2020).

Estas alterações, no oceano, provocam o aumento de ondas de calor e amplificam as tendências de acidificação, potenciando também pressões fisiológicas nos seres vivos (Bindoff et al., 2022; Jia et al., 2022; Malhi et al., 2020). A existência destes fenómenos climáticos extremos acarreta ainda consequências em atividades económicas como a agricultura e a silvicultura, na qualidade e no abastecimento de água, no risco acrescido de incêndios florestais e na produção de energia (Cardoso et al., 2019; Soares et al., 2015).

Portugal é um país maioritariamente sob influência do clima mediterrânico, que consiste em Invernos amenos e húmidos e Verões secos e quentes (Cardoso et al., 2019). Portugal é um país altamente vulnerável a eventos climáticos extremos de precipitação, prevendo-se uma diminuição da precipitação total e um aumento na frequência de ondas de calor, com temperaturas extremas (Cardoso et al., 2019; Soares et al., 2015, 2017). Assim, ajustar a resposta aos efeitos esperados, moderando os danos e explorando oportunidades benéficas e reduzir as fontes ou potenciar os sequestradores dos gases com efeito de estufa, isto é adotar estratégias de adaptação e de mitigação, respetivamente (IPCC, 2001), são ações cada vez mais urgentes para fazer face aos impactos das alterações climáticas em Portugal. Estas tendências podem ter impactos significativos em setores importantes na economia portuguesa, como na agricultura, nas florestas e na água (Cardoso et al., 2019; Soares et al., 2015), nomeadamente na disponibilidade de alimentos, nos incêndios florestais e no abastecimento e na qualidade da água, bem como, em última análise, no turismo.

As consequências das alterações climáticas, como as temperaturas médias mais altas, o aumento do nível do mar, as tempestades, a cada vez maior concentração de dióxido de carbono e os fenómenos de precipitação desregulados, interferem com a capacidade dos oceanos e seus ecossistemas marinhos efetuarem o sequestro de carbono azul (Macreadie et al., 2019), termo sugerido por Nellemann et al. (2009), lembrando o “carbono verde” sequestrado pelas florestas em ecossistemas terrestres. A elevada capacidade de fixação de carbono confere aos oceanos um papel de extrema importância na regulação do clima. Contudo, variados e complexos processos físicos, geoquímicos e biológicos podem ter influência nas trocas gasosas de dióxido de carbono entre o ar e a água (Bindoff et al., 2022; National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2022).

Dada a sua localização geográfica, Portugal encontra-se numa posição particularmente interessante para a exploração de fontes de energia renováveis marinhas. De acordo com o relatório do Grupo de Trabalho para o planeamento e operacionalização de centros eletroprodutores baseados em fontes de energias renováveis de origem ou localização

oceânica (Despacho n.o 11404/2022, de 23 de Setembro) (2023), as zonas propostas para implementação de eólicas em alto mar totalizam cerca de 3.400 km² do espaço marítimo nacional, com áreas distribuídas ao longo de toda a extensão da costa continental, nomeadamente perto de Viana do Castelo, Leixões, Matosinhos, Figueira da Foz, Ericeira, Sintra/Cascais e Sines com uma capacidade de instalação de, aproximadamente, 10 GW. A implementação destas estruturas em alto mar, dependendo da biogeografia da área de implementação e do seu estado de vulnerabilidade ou resiliência, pode acarretar impactos a nível ecológico, entre os quais: na estrutura, funções e processos dos ecossistemas, alterações nas características físicas, hidrológicas e químicas e na composição e abundância de espécies. Esta implementação pode interferir nos processos migratórios de mamíferos e aves e causar acidentes ou a mortalidade de aves, se as eólicas forem implementadas sobre as suas rotas migratórias (Galparsoro et al., 2022).

Numa perspetiva de mitigação destes impactos e de crescimento económico sustentável no setor marítimo, ou crescimento azul, surgem as plataformas multiuso em alto mar, para fins de energia e aquacultura. As plataformas multiuso em alto mar permitem aliar a exploração de energia eólica à aquacultura (Abhinav et al., 2020). Este tipo de estruturas potenciam a economia do mar, contribuindo para a exploração de energias renováveis e o sequestro de carbono, através da aquacultura, objetivos principais do PNEC. As plataformas multiuso consistem, assim, em sistemas mais sustentáveis, que valorizam os serviços dos ecossistemas e que podem contribuir para o restauro de ecossistemas marinhos e para a sustentabilidade dos oceanos, alinhando-se com os objetivos da Economia Azul e Circular, a nível nacional e europeu.

Atividades como a aquacultura de macroalgas em plataformas multiuso podem favorecer a reflorestação e restauro de ecossistemas marinhos, sendo ainda possível otimizar e diversificar a atividade económica imitando ambientes naturais, com sistemas de aquacultura multitrófica. A produção de macroalgas é sustentável e favorece o sequestro de dióxido de carbono através da atividade metabólica dos organismos aí presentes (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2022). Além disso, as macroalgas podem ser utilizadas para diversos fins, desde a alimentação humana ou animal, como fertilizante de agricultura, para biocarvão ou bioplásticos, incorporação de extratos em produtos farmacêuticos e cosméticos (Farghali et al., 2022). Desta forma, a aquacultura de macroalgas marinhas apresenta-se com inúmeras vantagens e oportunidades sustentáveis e economicamente viáveis.

Com esta dissertação pretende-se, assim, estudar o valor da aquacultura de macroalgas marinhas associadas a estações de exploração de energia eólica em alto mar em Portugal, atentando ao seu potencial de crescimento e respetivo sequestro de carbono, tendo em conta os custos associados à aquacultura, bem como o rendimento económico potencial dessa mesma atividade. Para isso, o caso de estudo baseia-se num sistema de aquacultura de laminárias, em alto mar, localizado na Zona Livre Tecnológica (ZLT) de Viana do Castelo, adjacente ao parque eólico *Windfloat Atlantic*, procurando uma solução de uso sustentável do meio marinho. A interligação dos domínios da produção de energia renovável, da captura de carbono e da aquacultura de algas potencia a economia azul proporcionada por meio destas plataformas multiuso. O estabelecimento de soluções ambientalmente mais sustentáveis e que permitem a valorização dos serviços dos ecossistemas e do capital natural permite desenvolver modelos de negócio que contribuem para o crescimento económico sustentável.

Ao explorar possibilidades económicas e ecológicas, com a promoção de medidas para o combate às alterações climáticas e aos seus impactos (ODS 13) e recorrendo à conservação e utilização sustentável dos oceanos e seus recursos marinhos (ODS 14), esta dissertação contribui, ainda, para a exploração de novas formas de crescimento da Economia Azul e Circular em Portugal, em direção a um futuro mais resiliente e sustentável.

Para atingir os objetivos propostos, depois da presente introdução, no capítulo do enquadramento teórico, abordam-se temas como “O oceano e as alterações climáticas”, o “Papel do carbono nas alterações climáticas” e “Políticas de contenção às alterações climáticas”, “O carbono azul e os serviços de ecossistemas marinhos”, avançando depois para as “Florestas de algas marinhas” e “A aquacultura de algas marinhas e a economia azul”. De seguida, no capítulo da metodologia, descrevem-se os pressupostos do trabalho realizado na presente dissertação, baseados na literatura, e efetua-se uma análise aos custos de produção, ao crescimento e ao potencial de sequestro de carbono das macroalgas marinhas produzidas em aquacultura, associadas a estações de energia renovável, em Portugal, na área de estudo identificada. Por fim, discutem-se os resultados e apresentam-se as conclusões desta dissertação acerca dos valores associados à aquacultura de macroalgas marinhas, e seu potencial no âmbito da Economia Azul e do desenvolvimento sustentável.

2. Enquadramento teórico

2.1. O oceano e as alterações climáticas

Com uma forte influência no clima, o oceano é essencial para todos os aspetos do bem-estar e da subsistência humana e fornece serviços de ecossistemas essenciais, como o ciclo do carbono e o ciclo dos nutrientes, sendo ainda o habitat de numerosos organismos vivos, que, em conjunto, formam uma grande variedade de ecossistemas (Bindoff et al., 2022).

O ciclo do carbono do oceano (Figura 1) desempenha um papel significativo na regulação de calor no planeta e funciona como sumidouro para o dióxido de carbono de origem antropogénica (Dittmar & Stubbins, 2014; Heinze, 2014), absorvendo entre 20 e 35% das emissões de dióxido de carbono emitido por fontes antropogénicas (Khaliwala et al., 2009). As interações ecológicas e os serviços de ecossistemas que ocorrem nos oceanos, além dos processos físico-químicos oceânicos, são de extrema importância, pelo que se torna crucial adotar medidas que permitam manter estas interações, serviços e processos oceânicos, reduzindo assim o aquecimento geral e os níveis de acidificação dos oceanos, de forma a ser possível minimizar os impactos a nível global (Gattuso et al., 2015).

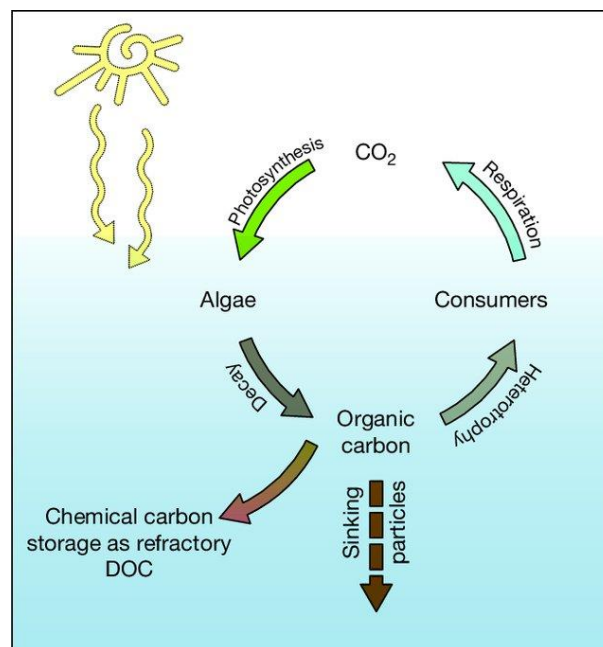


Figura 1 - Representação esquemática simplificada do ciclo do carbono do oceano.
 Fonte: Dittmar & Stubbins (2014, p. 128)

As alterações climáticas e as pressões antropogénicas estão a alterar os oceanos. Tanto à superfície como em profundidade, a química, a temperatura, a circulação e as correntes dos oceanos, o nível da água e a distribuição do gelo, estão, em conjunto, a causar fortes impactos nos habitats, na distribuição dos organismos, na produção primária e, de um modo geral, em toda a cadeia de biodiversidade (Bindoff et al., 2022; Lubchenco & Haugan, 2023). As alterações na atmosfera têm também efeitos prejudiciais, contribuindo para a acidificação das águas e a degradação de fauna e flora (Malhi et al., 2020; Walther et al., 2002).

Também o aumento das concentrações de dióxido de carbono na atmosfera tem vindo a enfraquecer, desde meados do século passado, a circulação meridional do Atlântico, ou AMOC. Esta sigla em inglês significa *Atlantic Meridional Overturning Circulation* e consiste num sistema de correntes oceânicas, em latitude e profundidade, que permite a distribuição de calor, água doce, carbono e nutrientes ao longo da extensão do oceano Atlântico (Caesar et al., 2018; McCarthy et al., 2020). A AMOC possibilita, por um lado, o transporte de dióxido de carbono e o arrefecimento das regiões subpolares atlânticas, e, por outro, o transporte de nutrientes e o aquecimento da Corrente do Golfo (Caesar et al., 2018). Estes ecossistemas estão vulneráveis a estas alterações, que, em conjunto com as pressões humanas e com a rapidez das mudanças verificadas, influenciam rapidamente os reservatórios de carbono azul (Lovelock & Reef, 2020; Malhi et al., 2020). Por outro lado, existem oportunidades promissoras, com potencial para a expansão das zonas húmidas costeiras e ganhos para o carbono azul em algumas regiões (Lovelock & Reef, 2020).

2.2. Papel do carbono nas alterações climáticas

A importância do dióxido de carbono para a vida é inegável. Alguns estudos realçam a sua importância para a vida, salientando o processo de fotossíntese que permite o crescimento dos organismos vegetais e a transformação de dióxido de carbono em matéria orgânica e negam o seu papel nas alterações climáticas, associando-as, no entanto, apenas às forças do campo magnético solar às alterações climáticas (Fleming, 2018). No passado, as alterações do clima foram, maioritariamente, devidas a causas naturais (Benton, 1970), contudo, as evidências científicas mostram que, conforme sugerido por Benton, atualmente, a atividade humana é a principal causa do atual aquecimento global, com o aumento das concentrações de dióxido de carbono e outros gases com efeito de estufa a provocar efeitos profundos no clima (Bindoff et al., 2022; Jia et al., 2022; McCarthy et al., 2020).

O aumento das emissões antropogénicas de gases como o dióxido de carbono, o metano, o óxido nitroso ou os gases halocarbonados, através dos setores da energia, da indústria, da construção, dos transportes, da agricultura, da silvicultura e de outros usos do solo, têm um efeito de aquecimento na atmosfera, pelo que são considerados gases com efeito de estufa (GEE) (Bruhwiler et al., 2021; Lamb et al., 2021). As perturbações verificadas no ciclo do carbono parecem ter uma influência extremamente significativa nas alterações climáticas e na concentração atmosférica de CO₂, através de mecanismos de *feedback* da concentração de carbono, resultante da absorção de carbono pela terra e pelos oceanos, como uma resposta biogeoquímica à concentração de CO₂, bem como na influência no clima, resultante do efeito das alterações climáticas nos fluxos de carbono (Gregory et al., 2009).

As emissões dos GEE são passíveis de ser medidas comparadas numa unidade denominada de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), cujo valor de referência é baseado no Potencial de Aquecimento Global com um horizonte temporal de 100 anos, ou GWP100, cuja sigla em inglês significa *Global Warming Potential* (IPCC, 2023). O gás de referência é o dióxido de carbono com um potencial de aquecimento global de 100 anos estimado em 1¹ (European Environment Agency, 2023). A preocupação mundial com as emissões destes gases tem levado à procura de mecanismos e soluções que permitam mitigar o aquecimento global e potenciar o desenvolvimento sustentável, sendo que a janela de oportunidade é cada vez mais pequena para garantir um planeta com condições habitáveis e sustentável para todos (IPCC, 2023).

2.3. Políticas de mitigação às alterações climáticas

O primeiro tratado jurídico internacional com o objetivo de limitar as emissões de GEE foi o Protocolo de Quioto, elaborado em 1997, na 3^a Conferência das Partes na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas², ou COP, cuja sigla em inglês significa *Conference of the Parties* (Agência Portuguesa do Ambiente, sem data). O Protocolo de Quioto estabeleceu metas diferenciadas para diferentes países, convertidas em direitos de emissão de toneladas de CO₂eq. Mesmo com a introdução do comércio de emissões, a não-ratificação pelos grandes emissores e a complexidade dos mecanismos de implementação limitaram a eficácia destas (Agência Portuguesa do Ambiente, sem data).

¹ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Global-warming_potential

² <https://apambiente.pt/clima/protocolo-de-quioto>

Na nova tentativa de limitar os efeitos das alterações climáticas, foram adotadas várias outras medidas ao longo dos últimos anos, nomeadamente na 21^a COP, em Paris, em 2015. O Acordo de Paris pretende atingir a neutralidade carbónica até 2050, através de medidas para “manter o aumento da temperatura média mundial bem abaixo dos 2 °C em relação aos níveis pré-industriais e prosseguir os esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que tal reduziria significativamente os riscos e o impacto das alterações climáticas”, “aumentar a capacidade de adaptação aos efeitos adversos das alterações climáticas, promover a resiliência a essas alterações e um desenvolvimento com baixas emissões de gases com efeito de estufa, de forma a não pôr em risco a produção alimentar” e “tornar os fluxos financeiros coerentes com um percurso conducente a um desenvolvimento com baixas emissões de gases com efeito de estufa e resiliente às alterações climáticas” (Acordo de Paris, 2015, p. 282/5).

Os objetivos ambientais da União Europeia (UE) estão em concordância com o Acordo de Paris relativamente à preservação, proteção e melhoria da qualidade do ambiente, à proteção da saúde das pessoas, à promoção de medidas para enfrentar os problemas do ambiente, e, especificamente, a combater as alterações climáticas. Os países da UE comprometeram-se “com o objetivo de manter o aumento da temperatura mundial bem abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais e de prosseguir os esforços para limitar a o aumento da temperatura mundial a 1,5 °C acima desses níveis”, a “um balanço global de cinco em cinco anos, com base nos dados científicos mais recentes e no grau da sua aplicação, que dará conta dos progressos alcançados e analisará a redução das emissões, a adaptação e o apoio prestado“, com a “a meta vinculativa de, pelo menos, 40 % de redução interna das emissões de gases com efeito de estufa até 2030 em relação aos níveis registados em 1990”, enfatizando “que o processo de transição global para uma energia limpa exige alterações do comportamento a nível dos investimentos e incentivos em todo o espectro da ação política” (Decisão (UE) 2016/1841, do Conselho, de 5 de outubro, 2016, pp. 282/1 e 282/2).

Atualmente, em Portugal, o Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030), aprovado pela Resolução Do Conselho de Ministros n. ° 53/2020, de 10 de julho, 2020, é o instrumento de política energética e climática. Os objetivos deste plano consistem em: “i) descarbonizar a economia nacional; ii) dar prioridade à eficiência energética; iii) reforçar a aposta nas energias renováveis e reduzir a dependência energética do País; iv) garantir a segurança de abastecimento; v) promover a mobilidade sustentável; vi) promover uma agricultura e floresta sustentáveis e potenciar o sequestro de carbono; vii) desenvolver uma

indústria inovadora e competitiva; e viii) garantir uma transição justa, democrática e coesa” (Resolução Do Conselho de Ministros n.º 53/2020, de 10 de Julho, 2020, p. 3).

De forma a combater a emergência climática, Portugal desenvolveu legislação específica, tais como a Lei de Bases do Clima (Lei n.º 98/2021, de 31 de Dezembro, 2021), que dita os princípios para o equilíbrio climático e, dada a necessidade de uma sociedade neutra em carbono, e o Decreto-Lei n.º 4/2024, de 5 de janeiro (2024), que estabelece o mercado voluntário do carbono e respetivas regras de funcionamento, promovendo iniciativas com base natural para o sequestro de carbono.

Atualmente, o mercado de carbono é uma das ferramentas existentes para compensar emissões, no qual as emissões de carbono, ou CO₂eq, são mercadorias, que podem ser compradas ou vendidas como créditos de carbono, mediante transações financeiras, equivalendo cada crédito de carbono a uma tonelada de carbono emitido³ (Carbon Credits, 2024). Neste mercado, que tem vindo a crescer ao longo dos anos, os créditos referem-se a um sequestro duradouro de carbono, isto é, ao armazenamento de CO₂, de forma estável e segura, por pelo menos 100 anos (Lian et al., 2023). Os créditos apenas estão aptos a ser transacionados no mercado regulado ou no mercado voluntário depois de sujeitos a uma avaliação de elegibilidade, contabilização, monitorização e verificação por entidades independentes devidamente qualificadas⁴ (Verra, 2022).

2.4. O carbono azul e os serviços de ecossistemas marinhos

Cerca de 70% do planeta é coberto por oceanos, cujos ecossistemas desempenham um papel vital na manutenção do ciclo do carbono e fornecem outros serviços de ecossistemas (Howard et al., 2017). O termo carbono azul é referente ao carbono fixado pelos ecossistemas oceânicos, tendo sido sugerido para salientar a elevada representatividade dos ecossistemas oceânicos em reter carbono (Nellemann et al., 2009). Os serviços de ecossistemas são críticos para a vida na Terra, contribuindo para o bem-estar humano, e representam parte do valor económico total do planeta (Costanza et al., 1997). Por outras palavras, os serviços de ecossistemas relacionam-se com a interdependência entre as pessoas e a natureza, sua gestão e respetiva valorização (Bouwma et al., 2018). O sequestro de carbono azul pelos ecossistemas marinhos pode ser potenciado através de diversos mecanismos naturais ou artificiais (Figura 2), tais como fertilização por nutrientes, *upwelling*

³ <https://carboncredits.com/the-ultimate-guide-to-understanding-carbon-credits/>

⁴ <https://verra.org/programs/verified-carbon-standard/>

e *downwelling* artificial, aquacultura de algas, recuperação de ecossistemas marinhos, potencialização da alcalinidade do oceano ou abordagens eletroquímicas para armazenamento (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2022).

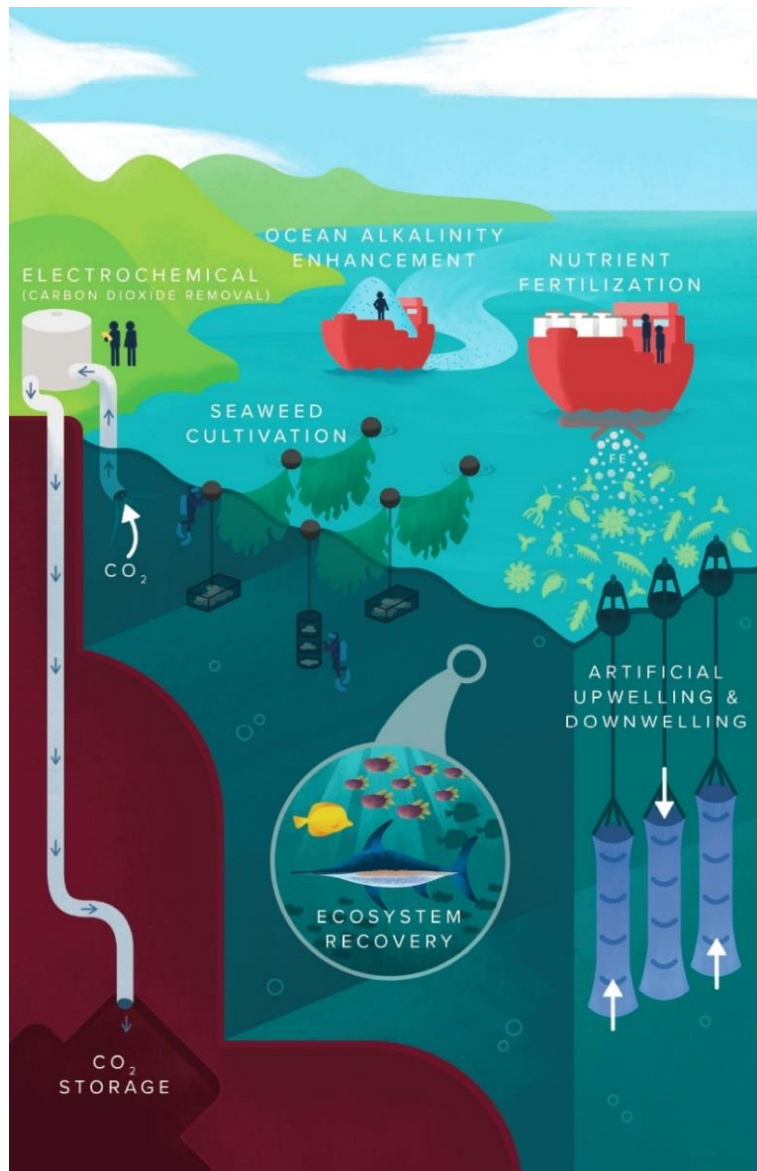


Figura 2 - Mecanismos para potencializar o sequestro de carbono pelos ecossistemas marinhos.
Fonte: National Academies of Sciences Engineering and Medicine (2022, p. 4)

Esta capacidade de sequestro de carbono assume um papel de extrema relevância no combate às alterações climáticas, uma vez que os ecossistemas marinhos têm capacidade de fixar mais carbono a longo prazo, por unidade de área, quando comparado com os ecossistemas terrestres (McLeod et al., 2011; National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2022). Por ano, globalmente, a proteção destes ecossistemas pode evitar emissões de mais

de 304 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente e um sequestro de mais de 840 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Macreadie et al., 2021), que, em conjunto, podem representar um sequestro de 407-5410 milhões de toneladas de carbono (Duarte, 2017).

Entre os ecossistemas costeiros de carbono azul, os mangais e os sapais são os que apresentam as mais elevadas taxas de sequestro de carbono, graças à capacidade de capturar matéria orgânica nas zonas entre marés (McLeod et al., 2011). Estes ecossistemas, além de fornecerem outros serviços, funcionam como sumidouros de carbono a longo prazo, sequestrando o carbono durante a fotossíntese e armazenando-o na biomassa e no solo. Desta forma, os ecossistemas marinhos assumem-se como importantes elementos para a mitigação climática, pelo que a sua conservação, restauro e uso sustentável é necessária para manter os seus benefícios (Howard et al., 2017; IPCC, 2014). Noutros ecossistemas marinhos, como os corais e florestas marinhas, a contabilização de sequestro de carbono é um pouco mais complexa e as estratégias para a sua gestão ainda estão em desenvolvimento (Howard et al., 2017; Hurd et al., 2022; Ross et al., 2022).

De acordo com a Classificação Comum Internacional dos Serviços de Ecossistemas, ou CICES, cuja sigla em inglês significa *Common International Classification of Ecosystem Services*, há vários tipos de serviços de ecossistemas: os de provisão de necessidades materiais e energéticas, os de regulação e manutenção do meio ambiente para os humanos, e os culturais, relacionados com as características não materiais dos ecossistemas que afetam os estados físicos e mentais das pessoas e os de suporte e habitat necessários para sustentar todos os outros serviços (Haines-Young & Potschin-Young, 2018). Os ecossistemas marinhos proporcionam serviços dos diversos tipos, além das suas próprias funções, entre as quais: a fotossíntese, produzindo oxigénio e biomassa, a manutenção do ciclo dos nutrientes, mantendo as funções dos ecossistemas, e a formação de habitat, potenciando a conservação da biodiversidade (Cotas et al., 2023; Ferreira et al., 2021).

Entre os serviços providenciados por ecossistemas marinhos podem ser destacados: nos serviços de provisão, a produção de alimento e de compostos bioativos; nos serviços de regulação e manutenção, a regulação climática, a biorremediação e a proteção costeira; e, nos culturais, a criação de empregos, a recreação e os rendimentos turísticos (Ferreira et al., 2021; Howard et al., 2017). Um estudo sobre o impacto do cultivo de macroalgas nos serviços de ecossistemas relata, ainda, impactos positivos à escala regional

ou global e alguns impactos negativos à escala local, sugerindo minimizar esses impactos, priorizando medidas que potenciem o desenvolvimento local, como, por exemplo, a criação de empregos (Hasselström et al., 2018).

2.5. Florestas de algas marinhas

As florestas de algas marinhas consistem em ecossistemas marinhos ricos, com um papel fundamental nas cadeias alimentares e nos ecossistemas marinhos, fornecendo alimento e abrigo para outras espécies (Howard et al., 2017; Smale et al., 2013). As macroalgas marinhas apresentam um crescimento rápido a nível global e algumas podem ser encontradas desde regiões próximas a climas temperados a regiões polares, flutuantes ou fixas a substratos rochosos (Howard et al., 2017; Ross et al., 2023). Diversos fatores abióticos podem interferir com o crescimento das macroalgas marinhas (Kerrison et al., 2015; Lubsch & Lansbergen, 2020), conforme exemplifica de seguida. A luminosidade afeta diretamente a taxa de fotossíntese e as algas estão adaptadas a baixas radiações, sendo que radiação em excesso pode ter um efeito negativo no crescimento dos organismos. A elevada concentração de CO₂ dissolvido na água pode potenciar o crescimento das algas. A temperatura da água tem uma grande influência nas reações químicas, que são controladas por enzimas sensíveis a temperaturas muito elevadas. Também concentrações de salinidade elevadas colocam em causa a atividade fotossintética das algas. A quantidade de nutrientes disponíveis na água pode, finalmente, afetar a biossíntese.

Durante o ciclo de vida, as algas, através da fotossíntese, são capazes de fixar carbono nos seus tecidos, mas, como resultado da ação das ondas, da decomposição ou de outros fatores, uma pequena quantidade pode vir a ser libertada como pequenos detritos, que podem acabar por sofrer sedimentação (Duarte, 2017; Lian et al., 2023; Paine et al., 2021). Estes detritos podem ser transportados para ecossistemas próximos na forma de carbono orgânico dissolvido (DOC) ou na forma de carbono orgânico particulado (POC), que se transforma em carbono orgânico dissolvido recalcitrante (RDOC) (Lian et al., 2023; Paine et al., 2021). Estas florestas marinhas são formadas sobretudo por algas castanhas, laminárias ou *kelps*, da família laminariaceae, que são importantes produtores primários, capazes de absorver CO₂ dissolvido no oceano e de converter carbono inorgânico em carbono orgânico nos seus tecidos (Assis et al., 2011; Lian et al., 2023). As laminárias têm estruturas com vários metros de comprimento, que formam uma copa e amortecem a ondulação, originando habitats com ecologia local, nos quais outros organismos se conseguem desenvolver, reproduzir e

alimentar, potenciando a biodiversidade do local (Assis et al., 2011; Bekkby et al., 2023; Pereira, 2022; Steneck et al., 2002). As florestas de laminárias desenvolvem-se em latitudes médias (Figura 3), devido às limitações de luz das latitudes mais elevadas e às limitações de nutrientes, altas temperaturas do mar e competição de outras macrófitas em latitudes mais baixas (Assis et al., 2011; Steneck et al., 2002). Contudo, ao redor do globo, a área destas florestas está estimada numa extensão de cerca de 7,2 milhões de km², dos quais 1,5 milhões crescem em sedimento, no qual podem acumular carbono (Duarte et al., 2022).



Figura 3 - Distribuição geográfica das florestas de kelps (a azul).
 Fonte: Assis et al. (2011, p. 6)

As estimativas de área e produção de florestas de algas marinhas identificam-nas como um componente da biosfera de extrema importância, de área comparável à extensão e produção da floresta da Amazónia, razão pela qual devem ser consideradas nas contagens globais de carbono (Duarte et al., 2022). As macroalgas marinhas apresentam capacidade de mitigação das alterações climáticas através de quatro vertentes: co-benefícios ambientais da proteção e restauração das florestas marinhas selvagens, co-benefícios ambientais da expansão sustentável de aquacultura de macroalgas junto à costa, compensação das emissões industriais de dióxido de carbono com recurso a produtos provenientes de macroalgas e afundamento de macroalgas no fundo do mar para sequestro de carbono (Ross et al., 2023). O Atlântico Nordeste destaca-se como um local notável para investigação de ponta sobre resiliência ecológica e ecologia dinâmica e funcional, uma vez que coexistem várias espécies de algas formadoras de habitat, algumas das quais encontradas no limite das condições da sua amplitude de existência, sendo que a região aqueceu a taxas acima da média global (Smale et al., 2013). À semelhança de outros ecossistemas marinhos, a conservação, restauro

e uso sustentável são necessários para manter os benefícios das florestas marinhas (Eger et al., 2022; Howard et al., 2017).

Em Portugal, a maior concentração de biomassa de algas encontra-se a norte, ao largo de Viana do Castelo, embora a maior diversidade seja encontrada mais a sul (Pinho et al., 2016). A literatura indica abundantes agrupamentos de algas em Viana do Castelo, em Peniche e em Sines (Assis et al., 2011; Pinho et al., 2016). Ao longo da costa portuguesa é possível identificar várias espécies de kelps e pseudo-kelps, destacando-se as espécies *Laminaria hyperborea*, *L. ochroleuca*, *Saccorhiza polyschides*, *Saccharina latissima*, *Phyllariopsis brevipes*, *Phyllariopsis purpurascens*, bem como a exótica *Undaria pinnatifida* (Assis et al., 2011). Porém, tal como noutras partes do mundo, em Portugal, as florestas de algas marinhas têm vindo a sofrer fortes declínios, principalmente devido ao aumento progressivo da temperatura da superfície do mar (Casado-Amezúa et al., 2019).

Nos últimos anos, têm sido levados a cabo diversos projetos de reflorestação de florestas de algas marinhas, apesar das limitações em termos de financiamento, pessoal especializado e capacidades técnica e política, necessárias para gerir estas atividades (Wood et al., 2024). Um dos vários testes piloto de replantação foi levado a cabo pela *SeaForester* na costa portuguesa e parece mostrar bons resultados de autossuficiência (*SeaForester*, sem data). A par com a reflorestação, a aquacultura de macroalgas em ambiente marinho é uma opção que permite potenciar a manutenção dos serviços proporcionados por este tipo de ecossistemas. Contudo, em comparação com as florestas marinhas selvagens, a aquacultura apresenta uma menor quantidade de indivíduos e uma menor biodiversidade (Bekkby et al., 2023).

2.6. A aquacultura de algas marinhas e a economia azul

A aquacultura de algas marinhas pode ser realizada em diferentes ecossistemas marinhos, de diversas formas. Os sistemas de aquacultura em ambiente marinho podem ser costeiros ou em alto mar e as macroalgas podem ser cultivadas em cordas horizontais, próximas à superfície, ou em corda verticais, em profundidade (Peteiro et al., 2016). As técnicas de cultivo de algas em ambientes marinhos são relativamente simples. Há espécies adequadas a cada tipo e temperatura de água, que crescem rapidamente, com pouca necessidade de manutenção e que são relativamente simples de colher (Buck & Langan, 2017; Holmyard, 2011). Contudo, na Europa, os custos laborais e a falta de acesso a áreas para produção em larga escala, bem como a falta de investimento na mecanização dos processos de cultivo,

parecem ter dificultado a dispersão da aquacultura destes organismos (Buck & Langan, 2017).

A instalação de estações de aquacultura em alto mar implica diversos desafios, desde questões de engenharia e tecnologia, ao transporte e instalação, e à logística e manutenção que lhe estão associadas. Contudo, os últimos desenvolvimentos tecnológicos permitem concluir a viabilidade destas instalações em alto mar (Fujita et al., 2023; Lothmann & Sewilam, 2023), sendo possível ancorar o sistema de cordas e cabos da aquacultura no substrato marinho, através de cordas ou redes (García-Poza et al., 2020).

Em alto mar, as algas podem ser cultivadas diretamente nas cordas da aquacultura ou por meio de transplante, com um cultivo inicial nas cordas de crescimento, em ambiente controlado, e posterior transplantação para as cordas da aquacultura (García-Poza et al., 2020). Este método de aquacultura requer menos manutenção do que os métodos de aquacultura em terra, pelo que é menos dispendioso (Garavelli et al., 2022; García-Poza et al., 2020).

Numa ótica de otimização de recursos e minimização de impactos, estações de aquacultura em alto mar e estações de energias renováveis podem ser desenvolvidas em conjunto, através de plataformas multiuso (Abhinav et al., 2020; Garavelli et al., 2022). O desenvolvimento deste tipo de estruturas permite explorar em conjunto energias renováveis marinhas, entre as quais eólica, das ondas, das marés ou das correntes, com o cultivo de organismos vivos, na mesma área marítima (Abhinav et al., 2020), potenciando diferentes setores da economia azul.

Vários estudos referem o benefício ambiental deste tipo de plataformas e a redução de custos para ambas as explorações (Garavelli et al., 2022; Röckmann et al., 2017). O cultivo de macroalgas e a exploração de energia eólica em plataformas multiuso demonstra, por sua vez, alguns impactos contraditórios: por um lado, pode aumentar os problemas existentes atribuídos ao desenvolvimento de parques eólicos, tais como a fecundidade das espécies e a perturbação dos ecossistemas ou, em termos sociais, o conflito de partes interessadas entre os utilizadores marinhos; por outro, a integração da aquacultura de algas marinhas num parque eólico tem um potencial significativo para melhorar as condições sociais e ambientais circundantes, tais como estruturas de habitat melhoradas para a vida aquática e novas oportunidades económicas (O'Shea et al., 2024). Desta forma, a implementação deste tipo de projetos deve ser estudada caso a caso, atendendo às condições e características específicas do local em causa.

A aquacultura de macroalgas tem vindo a crescer, a par com o desenvolvimento de novas aplicações, mercados e técnicas, podendo ser explorada a nível industrial nas costas atlânticas, sendo que as unidades de produção deste tipo de aquacultura podem ser localizadas em alto mar ou em zonas costeiras (Araújo et al., 2021; Duarte et al., 2021).

Dados recentes da FAO (2022, 2024) relatam a importância da aquacultura de algas na economia azul: em 2020, foi atingida uma produção mundial recorde de cerca de 36 milhões de toneladas de peso fresco de algas em 2020, 97% das quais com origem em aquacultura, e, em 2022, a produção de algas mundial registou um aumento de 4%, sendo que 36,5 milhões foram produzidas em aquacultura e renderam 17 mil milhões de dólares. O crescimento médio mundial de aquacultura de algas, entre 2000-2022, encontra-se nos 5,8% (FAO, 2024). A média europeia é superior à média mundial, encontrando-se nos 7,6% e traduzindo-se num aumento geral de 396,5%, das 6 mil toneladas em 2000 para cerca de 30 mil toneladas em 2022 (FAO, 2024).

O potencial da biomassa de algas produzida na União Europeia encontra-se ainda subaproveitado, relativamente ao elevado potencial de aquacultura em alto mar, à incorporação de algas no tratamento de águas residuais e à mitigação de dióxido de carbono, bem como à sua utilização em cosmética ou biocombustíveis, em substituição de matérias-primas de origem fóssil (Araújo et al., 2021; Howard et al., 2017).

A biomassa resultante da aquacultura de macroalgas marinhas possui valor comercial além da própria biomassa a granel, com utilizações variadas para alimentação animal, para agricultura, ou para culinária (Bennett et al., 2023). Também há diversos compostos, passíveis de extração, com interesse para a indústria farmacêutica, cosmética ou química (Bennett et al., 2023; Sæther et al., 2024). Por outro lado, atividades de reflorestação ou extensão das florestas de macroalgas apresentam-se como oportunidades de sequestro de carbono azul (Duarte et al., 2017, 2021; Ross et al., 2023), cujas transações de créditos, atualmente, assumem valores médios superiores, entre 15 e 30 dólares, a outro tipo de crédito de carbono, entre 7 e 25 dólares, (Figura 4) (McKinsey & Company, 2022; The Nature Conservancy and Bain & Company, 2023).

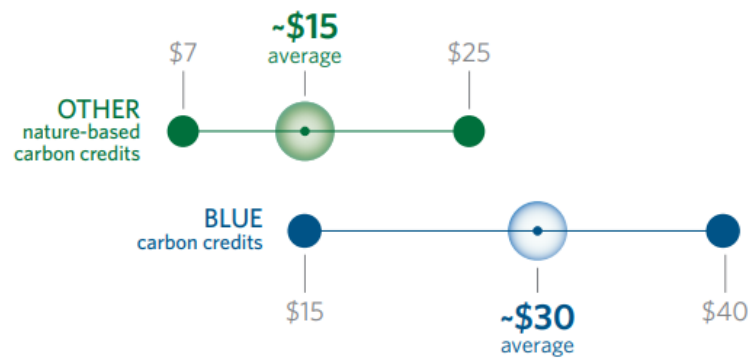


Figura 4 - Intervalo de preços por tipo de créditos de carbono.
Fonte: The Nature Conservancy and Bain & Company (2023, p. 4)

3. Metodologia

Com esta dissertação pretende-se estudar o valor associado à aquacultura de algas laminárias em Portugal, adjacentes a estações de exploração de energia eólica, em alto mar, através da análise do seu potencial de crescimento de biomassa e de sequestro de carbono, bem como o seu valor comercial como matéria-prima ou para venda como créditos de carbono.

Neste caso de estudo é considerada a implementação de uma exploração aquícola da espécie *Saccharina latissima* na Zona Livre Tecnológica de Viana do Castelo. Esta ZLT abriga, atualmente, o único parque eólico em alto mar em Portugal, pelo que se tomou como o local do caso de estudo, cuja caracterização em termos climáticos, geográficos e estruturais é descrita na secção 3.1.1 e 3.1.2. A instalação da aquacultura em cordas horizontais e a potencial biomassa produzida nesta aquacultura em Viana do Castelo é estimada com base em características e pressupostos de metodologias de cultivo tradicionais (Peteiro et al., 2016), sendo a espécie em estudo encontrada ao longo da costa norte-atlântica portuguesa (Cabioc'h et al., 2007), apta à exploração aquícola na região em estudo, e caracterizada na secção 3.1.3.

Na secção 3.2 desta dissertação descrevem-se as fórmulas de cálculo para estimar o sequestro de carbono, que são baseadas na avaliação e análise do sequestro de carbono em todo o ciclo de vida de laminárias (Lian et al., 2023), com os parâmetros devidamente adaptados ao caso de estudo, às condições locais do estudo e à espécie *Saccharina latissima*. O valor económico associado a esta aquacultura estima-se através do estudo dos custos de instalação e produção da aquacultura, das estimativas de crescimento da biomassa e do potencial de sequestro de carbono deste sistema, conforme detalhado no capítulo 4. Os custos da instalação do sistema de aquacultura têm por base estimativas da plataforma *Ocean Farming Hub*, disponível em <https://hub.greenwave.org/>. Esta plataforma foi desenvolvida por uma equipa interdisciplinar da *GreenWave*, formada por aquicultores, cientistas, especialistas em alimentação e consultores de diversas áreas. A interdisciplinaridade desta organização permite a partilha de informações que facilitam a produção de laminárias, desde a sementeira à apanha, ou montagem e orçamentos, e conecta uma rede mundial de aquicultores para questões técnicas ou de inovação. Os restantes custos, para os quais a plataforma *Ocean Farming Hub* não fornece dados, são estimados com base em dados de diversas entidades de referência na área, conforme explicitado no capítulo 4.

3.1. Caso de estudo - ZLT de Viana do Castelo

As características da área de estudo da presente dissertação, em termos climáticos, geográficos e biológicos, bem como os pressupostos subjacentes à obtenção dos dados utilizados, são descritas de seguida. O crescimento da biomassa e, conseqüentemente, o rendimento da aquacultura é influenciado por diferentes fatores abióticos, tais como radiação solar, CO₂ dissolvido na água, temperatura, salinidade e nutrientes disponíveis, bem como pelo próprio estado fisiológico da alga (Kerrison et al., 2015; Lubsch & Lansbergen, 2020). Desta forma, as caracterizações climáticas e geográficas permitem adequar os pressupostos de crescimento da biomassa ao local deste caso de estudo, tendo em conta esses fatores. Por outro lado, com a caracterização estrutural do parque eólico pretende-se adequar os custos de instalação do referido sistema.

3.1.1. Caracterização climática

O clima mediterrânico, com alguma influência em Portugal, é encontrado em várias regiões ao redor do mundo, localizadas entre as latitudes 30° e 40°, norte e sul, e tem como principais características, além de verões secos, a existência de uma corrente oceânica fria na costa oeste, que afeta o clima (Spano et al., 2003). Na Figura 5 é possível observar a distribuição geográfica mundial deste tipo de clima, na qual se identificam áreas localizadas nas costas oeste do Oceano Pacífico, do Oceano Atlântico e do Oceano Índico (Watson et al., 2008).

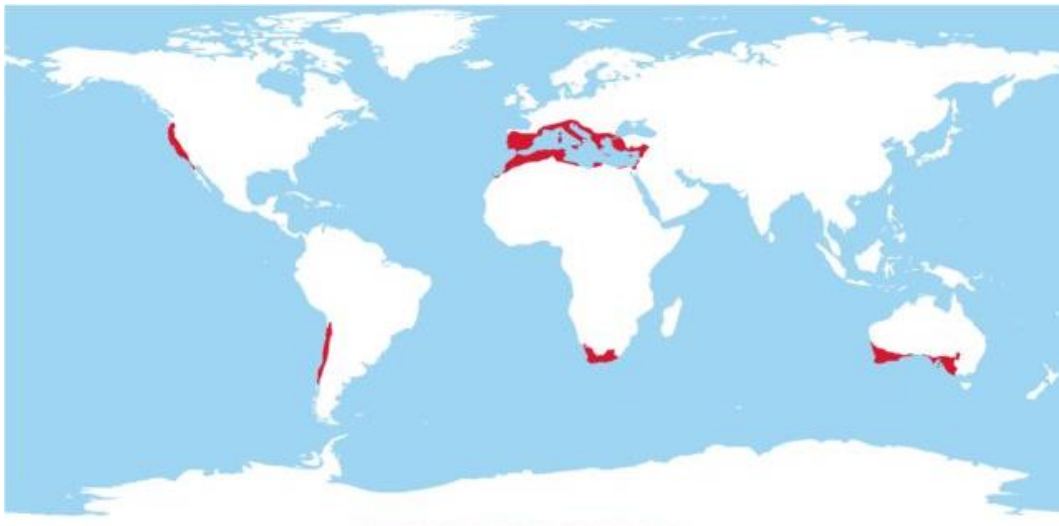


Figura 5 - Distribuição geográfica dos ecossistemas mediterrânicos (a vermelho).
Fonte: Watson et al. (2008, p. 25)

Na maior parte do território continental português, segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima é temperado, do Tipo C, verificando-se o Subtipo Cs, que corresponde a um clima temperado com verão seco. Na região mais a norte do país, a classificação é da variedade CsB, que corresponde a clima temperado com verão seco e suave⁵ (IPMA). De acordo com a Agência Europeia do Ambiente (European Environment Agency, 2020), a região mais a norte de Portugal, onde se encontra Viana do Castelo, é classificada como uma região biogeográfica de tipo atlântico, que corresponde às características anteriormente descritas, e as regiões mais a sul têm uma biogeografia mediterrânica (Figura 6).

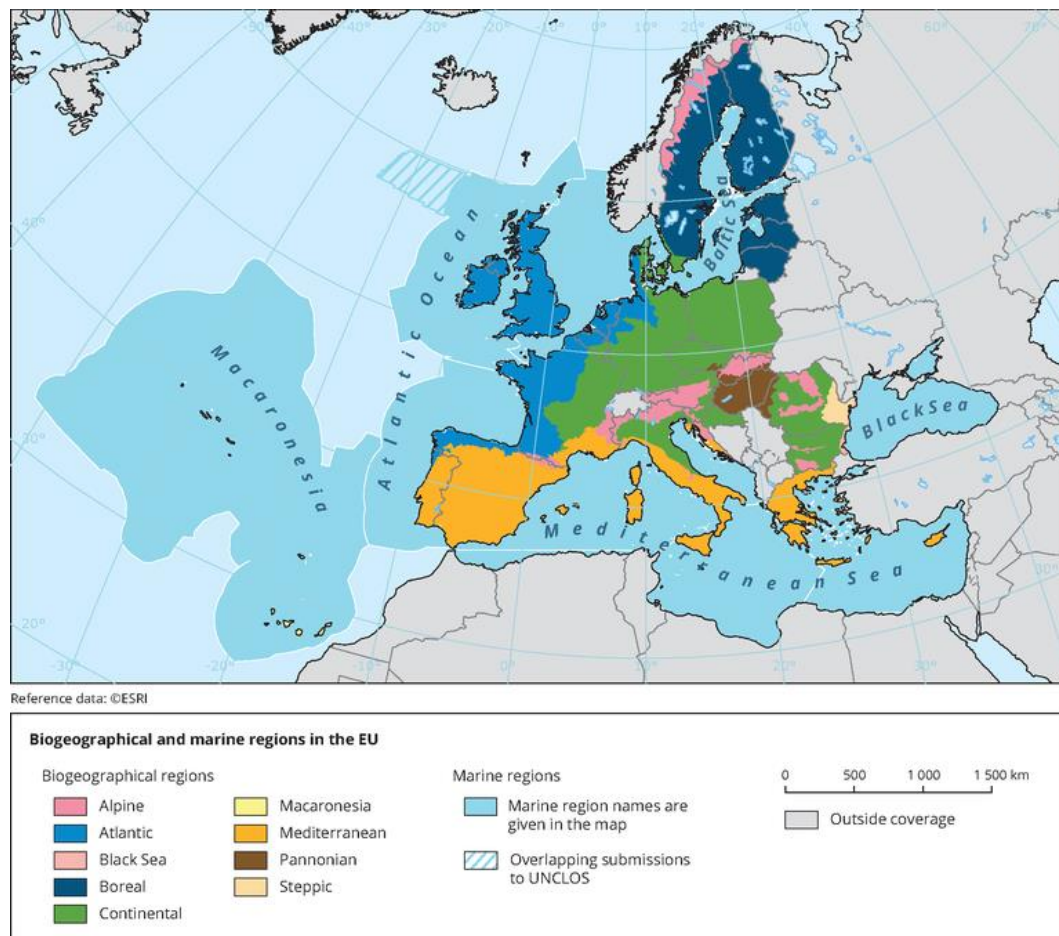


Figura 6 - Regiões biogeográficas e marinhas na União Europeia.
Fonte: Agência Europeia do Ambiente⁶

Com um clima Csb (IPMA), a temperatura média anual registada em Viana do Castelo é de 14,3°C, sendo que a água do oceano apresenta uma temperatura média de, aproximadamente, 15,2°C (Climate-Data, 2022) e apresenta uma duração média mensal de luz solar de cerca de

⁵ <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>

⁶ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/biogeographical-and-marine-regions-in>

366 horas, variando entre as 15 horas no solstício de verão e as 9 horas no solstício de inverno⁷ (*Weather Spark*, sem data). O número médio de horas de sol é de 231 horas, com variações entre 5 e 10 horas diárias de luz solar, com o valor mínimo registado em janeiro e o valor máximo registado em julho (*Climate-Data*, 2022). Relativamente a temperaturas mínimas e temperaturas máximas registadas, os registos indicam variações entre os 6°C como temperatura mínima, nos meses de janeiro e fevereiro, e os 23°C, nos meses de julho e agosto. Na temperatura da água do oceano verificam-se flutuações entre os 12,8°C, nos meses de fevereiro e março, e na ordem dos 17°C, entre os meses de julho a outubro.

3.1.2. Caracterização geográfico-estrutural

O parque eólico (Figura 7) ocupa uma área aproximada de 11 km², localizado a cerca de 18 km da costa de Viana do Castelo, no extremo noroeste de Portugal, e a uma latitude de cerca de 41° N. O parque encontra-se operacional desde 2020 e fornece energia à rede elétrica portuguesa, sendo caracterizado por possuir plataformas ancoradas e flutuantes, baseadas numa tecnologia de ponta inovadora, alicerçada na evolução das plataformas da indústria petrolífera, desenvolvida pela *Principle Power*.



Figura 7 - Fotografia do parque eólico *WindFloat Atlantic*.
Fonte: EDP⁸

⁷ <https://pt.weatherspark.com/y/32366/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Viana-do-Castelo-Portugal>

⁸ <https://www.edp.com/pt-pt/inovacao/windfloat>

Este parque eólico marítimo⁹ é formado por 3 turbinas eólicas, sendo que cada turbina se encontra sustentada por uma estrutura triangular de colunas unidas entre si, ancoradas à profundidade de cerca de 95 metros no leito marinho arenoso (*WindFloat Atlantic*, sem data). Cada uma destas estruturas triangulares é flutuante e semi-submersível, possuindo uma altura de 30 metros e uma distância de 50 metros entre cada uma das colunas unidas entre si, o que lhes confere maior estabilidade com a transferência de água entre as suas colunas (*WindFloat Atlantic*, sem data).

Atualmente, o parque eólico marítimo localizado ao largo de Viana do Castelo não se encontra associado à instalação de outras explorações, pelo que não pode ser considerado uma plataforma multiuso. Porém, dados os desenvolvimentos tecnológicos e a resistência deste tipo de estruturas em alto mar, assume-se que é possível que ali sejam instaladas e fixadas estações de aquacultura, permitindo reduzir alguns dos custos de instalação.

3.1.3. Caracterização biológica

A laminária *Saccharina latissima* (Linnaeus) C.E.Lane, C.Mayes, Druehl & G.W.Saunders 2006, conhecida comumente como taborrão, *sugar kelp* ou *kombu*, tem uma ampla distribuição geográfica, encontrando-se no norte de Portugal e nas costas europeias do Atlântico, bem como na costa americana do Pacífico (MarLIN, 2006; Oliveira et al., 1990; Pereira, 2022; Sæther et al., 2024). Esta é uma espécie perene, que pode viver de 2 a 4 anos e atingir 3 metros de comprimento e meio metro de largura (Assis et al., 2011).

As espécies de laminárias são apropriadas à aquacultura em alto mar (Figura 8), dada a sua baixa manutenção e fácil colheita (Buck & Langan, 2017). A *Saccharina latissima* apresenta taxas de crescimento mais elevadas durante o Inverno e a Primavera, e, apesar da taxa normal de crescimento ser de cerca de 1 cm/dia, já foram registadas taxas de crescimento de mais de 4 cm/dia (Azevedo et al., 2019; MarLIN, 2006). A literatura indica que o crescimento ótimo da biomassa desta espécie dá-se quando a água se encontra entre os 5°C e os 15°C (Kerrison et al., 2015). O cultivo desta espécie em alto mar, no norte de Portugal, em condições expostas, regista taxas de crescimento de 3,3%–4,5% por dia, no melhor período de crescimento, Inverno e Primavera (Azevedo et al., 2019).

⁹ <https://www.windfloat-atlantic.com/pt-pt/>



Figura 8 - *Saccharina latissima* em corda de crescimento de aquacultura.
Fonte: HQ Seaweed

Um estudo, com uma duração de 4 meses, relata crescimentos de cerca de 16 kg por cada metro de corda, traduzidos em rendimentos de 30,4 a 40,2 toneladas de alga fresca por hectare, isto é, cerca de 3,5 a 4,7 toneladas de alga seca por hectare (Peteiro & Freire, 2013). Estudos realizados com outras espécies de laminárias, ao longo do seu ciclo de vida, relatam rendimentos entre no intervalo de 3 a 67 toneladas por hectare (Sjøtun et al., 1998). O período temporal mais indicado para a instalação do cultivo e a colheita da biomassa, verifica-se entre novembro e dezembro e entre abril e maio, respetivamente, correspondendo o período ideal de cultivo a cerca de 5 meses (Peteiro et al., 2016). Tal significa que é possível fazer cerca de duas colheitas anuais.

Na Tabela 1, estão sintetizadas as características morfológicas e de crescimento da espécie.

Tabela 1 - Características morfológicas e de crescimento de *Saccharina latissima*.

Características	Valores de referência	Fonte
Idade máxima atingida	4 anos	Assis et al. (2011)
Tamanho máximo por espécime	300 x 50 cm	Assis et al. (2011)
Crescimento máximo	4 cm/dia	MarLIN (2006)
Temperatura da água para crescimento ótimo	entre 5°C e 15°C	(Kerrison et al. (2015)
Produção por ciclo produtivo	16 kg/m ² ; 30,2 a 40,2 ton/ha	Peteiro & Freire (2013)
Período de ciclo produtivo ideal	150 dias	Peteiro et al. (2016)

3.2. Estimativas de valores de carbono

As complexas interações de dissolução de dióxido de carbono entre a atmosfera e o oceano e a rápida renovação da biomassa de algas dificultam a quantificação do carbono azul sequestrado por algas marinhas (Dittmar & Stubbins, 2014; Gattuso et al., 2018; Hurd et al., 2022). Atualmente, não existe nenhuma metodologia certificada por entidades independentes devidamente qualificadas para a contabilização de sequestro carbono em florestas marinhas.

À dificuldade de gestão e contabilização de carbono, soma-se a dupla capacidade de armazenamento de carbono que estes organismos marinhos apresentam: o armazenamento de carbono no próprio organismo vivo, isto é, na sua biomassa, e o armazenamento de carbono nos sedimentos dos oceanos (Paine et al., 2021). Desta forma, continuam a ser desenvolvidas metodologias para calcular o sequestro de carbono através das algas marinhas (Ross et al., 2022).

Assim, na presente dissertação, o cálculo de estimativas de valores de carbono realizado, de seguida descrito, tem por base o estudo de Lian et al. (2023) acerca da avaliação e análise do sequestro de carbono em todo o ciclo de vida de laminárias, com as adaptações necessárias para a espécie aqui em estudo. Para calcular o dióxido de carbono equivalente absorvido ($C_{\text{absorvido}}$), é necessário considerar o somatório do carbono sequestrado pela biomassa (C_{biomassa}), do carbono libertado pela biomassa ($C_{\text{recalcitrante}}$) e do carbono fixado no sedimento ($C_{\text{sedimentar}}$). O $C_{\text{absorvido}}$ é a quantidade de CO_2 absorvida ao longo do ciclo de vida das algas, em ton/ano, representada pela equação apresentada de seguida (Equação 1), medido em CO_2eq :

$$C_{\text{absorvido}} = C_{\text{biomassa}} + C_{\text{recalcitrante}} + C_{\text{sedimentar}} \quad (1)$$

O carbono da biomassa é a quantidade de carbono na biomassa madura das algas ao longo de seu ciclo de vida, em ton/ano, representado pela Equação 2, em CO_2eq :

$$C_{\text{biomassa}} = W \times R \times C_{\text{aa}} \times F_{\text{cef}} \quad (2)$$

Na qual:

- W é o peso fresco da biomassa, em ton;
- R é a relação entre o peso seco e o peso fresco da biomassa;
- C_{aa} é o conteúdo de carbono da biomassa;
- F_{cef} é a razão da massa molar relativa do dióxido de carbono para o carbono.

O carbono recalcitrante, por seu lado, é a quantidade de carbono orgânico dissolvido recalcitrante produzido pelas algas ao longo de seu ciclo de vida, em ton/ano, representado abaixo, pela Equação 3, em CO₂eq:

$$C_{recalcitrante} = Q \times S \times D \times \alpha \times F_{cef} \quad (3)$$

Na qual:

- Q é a quantidade de libertação de carbono orgânico dissolvido, em g C/m²dia;
- S é a área de cultivo da aquacultura, em m²;
- D é o ciclo de cultivo da biomassa, em dias;
- α é a taxa de conversão de DOC para RDOC da biomassa;
- F_{cef} é a razão da massa molar relativa do dióxido de carbono para o carbono.

Por fim, o carbono sedimentar é a quantidade de carbono sedimentar produzido pelas algas ao longo de seu ciclo de vida, em ton/ano, representado na Equação 4, em CO₂eq:

$$C_{sedimentar} = V \times \beta \times S \times D \times F_{cef} \quad (4)$$

Na qual:

- V é a taxa de deposição de partículas, em g C/m²dia;
- β é o conteúdo de carbono orgânico no sedimento;
- S é a área de cultivo da aquacultura, em m²;
- D é o ciclo de cultivo da biomassa, em dias;
- F_{cef} é a razão da massa molar relativa do dióxido de carbono para o carbono.

4. Resultados

Os resultados que a seguir se apresentam constituem estimativas obtidas a partir de dados da plataforma *Ocean Farming Hub*, com base nas caracterizações definidas anteriormente, no capítulo 3, para a área de estudo em questão, a Zona Livre Tecnológica de Viana do Castelo. Para a obtenção dos dados foram selecionadas, na plataforma, as opções semelhantes às características da área de estudo do presente trabalho, descritas no capítulo anterior. De realçar, porém, que a escolha por um local com características idênticas ao local da área de estudo não garante a obtenção de exatamente os mesmos resultados.

Nesta plataforma apenas é possível selecionar locais pré-definidos, todos localizados nas costas oceânicas dos Estados Unidos da América, razão pela qual se estudaram as características climáticas e geográficas existentes em Viana do Castelo, para selecionar o local pré-definido com as condições mais semelhantes. Estas características, clima temperado com verão seco e suave, e existência de uma corrente oceânica fria, verificam-se também na costa californiana dos Estados Unidos da América (Climate-Data, 2022; Spano et al., 2003; Watson et al., 2008), razão pela qual a Califórnia foi o local selecionado para realizar as estimativas e cálculos a seguir apresentados.

As condições climáticas registadas em Viana do Castelo encontram-se no intervalo das características climáticas registadas para a costa californiana, nomeadamente entre as de São Francisco e as de Santa Bárbara. Conforme sintetizado na Tabela 2, a temperatura média encontra-se entre a média de 13,5°C de São Francisco e a média de 16,6°C de Santa Bárbara; a água do mar encontra-se entre a temperatura média de 12,4°C e de 15,4°C, de São Francisco e de Santa Bárbara, respetivamente; a área regista durações médias mensais de sol entre as 227 horas registadas em São Francisco e as 301 horas registadas em Santa Bárbara, com variações entre um mínimo de 6 e um máximo de 12 horas diárias de sol (Climate-Data, 2022).

Tabela 2 - Condições climáticas registadas nos locais de comparação e em Viana do Castelo.

	São Francisco (EUA)	Viana do Castelo	Santa Bárbara (EUA)
Temperatura	13,5°C	14,3°C	16,6°C
Temperatura da água do mar	12,4°C	15,2°C	15,4°C
Horas mensais de sol	227 h	231 h	301 h

Fonte: Climate-Data (2022)

Na presente dissertação avalia-se a implementação de aquacultura no parque eólico de Viana de Castelo, com base em metodologias de cultivo tradicionais, num sistema aquícola composto por cordas, boias e âncoras, adequado para locais expostos (Peteiro et al., 2016). Este sistema, habitualmente fixo ao substrato por âncoras, tem um conjunto de cordas horizontais, onde as algas se fixam e crescem, e ao longo das quais existem boias ou flutuadores, que permitem que as algas fiquem próximas à superfície. Na Figura 9 apresenta-se uma representação esquemática deste sistema.

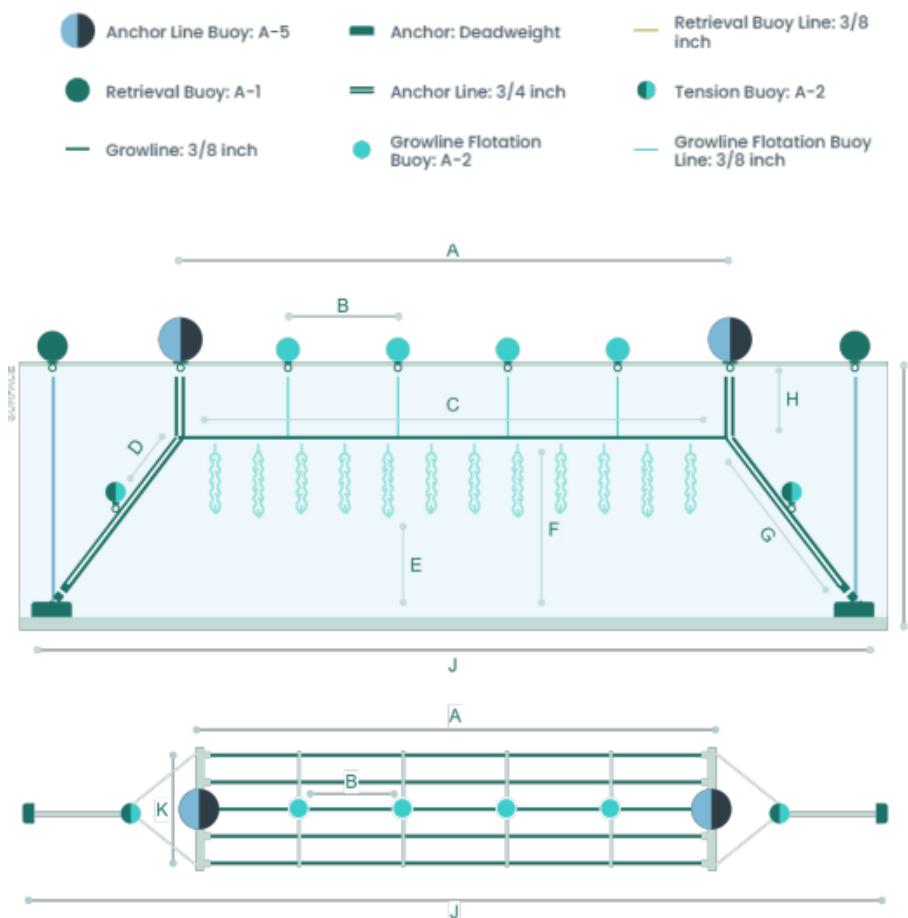


Figura 9 - Representação esquemática de um conjunto de 5 cordas de crescimento da aquacultura.

- A – distância entre boias de âncora (122m);
 - B – espaçamento entre boias de flutuação na corda de crescimento (24m);
 - C – comprimento das cordas de crescimento (122m);
 - D – distância da boia de tensão ao espalhador das cordas de crescimento;
 - E – espaço de crescimento vertical das laminárias;
 - F – espaço vertical entre as cordas de crescimento e o leito marinho (94m);
 - G – comprimento da corda de ancoragem;
 - H – distância da corda de crescimento à superfície (1m);
 - I – profundidade da água (95m);
 - J – comprimento do sistema de aquacultura (155m);
 - K – largura do conjunto de 5 cordas de crescimento do sistema de aquacultura (3m);
- Formas circulares – boias de âncora e boias de flutuação;
 Outras formas – âncoras, cordas de crescimento, cabos e cordas;
 Fonte: Plataforma *Ocean Farming Hub*

Neste caso de estudo, a aquacultura de algas marinhas é formada por três áreas similares adjacentes a um dos lados de cada uma das 3 estruturas triangulares das eólicas já instaladas na ZLT de Viana de Castelo. Cada área de aquacultura ocupa cerca de 2,5 hectares, perfazendo um total de 7,5 hectares. Cada área de aquacultura prevê a montagem de 10 conjuntos de 5 cordas de crescimento para algas, com um espaçamento entre conjuntos de 12 metros (Figura 10).

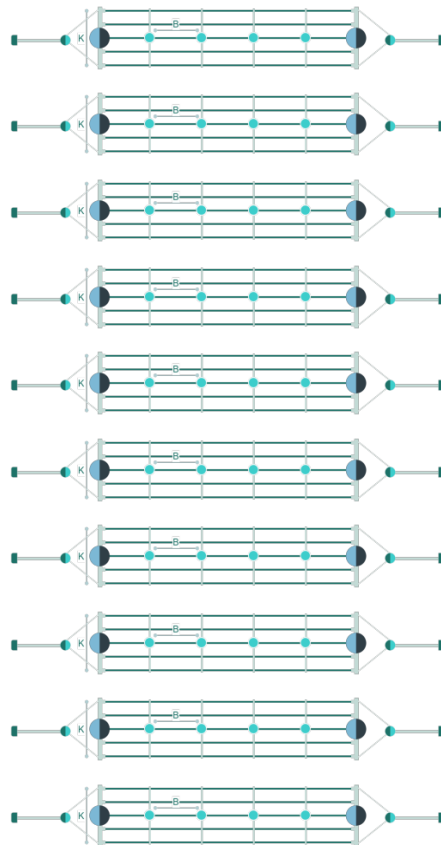


Figura 10 - Representação esquemática de uma área do sistema de aquacultura.

A instalação de cada área de aquacultura prevê, em cada extremidade, 2 âncoras e 2 boias de âncora, ligeiramente maiores. Ao longo de cada conjunto, que mede, aproximadamente, 122 metros de comprimento, está prevista a instalação de 4 boias de flutuação, mais pequenas, espaçadas igualmente entre si. Assim, em cada uma das três áreas de aquacultura estão disponíveis 6096 metros de cordas para crescimento das macroalgas marinhas.

No projeto desta aquacultura, opta-se pelo comprimento máximo recomendado para cada conjunto, razão pela qual se aumentou o número de boias para 4, de forma a permitir manter as cordas de crescimento mais próximas da superfície. A seleção da utilização de âncoras

relativamente às outras opções capazes de suportar a estrutura aquícola e a biomassa produzida deve-se ao seu custo mais acessível.

Nesta aquacultura, numa lógica de plataforma multiuso, assume-se que cada um dos conjuntos partilha uma das âncoras necessárias com cada uma das estruturas triangulares das eólicas, às quais estão adjacentes. Assim, para cada conjunto apenas se considera o custo de âncoras para uma das extremidades, em vez de duas, uma em cada extremidade.

Ao assumir que, em cada temporada de cultivo, de cerca de 5 meses ou 150 dias, por cada metro de corda de crescimento, é possível obter cerca de 16 kg de biomassa fresca (Peteiro et al., 2016), e sabendo que cada área de cultivo tem 6096 metros de corda de crescimento, a previsão de produção é de 97,5 toneladas de laminárias por cada área, perfazendo cerca de 292,6 toneladas por temporada de cultivo, nos cerca de 7,5 hectares das 3 áreas de aquacultura.

De acordo com as condições descritas, as 3 áreas de aquacultura resultam, assim, numa estimativa de rendimento, em peso fresco de *Saccharina latissima*, de 39329 kg/ha, ou 39,33 ton/ha em cada ciclo produtivo. Por sua vez, uma temporada de 5 meses de cultivo permite 2 colheitas anuais, duplicando, assim, a biomassa fresca e o respetivo rendimento da aquacultura, totalizando uma produção de, aproximadamente, 585 toneladas de algas nas 3 áreas de aquacultura e um rendimento anual de 78,66 ton/ha em todo o sistema aquícola (Tabela 3).

Tabela 3 - Rendimento da aquacultura de *Saccharina latissima* na ZLT de Viana do Castelo.

	1 área de aquacultura	3 áreas de aquacultura
Produtividade por colheita	16 kg/m	16 kg/m
Comprimento de cordas disponível	6 096 m	18 288 m
Produção por colheita	97 536 kg	292 608 kg
Produção anual	195 072 kg	585 216 kg
Área	2,48 ha	7,44 ha
Rendimento por colheita	39,33 ton/ha	39,33 ton/ha
Rendimento anual	78,66 ton/ha	78,66 ton/ha

Para o cálculo das estimativas de valores de carbono capturados pela aquacultura em análise usaram-se as equações (1) a (4), descritas no capítulo anterior, tendo em conta parâmetros adequados às condições deste estudo, com base em literatura para a espécie *Saccharina latissima*. Para esta espécie, a relação entre o peso seco e o peso fresco da biomassa (R) é de 11,3% (Gevaert et al., 2001) e o conteúdo de carbono na biomassa (Caa) é de 23,3%

(Azevedo et al., 2019). O fator de conversão de carbono para dióxido de carbono (F_{cef}) é de 44/12 (IPCC, 2006). Por sua vez, para os restantes parâmetros foram considerados os valores do estudo de Lian et al. (2023), isto é, a quantidade de libertação de carbono orgânico dissolvido (Q), no valor de 0,47g C/m²dia, a taxa de conversão de DOC para RDOC (α), 37,8%, a taxa de deposição de partículas, no valor de 162,34g C/m²dia, e o conteúdo em carbono orgânico no sedimento (β), 0,17%. Os parâmetros considerados para o cálculo das equações encontram-se detalhados na Tabela 4, também com as estimativas de sequestro ao longo de 4 anos, que corresponde ao período de vida desta espécie de laminária.

De acordo com os dados apresentados anteriormente, nesta aquacultura, a estimativa indica uma produção de 292,6 toneladas de biomassa fresca, numa área total de 7,44 hectares, para um período de cultivo de 150 dias. Assim, num ciclo produtivo, o sequestro resulta em 30,1 toneladas de CO₂eq absorvido, consistindo em 28,24 toneladas de CO₂eq na biomassa, 0,73 toneladas de CO₂eq recalcitrante e 1,13 toneladas de CO₂eq sedimentar. No final de 1 ano, com dois ciclos produtivos por ano, as laminárias da aquacultura podem sequestrar até cerca de 60,2 toneladas de CO₂eq. No final de 4 anos, período que corresponde ao tempo máximo de vida de um organismo da espécie *Saccharina latissima*, esse sequestro é, portanto, de 240,8 toneladas de CO₂eq.

Tabela 4 - Estimativas de sequestro de carbono da aquacultura a 4 anos, com 2 ciclos produtivos/ano.

	Parâmetros	Fonte	4 anos
C biomassa	W = 292,6 ton	dado deste estudo	225,99 ton CO ₂ eq
	R = 11,3%	Gevaert et al. (2001)	
	Caa = 23,3%	Azevedo et al. (2019)	
	Fcef = 44/12	IPCC (2006)	
C recalcitrante	Q = 0,47 g.C/m ² dia	Lian et al. (2023)	5,82 ton CO ₂ eq
	S = 74400 m ²	dado deste estudo	
	D = 150 dias	Peteiro et al. (2016)	
	α = 37,8%	Lian et al. (2023)	
	Fcef = 44/12	IPCC (2006)	
C sedimentar	V = 162,34 g.C/m ² dia	Lian et al. (2023)	9,03 ton CO ₂ eq
	β = 0,17%	Lian et al. (2023)	
	S = 74400 m ²	dado deste estudo	
	D = 150 dias	Peteiro et al. (2016)	
	Fcef = 44/12	IPCC (2006)	
C absorvido			240,84 ton CO ₂ eq

Relativamente aos custos de instalação da aquacultura, a plataforma *Ocean Farming Hub*, fornece dados acerca dos custos com material técnico, que são considerados nas estimativas a seguir. Para cada uma das áreas de aquacultura são considerados: 6096 metros de cordas de sementeira, diversos tipos de cabos, 10 âncoras para uma das extremidades dos 10 conjuntos de cordas de crescimento, 100 boias de 3 tipos diferentes e outros materiais diversos, como arame e espalhadores.

Ao considerar o preço unitário destes materiais, apresentados na Tabela 4, e de acordo com a plataforma *Ocean Farming Hub*, para as 3 áreas de aquacultura consideradas, o custo estimado com material técnico é de 36 mil dólares em cordas de sementeira, cerca de 14 mil dólares em cabos, aproximadamente 223 mil dólares em âncoras, cerca de 19 mil dólares em boias e 38 mil dólares noutros materiais.

Nos custos estimados desta aquacultura, prevê-se também a compra de uma máquina automática de colheita de algas marinhas, no valor aproximado de 40 mil dólares (*The Fish Site*, 2023). Esta máquina é colocada na embarcação e tem uma capacidade de colheita automática de 4,5 toneladas de algas por hora¹⁰, o que torna o processo de colheita mais rápido e económico (*The Fish Site*, 2023).

Também se contemplam custos de instalação e manutenção da aquacultura, como as despesas operacionais com a contratação de 3 colaboradores. Os custos para o empregador, com os gastos estimados com colaboradores, cujas principais aptidões se assumem como operar embarcações e participar nas operações de manutenção e colheita da produção, correspondem aos custos inerentes a uma remuneração mensal média equivalente a cerca de 1404 dólares¹¹ (*Brighter Future*, 2023), totalizando um valor aproximado a 78 mil dólares por ano¹².

Neste estudo, considera-se ainda o valor de 1210 dólares por dia referente ao aluguer de uma embarcação e o combustível necessário para as visitas à aquacultura, de manutenção e colheitas. Este valor contempla o aluguer de uma embarcação média, com um comprimento de fora-a-fora entre os 9 e os 12 metros, e uma potência de 300 cavalos, com um gasto máximo de cerca de 63 litros de combustível por hora¹³ (*Boating Mag*, 2019; DGRM, 2024), correspondendo o valor do aluguer a 400 dólares por dia e o valor do combustível a 8 horas diárias de funcionamento e 1,60 dólares cada litro de combustível. Os 20 dias, por ano,

¹⁰ <https://thefishsite.com/articles/affordable-automated-seaweed-harvester-launched>

¹¹ <https://www.brighterfuture.pt/profissao/174/Trabalhadores-qualificados-da-aquicultura-e-das-pescas/0>

¹² <https://dfin.pt/s/hFaTxb3>

¹³ <https://www.boatingmag.com/calculating-fuel-consumption/>

considerados para o funcionamento da embarcação contemplam a capacidade de colheita da máquina automática e seu transporte diário.

Na Tabela 5 estão detalhados os custos inerentes aos materiais, equipamentos, instalação e manutenção deste sistema de aquacultura. Os valores são apresentados em dólares americanos de forma a simplificar as conversões para os preços da biomassa e dos créditos de carbono, cujas transações, no mercado global, estão tabeladas nesta moeda.

Neste estudo, reconhece-se que todos os dados acima descritos resultam de uma estimativa que pode sofrer alterações, quer resultantes de flutuações de preços de mercado quer de condições técnicas de instalação e manutenção destes sistemas aquícolas. No entanto, procurou fazer-se um levantamento o mais realista possível, considerando todas as categorias de custos mais relevantes. De realçar que, apesar de os custos com licenças e seguros deverem também ser considerados, por indisponibilidade de informação para explorações aquícolas em alto mar não são aqui considerados.

Tabela 5 - Custos previstos para a instalação de 3 áreas de aquacultura em alto mar, de 10 conjuntos de 5 linhas de crescimento de laminárias.

	Preço unitário	Quantidade	Custo por área	Custo total (3 áreas)
Equipamentos e Material Técnico				\$369 771,07
Cordas de sementeira	\$1,97	6096,00 m	\$12 000,00	\$36 000,00
Cabo de 3 fios com flutuabilidade neutra de 0,9525cm	\$0,43	6681,22 m	\$2 849,60	\$8 548,80
Cabo de 3 fios com flutuabilidade neutra de 1,270cm	\$0,98	703,57 m	\$692,49	\$2 077,47
Cabo de 3 fios com flutuabilidade neutra de 1,905cm	\$1,90	597,14 m	\$1 136,80	\$3 410,40
Âncora de peso morto (linha final) 11,418kgs	\$7 425,74	10 uni	\$74 257,40	\$222 772,20
Boia da série A-1	\$31,15	20 uni	\$623,00	\$1 869,00
Boia da série A-2	\$42,14	60 uni	\$2 528,40	\$7 585,20
Boia da série A-5	\$159,36	20 uni	\$3 187,20	\$9 561,60
Manilha de ancoragem de 1,5875cm	\$13,91	40 uni	\$556,40	\$1 669,20
Elo de 1,5875cm	\$25,84	20 uni	\$516,80	\$1 550,40
Arame	\$0,05	20 m	\$1,00	\$3,00
Espalhador de fim de cordas em alumínio 10'	\$275,00	20 uni	\$5 500,00	\$16 500,00
Espalhador de cordas de crescimento em alumínio 10'	\$150,00	40 uni	\$6 000,00	\$18 000,00
Elo plano C-SS de 0,79375cm	\$3,73	20 uni	\$74,60	\$223,80
Máquina automática de colheita de algas	\$40 000,00	1 uni	-	\$40 000,00
Instalação e Manutenção (valor anual)				\$101 910,35
Recursos Humanos	\$25 903,45	3 colaboradores	-	\$77 710,35
Embarcação	\$1 210,00	20 dias	-	\$24 200,00
Total				\$471 681,42

Com base nas estimativas apresentadas de rendimento anual da aquacultura e dos respetivos custos, de seguida (Tabela 6), apresentam-se os custos por tonelada de biomassa fresca ou seca e por crédito de carbono.

O cálculo dos custos por tonelada de biomassa fresca ou seca e por crédito de carbono considera os custos relatados na Tabela 5, consistindo em equipamentos e material técnico no valor de \$369771,07 e em 4 anos de despesas operacionais no valor de \$407641,40 (4*\$101910,35), perfazendo um custo total de \$777412,47 para os 4 anos.

Este cálculo considera também as estimativas de rendimento a 4 anos. Com base na Tabela 3, a produção de biomassa em 4 anos corresponde um total de 2340,86 toneladas (4*585,216ton) e a biomassa seca corresponde ao valor de 11,3% da biomassa fresca, no total de cerca de 264,5 toneladas. Com base na Tabela 4, o dióxido de carbono absorvido totaliza 240,84 toneladas de CO₂eq.

Assim, considerando as quantidades de biomassa produzida (Tabela 3), o custo unitário de uma tonelada de biomassa fresca é de \$332,10, por tonelada, e o valor sobe para \$2938,98 se considerarmos a biomassa seca. Relativamente aos valores estimados de carbono absorvido (Tabela 4), o custo da tonelada, de acordo com os cálculos realizados, é de \$3227,97. Estes são, portanto, os valores mínimos de transação para cada um destes itens que permitem recuperar o investimento ao longo dos 4 anos de vida da alga.

Tabela 6 - Custos de produção de biomassa fresca e seca e CO₂eq absorvido da aquacultura, a 4 anos.

	Custo previsto	Produção a 4 anos	Custo unitário
Biomassa fresca	\$777 412,447	2340,86 ton	\$332,10
Biomassa seca		264,52 ton	\$2 938,98
CO ₂ eq absorvido		240,84 ton	\$3 227,97

5. Discussão

A integração de aquaculturas de algas marinhas com instalações de energia eólica em alto mar apresenta-se como uma abordagem inovadora para maximizar a utilização de áreas marinhas, promovendo, ao mesmo tempo, a sustentabilidade ambiental. Nesta dissertação, investigou-se o valor da aquacultura de algas marinhas adjacentes a estas áreas, avaliando o seu potencial de crescimento da biomassa e de sequestro de carbono, bem como os custos associados e o rendimento económico passível de obter.

5.1. Perspetiva da biomassa e carbono

A aquacultura de macroalgas em alto mar apresenta-se como uma oportunidade de cultivo, em alternativa a outros métodos de aquacultura, como a terrestre e a costeira. As estimativas do presente estudo apontam para taxas de crescimento das algas semelhantes aos crescimentos registados em estudos anteriores e um rendimento de 36,58 toneladas por hectare de biomassa fresca, enquadrado no intervalo de rendimentos de outro estudo realizado na mesma região biogeográfica e com condições semelhantes, de 30,4 a 40,2 toneladas (Peteiro & Freire, 2013). Nos quase 7,5 hectares considerados é esperada uma produção de cerca 272 toneladas de algas, a cada 150 dias.

As estimativas de sequestro de carbono das laminárias demonstram-se bastante promissoras. As macroalgas da aquacultura em estudo absorvem, a cada período de cultivo de 150 dias, cerca de 3,78 toneladas de CO₂eq por hectare. Ao considerar 1 ano de crescimento de biomassa, as laminárias sequestram 56,25 toneladas de CO₂eq na área total da aquacultura, isto é, cerca de 7,56 toneladas de CO₂eq por hectare.

O sequestro de carbono em florestas terrestres, considerando apenas o crescimento líquido da biomassa acima do solo nos primeiros 20 anos, encontra-se nos intervalos de 0,3-13,1 toneladas de CO₂eq por hectare por ano nas florestas tropicais, 1,4-12,1 toneladas de CO₂eq por hectare por ano nas florestas subtropicais, 0,9-4,0 toneladas de CO₂eq por hectare por ano nas florestas temperadas e de 0,2-1,9 toneladas de CO₂eq por hectare por ano nas florestas boreais (IPCC, 2019). Por sua vez, os mangais apresentam uma taxa de produção primária, ou crescimento, que ronda as 11 toneladas de peso seco por hectare por ano, traduzindo-se numa capacidade de sequestro de carbono na ordem das 1,74 toneladas de CO₂eq por hectare por ano (Alongi, 2012).

Uma comparação rápida com qualquer um dos ecossistemas terrestres acima referidos, revela a aquacultura de macroalgas com uma capacidade de sequestro de CO₂eq comparável ou superior, por unidade de área, por período temporal, razão pela qual, o cultivo de macroalgas parece ser uma oportunidade rápida para mitigar os efeitos do carbono, através do seu sequestro. Os parâmetros utilizados nos cálculos de carbono fornecem uma abordagem conservadora relativamente ao sequestro, uma vez que estudos de biomassa relatam conteúdo de carbono superiores, tendo sido utilizado o valor mais baixo do intervalo de referência de 23,3% ± 3,6% a 24,9% ± 2,3% (Azevedo et al., 2019).

Por sua vez, há algumas vulnerabilidades associadas à exploração aquícola em alto mar, entre as quais é importante referir a facilidade com que se pode perder biomassa, comparativamente com outros ecossistemas, a atual inexistência de uma metodologia adequada para quantificar o carbono nestes organismos, bem como o risco de tempestades oceânicas, que podem dificultar a monitorização e manutenção da aquacultura ou causar prejuízos.

5.2. Perspetiva económico-financeira

A valorização da biomassa produzida pode conseguir-se através da venda da biomassa fresca ou seca, extração de compostos, venda de créditos de carbono, entre outras. A biomassa da aquacultura pode ser encaminhada para alimentação animal, como farinhas, para atividade agrícola, como fertilizantes, ou para uso culinário, como alimento a granel, por exemplo (Bennett et al., 2023). A extração de compostos produzidos pelas macroalgas marinhas, que possuem atividade antibacteriana, atividade antioxidante, entre outras, têm diversas aplicações nas indústrias farmacêutica, cosmética e química (Bennett et al., 2023; Sæther et al., 2024). Finalmente, os créditos de carbono podem ser transacionados no mercado regulado ou no mercado voluntário (Carbon Credits, 2024).

De acordo com os custos associados à estrutura aquícola descrita, para que a atividade seja lucrativa, o preço de venda da biomassa fresca deve ser superior a 332,10 dólares por tonelada ou superior a 2938,98 dólares por tonelada na biomassa seca. Estes valores são muito superiores aos preços de mercado da alga seca (300-500 dólares por tonelada) mas ficam abaixo dos preços médios de 400-500 dólares por tonelada registados para a alga fresca (World Bank, 2023), consistindo esta última, portanto, numa possibilidade de venda lucrativa.

Relativamente aos custos da extração de compostos, dadas a sua diversidade e a necessidade de processamento muito diversificado consoante a indústria a que se destinam, não vão aqui ser contemplados.

Ao considerar o ciclo de vida das laminárias para o sequestro de carbono, de cerca de 4 anos, o preço mínimo de venda de um crédito de carbono, para compensar o investimento, corresponde a 3227,97 dólares. Segundo o World Bank (2023), há registos de preços médios de créditos de carbono emitidos a 534 dólares e 573 dólares, em 2021 e 2022, respetivamente. Estes valores não se encontram dentro do intervalo de preços do mercado dos créditos de carbono, com um preço médio por crédito de carbono azul a rondar 30 dólares (The Nature Conservancy and Bain & Company, 2023).

Atualmente, e na modalidade descrita, a instalação de uma aquacultura de laminárias adjacente a uma estação de energia eólica em alto mar apenas aparenta ser economicamente viável, se se considerar a aquacultura para a venda de biomassa fresca, cujo preço unitário por tonelada para recuperação do investimento a 4 anos se encontra abaixo do intervalo dos valores identificados no mercado.

Nos últimos anos, o mercado de macroalgas tem vindo a crescer (FAO, 2022, 2024), alcançando produções recordes anualmente. Em 2030, as estimativas preveem que os mercados estejam avaliados em cerca de dois mil milhões de dólares no mercado dos bioestimulantes e quatro mil milhões de dólares na produção de produtos nutracêuticos, por exemplo (World Bank, 2023). O mercado dos créditos de carbono também se encontra com uma tendência de crescimento positiva, avaliado atualmente em 400 milhões de dólares e as previsões indicam uma evolução para um mínimo de 10 mil milhões de dólares para 2030 (Carbon Credits, 2024).

Estes crescimentos dos mercados de macroalgas e de créditos de carbono referidos podem levar ao aumento do interesse pela aquacultura de macroalgas, pelo que se torna importante encontrar soluções que permitam gerir os conflitos sociais que se podem gerar, como a competição pelo espaço entre atividades marítimas (Sæther et al., 2024). Entre as partes interessadas e a competir pelo espaço marítimo em alto mar, podem ser consideradas outras explorações de energia renovável ou aquaculturas de outros organismos.

O recurso a plataformas multiuso de aquacultura e energias renováveis pode controlar o conflito de interesses relativos à ocupação do espaço marítimo, bem como rentabilizar a mesma área marinha com diferentes tipos de explorações e ser, assim, uma forma de reduzir

os custos necessários à instalação de ambas as atividades (Abhinav et al., 2020; Garavelli et al., 2022; Röckmann et al., 2017).

A instalação conjunta de explorações aquícolas e de energia renovável deve ser implementada, de forma a ser possível a redução dos custos, desde a planificação, ao transporte e à instalação e manutenção das estruturas. A combinação destas atividades permite ainda contribuir para o desenvolvimento da economia azul, potenciando diferentes agrupamentos, como o da pesca, agricultura, transformação e comercialização dos seus produtos e os novos usos e recursos do mar (INE, 2020), otimizando, ao mesmo tempo, o uso do espaço marítimo.

Outra possível forma de minimização de conflitos e de rentabilização da atividade baseia-se na aquacultura multitrófica, que apresenta uma boa relação entre lucro e sustentabilidade (García-Poza et al., 2020). Esta técnica de aquacultura permite fechar o ciclo, com os resíduos de uns organismos a serem utilizados como fonte de alimento por outros (Khanjani et al., 2022; Lothmann & Sewilam, 2023) e pode proporcionar mais rendimento, com a comercialização de organismos de diversos níveis tróficos, como peixes, invertebrados e algas, potenciando, assim, a rentabilidade da atividade económica e o bom estado do ecossistema. Embora ainda haja necessidade de pesquisa e desenvolvimento, esta técnica para a produção de alimentos em alto mar revela-se promissora, com a possibilidade de promoção de um futuro mais sustentável, de melhoria das condições ambientais e de desenvolvimento económico (Khanjani et al., 2022; Lothmann & Sewilam, 2023).

5.3. Perspetiva ambiental

A nível ambiental, a instalação de estruturas de aquacultura em alto mar deve ser analisada atendendo as condições e características específicas do local e com a procura de soluções que minimizem os impactos, promovendo a resiliência dos ecossistemas marinhos. Apesar de alguns impactos inevitáveis, a aquacultura de macroalgas proporciona serviços de ecossistemas, como a melhoria da qualidade da água e a criação de habitats, além de potenciar o capital natural da área.

Tal como as florestas selvagens, também os ambientes de aquacultura de algas marinhas proporcionam serviços de ecossistemas. Além do anteriormente referido e quantificado sequestro de carbono, as algas marinhas são capazes de criar habitats para outros organismos vivos, de absorver nutrientes em excesso da água e fazer biorremediação, de oxigenar e de

desacidificar a água, e de reduzir as emissões, sendo ainda passíveis de utilização em diversos produtos (Hasselström et al., 2018; World Bank, 2023).

Apesar de alguns registos indicarem que as aquaculturas de algas têm alguma capacidade de potenciar a biodiversidade, inclusive de peixes (World Bank, 2023), outros são mais cautelosos e mencionam apenas a existência de fauna habitualmente encontrada em florestas selvagens, mas em menor quantidade e diversidade (Bekkby et al., 2023). Um outro estudo refere que os benefícios da biodiversidade nas aquaculturas de algas devem ser avaliados de acordo com objetivos comerciais da atividade, uma vez que o aumento da biodiversidade pode conduzir à existência de pragas na biomassa e, assim, inviabilizar essa biomassa e prejudicar a atividade económica (Forbes et al., 2022).

De uma forma geral, a aquacultura de algas marinhas associa-se a impactos positivos, podendo contribuir ainda para diversos dos objetivos estratégicos da Estratégia Nacional para o Mar 2021-2030 (ENM 2021-2023), como: o combate às alterações climáticas e a proteção ou restauração dos ecossistemas, o fomento da economia azul circular e sustentável, a descarbonização, a segurança alimentar, entre outros (DGPM, 2022). A aquacultura de macroalgas associada à exploração de energia também se enquadra em algumas das definidas áreas de intervenção prioritárias da ENM 2021-2023, entre as quais: ciência e inovação, biodiversidade, bioeconomia azul, aquacultura e energias renováveis oceânicas, por exemplo.

6. Conclusões

Esta dissertação pretendia estudar o valor da aquacultura de laminárias em alto mar, em explorações conjuntas com parques eólicos, em Portugal. A exploração conjunta de aquacultura de algas marinhas com estações de energia eólica em alto mar apresenta-se como uma solução promissora para maximizar o uso sustentável das áreas marinhas, destacando-se pela produção de biomassa e pelo seu potencial de sequestro de carbono.

Este estudo demonstrou que a produção de biomassa em plataformas em alto mar é comparável a outros métodos, com um rendimento significativo e uma capacidade de sequestro de carbono bastante superior à de florestas terrestres, por unidade de área e período temporal. No entanto, os elevados custos de instalação e operação, juntamente com os desafios de mercado, como os preços atuais de biomassa e créditos de carbono, indicam que a viabilidade económica depende da otimização dos processos e de um planeamento estratégico que inclua a combinação de diferentes técnicas, como a aquacultura simultânea de organismos de outros níveis tróficos. Ambientalmente, a aquacultura de macroalgas proporciona vários serviços de ecossistemas, mas são necessários mais estudos para avaliar os impactos e benefícios, especialmente em escala comercial.

Em suma, a aquacultura de laminárias em alto mar apresenta um rendimento comparável a outros cultivos e uma capacidade de sequestro de carbono considerável. O cultivo de algas marinhas é uma abordagem bastante simples que potencia o desenvolvimento sustentável (Jagtap & Meena, 2022). No entanto, contrariamente à aquacultura costeira, que requer um pequeno investimento inicial (St-Gelais et al., 2022), os custos de instalação de cerca de 7,5 hectares de aquacultura em alto mar podem dificultar a atividade, pelo que se torna necessário otimizar todos os processos.

Em termos biológicos, a aquacultura de algas em alto mar tem diversas vertentes para possível otimização. Talvez seja necessário desenvolver estirpes de algas que resistam ao aumento da temperatura, dado o aquecimento global do planeta, ou desenvolver estirpes resistentes a doenças e à fixação de outros organismos, ou ainda com um crescimento mais acelerado, para obter mais biomassa por período de cultivo (Kim et al., 2017).

A atual inexistência de metodologias otimizadas para projetos de carbono de macroalgas dificulta a visão consensual acerca do contributo das mesmas no combate às alterações climáticas. Apesar de os processos que influenciam o sequestro do carbono por macroalgas

estarem bem descritos na literatura, existem lacunas de dados que dificultam o processo de contabilização (Fujita et al., 2022). Desta forma, parecem ser necessários mais estudos para que seja possível elaborar uma metodologia que permita a certificação de créditos de carbono e sua valorização, bem como o destino possível da biomassa que permitiu a sua emissão. O destino da biomassa que permitiu a emissão de créditos deve manter o carbono fixado. Entre as opções estão o seu afundamento no oceano ou a sua transformação em biocarvão (Lian et al., 2023; World Bank, 2023), contudo, não se sabe quais as consequências do afundamento e a transformação liberta parte do carbono para a atmosfera.

Diversos estudos indicam que através da exploração de plataformas multiuso com energias renováveis marinhas, é possível aumentar a receita e diminuir a despesa (Garavelli et al., 2022; Röckmann et al., 2017). Também projetos de aquacultura multitrófica podem favorecer o desenvolvimento sustentável e económico da atividade. A existência de plataformas já colocadas em alto mar mostra potencial, mas a implementação de estruturas de aquacultura deve ser antecedida de estudos específicos que avaliem a estrutura e a localização (Mosqueira et al., 2022).

Atualmente, ainda não são conhecidos todos os impactos da instalação deste tipo de estruturas em alto mar, sendo, por isso, necessário realizar mais estudos e testes piloto antes da implementação em larga escala. O setor das macroalgas marinhas tem um grande potencial de crescimento, mas, sozinhas, não são a solução para resolver os problemas decorrentes das crises climática, alimentar e de biodiversidade (World Bank, 2023). O desenvolvimento destas atividades requer um conjunto de políticas públicas favoráveis, bem como o trabalho alinhado de governos, cientistas, associações não governamentais e comunidades.

De futuro, o sucesso desta abordagem deve depender de inovações biotecnológicas, desenvolvimento de políticas públicas favoráveis e cooperação entre os diferentes setores e as comunidades, sendo essencial um planeamento cuidado para garantir a sustentabilidade e a viabilidade económica da atividade.

Referências Bibliográficas

- Abhinav, K. A., Collu, M., Benjamins, S., Cai, H., Hughes, A., Jiang, B., Jude, S., Leithead, W., Lin, C., Liu, H., Recalde-Camacho, L., Serpetti, N., Sun, K., Wilson, B., Yue, H., & Zhou, B. Z. (2020). Offshore multi-purpose platforms for a Blue Growth: A technological, environmental and socio-economic review. *Science of The Total Environment*, 734, 138256. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.138256>
- Acordo de Paris (2015), *Jornal Oficial União Europeia*, 282, 1-17. Obtido 16 de Agosto de 2024, de [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)&from=PL](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019(01)&from=PL)
- Agência Portuguesa do Ambiente. (sem data). *Protocolo de Quioto*. Obtido 16 de Agosto de 2024, de <https://apambiente.pt/clima/protocolo-de-quioto>
- Araújo, R., Vázquez Calderón, F., Sánchez López, J., Azevedo, I. C., Bruhn, A., Fluch, S., Garcia Tasende, M., Ghaderiardakani, F., Ilmjärv, T., Laurans, M., Mac Monagail, M., Mangini, S., Peteiro, C., Rebours, C., Stefansson, T., & Ullmann, J. (2021). Current status of the algae production industry in Europe: An emerging sector of the blue bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.626389>
- Assis, J., Tavares, J. T., Serrão, E. A., Alberto, F., Ferreira, C., Tavares, D., Paulos, L., & Tempera, F. (2011). *Florestas marinhas: As espécies de algas castanhas gigantes de Portugal*. Mundo Gobius Comunicação e Ciência.
- Azevedo, I. C., Duarte, P. M., Marinho, G. S., Neumann, F., & Sousa-Pinto, I. (2019). Growth of *Saccharina latissima* (Laminariales, Phaeophyceae) cultivated offshore under exposed conditions. *Phycologia*, 58(5), 504–515. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1625610>
- Bekkby, T., Torstensen, R. R. G., Grünfeld, L. A. H., Gundersen, H., Fredriksen, S., Rinde, E., Christie, H., Walday, M., Andersen, G. S., Brkljacic, M. S., Neves, L., & Hancke, K. (2023). ‘Hanging gardens’—comparing fauna communities in kelp farms and wild kelp forests. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1066101>
- Bennett, J. P., Robinson, L. F., & Gomez, L. D. (2023). Valorisation strategies for brown seaweed biomass production in a European context. *Algal Research*, 75, 103248. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2023.103248>

- Benton, G. S. (1970). Carbon dioxide and its role in climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 67(2), 898–899. <https://doi.org/10.1073/pnas.67.2.898>
- Bindoff, N. L., Cheung, W. W. L., Kairo, J. G., Arístegui, J., Valeria A. Guinder, Hallberg, R., Hilmi, N., Jiao, N., Karim, M. saiful, Levin, L., O'Donoghue, S., Cuicapusa, S. R. P., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A., & Williamson, P. (2022). Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. Em *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 447–588). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.007>
- Boating Mag.* (2019). <https://www.boatingmag.com/calculating-fuel-consumption/>
- Bouwma, I., Schleyer, C., Primmer, E., Winkler, K. J., Berry, P., Young, J., Carmen, E., Špulerová, J., Bezák, P., Preda, E., & Vadineanu, A. (2018). Adoption of the ecosystem services concept in EU policies. *Ecosystem Services*, 29, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.02.014>
- Brighter Future.* (2023, Outubro). Obtido 16 de Agosto de 2024, em <https://www.brighterfuture.pt/profissao/174/Trabalhadores-qualificados-da-aquicultura-e-das-pescas/0>
- Bruhwieler, L., Basu, S., Butler, J. H., Chatterjee, A., Dlugokencky, E., Kenney, M. A., McComiskey, A., Montzka, S. A., & Stanitski, D. (2021). Observations of greenhouse gases as climate indicators. *Climatic Change*, 165(1–2). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03001-7>
- Buck, B. H., & Langan, R. (2017). Aquaculture perspective of multi-use sites in the open ocean: The untapped potential for marine resources in the anthropocene. Em *Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean: The Untapped Potential for Marine Resources in the Anthropocene*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51159-7>
- Cabioc'h, J., Flocc'h, J.-I., le Toquin, A., Boudouresque, C.-F., Meinesz, A., & Verlaque, M. (2007). *Guía de las algas del Atlántico y del Mediterráneo* (Ediciones OMEGA).
- Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G., & Saba, V. (2018). Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature*, 556(7700), 191–196. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5>
- Carbon Credits. (2024, Junho 26). *The ultimate guide to understanding carbon credits*. <https://carboncredits.com/the-ultimate-guide-to-understanding-carbon-credits/>
- Cardoso, R. M., Soares, P. M. M., Lima, D. C. A., & Miranda, P. M. A. (2019). Mean and extreme temperatures in a warming climate: EURO CORDEX and WRF regional climate

- high-resolution projections for Portugal. *Climate Dynamics*, 52(1–2), 129–157. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4124-4>
- Casado-Amezúa, P., Araújo, R., Bárbara, I., Bermejo, R., Borja, Díez, I., Fernández, C., Gorostiaga, J. M., Guinda, X., Hernández, I., Juanes, J. A., Peña, V., Peteiro, C., Puente, A., Quintana, I., Tuya, F., Viejo, R. M., Altamirano, M., Gallardo, T., & Martínez, B. (2019). Distributional shifts of canopy-forming seaweeds from the Atlantic coast of Southern Europe. *Biodiversity and Conservation*, 28(5). <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01716-9>
- Climate-Data. (2022). *Dados climáticos*. Obtido 26 de Agosto de 2024, em <https://pt.climate-data.org/>
- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630). <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Cotas, J., Gomes, L., Pacheco, D., & Pereira, L. (2023). Ecosystem services provided by seaweeds. *Hydrobiology*, 2(1), 75–96. <https://doi.org/10.3390/hydrobiology2010006>
- Decisão (UE) 2016/1841, do Conselho, de 5 de outubro (2016).
- Decreto-Lei n.º 4/2024, de 5 de janeiro (2024).
- DGPM. (2022). *Estratégia Nacional para o Mar 2021-2030*.
- DGRM. (2024). *Relatório anual: Frota de pesca portuguesa - 2023*.
- Dittmar, T., & Stubbins, A. (2014). Dissolved organic matter in aquatic systems. Em *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., Vol. 12, pp. 125–156). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01010-X>
- Duarte, C. M. (2017). Reviews and syntheses: Hidden forests, the role of vegetated coastal habitats in the ocean carbon budget. *Biogeosciences*, 14(2), 301–310. <https://doi.org/10.5194/bg-14-301-2017>
- Duarte, C. M., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2021). A seaweed aquaculture imperative to meet global sustainability targets. *Nature Sustainability*, 5(3), 185–193. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00773-9>
- Duarte, C. M., Gattuso, J. P., Hancke, K., Gundersen, H., Filbee-Dexter, K., Pedersen, M. F., Middelburg, J. J., Burrows, M. T., Krumhansl, K. A., Wernberg, T., Moore, P., Pessarrodona, A., Ørberg, S. B., Pinto, I. S., Assis, J., Queirós, A. M., Smale, D. A., Bekkby, T., Serrão, E. A., & Krause-Jensen, D. (2022). Global estimates of the extent and

- production of macroalgal forests. *Global Ecology and Biogeography*, 31(7), 1422–1439. <https://doi.org/10.1111/geb.13515>
- 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(APR), 245020. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>
- Eger, A. M., Marzinelli, E. M., Christie, H., Fagerli, C. W., Fujita, D., Gonzalez, A. P., Hong, S. W., Kim, J. H., Lee, L. C., McHugh, T. A., Nishihara, G. N., Tatsumi, M., Steinberg, P. D., & Vergés, A. (2022). Global kelp forest restoration: past lessons, present status, and future directions. *Biological Reviews*, 97(4), 1449–1475. <https://doi.org/10.1111/brv.12850>
- European Environment Agency. (2020). *Biogeographical and marine regions in the EU*. <https://www.eea.europa.eu/>
- European Environment Agency. (2023, Agosto 10). *Global-Warming Potential (GWP)*. <https://ec.europa.eu/eurostat/>
- FAO. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022 - Towards Blue Transformation*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 - Blue Transformation in action*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Farghali, M., Mohamed, I. M. A., Osman, A. I., David, ., & Rooney, W. (2022). Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: A review. *Environmental Chemistry Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01520-y>
- Ferreira, A. B. G., Carneiro, M. A. do A., Fernandes, F. de O., & Soriano, E. M. (2021). Evaluation of ecosystem services provided by farmed and wild seaweeds. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 12(6), 499–511. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.006.0041>
- Fleming, R. J. (2018). An updated review about carbon dioxide and climate change. *Environmental Earth Sciences*, 77(6), 262. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7438-y>
- Forbes, H., Shelamoff, V., Visch, W., & Layton, C. (2022). Farms and forests: Evaluating the biodiversity benefits of kelp aquaculture. *Journal of Applied Phycology*, 34(6), 3059–3067. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02822-y>
- Fujita, R., Brittingham, P., Cao, L., Froehlich, H., Thompson, M., & Voorhees, T. (2023). Toward an environmentally responsible offshore aquaculture industry in the United

- States: Ecological risks, remedies, and knowledge gaps. *Marine Policy*, *147*, 105351. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105351>
- Fujita, R., Collins, J., Kleisner, K., Rader, D., Mejaes, A., Augyte, S., & Brittingham, P. (2022). *Carbon sequestration by seaweed: background paper for the Bezos Earth Fund - EDF workshop on seaweed carbon sequestration*.
- Galparsoro, I., Menchaca, I., Garmendia, J. M., Borja, Á., Maldonado, A. D., Iglesias, G., & Bald, J. (2022). Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms. *npj Ocean Sustainability*, *1*(1), 1. <https://doi.org/10.1038/s44183-022-00003-5>
- Garavelli, L., Freeman, M. C., Tugade, L. G., Greene, D., & McNally, J. (2022). A feasibility assessment for co-locating and powering offshore aquaculture with wave energy in the United States. *Ocean & Coastal Management*, *225*, 106242. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106242>
- García-Poza, S., Leandro, A., Cotas, C., Cotas, J., Marques, J. C., Pereira, L., & Gonçalves, A. M. M. (2020). The evolution road of seaweed aquaculture: Cultivation technologies and the industry 4.0. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(18), 6528. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186528>
- Gattuso, J. P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W. W. L., Howes, E. L., Joos, F., Allemand, D., Bopp, L., Cooley, S. R., Eakin, C. M., Hoegh-Guldberg, O., Kelly, R. P., Pörtner, H.-O., Rogers, A. D., Baxter, J. M., Laffoley, D., Osborn, D., Rankovic, A., Rochette, J., ... Turley, C. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, *349*(6243). <https://doi.org/10.1126/science.aac4722>
- Gattuso, J. P., Magnan, A. K., Bopp, L., Cheung, W. W. L., Duarte, C. M., Hinkel, J., Mcleod, E., Micheli, F., Oschlies, A., Williamson, P., Billé, R., Chalastani, V. I., Gates, R. D., Irisson, J.-O., Middelburg, J. J., Pörtner, H.-O., & Rau, G. H. (2018). Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, *5*(OCT). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00337>
- Gevaert, F., Davoult, D., Creach, A., Kling, R., Janquin, M. A., Seuront, L., & Lemoine, Y. (2001). Carbon and nitrogen content of *Laminaria saccharina* in the eastern English Channel: Biometrics and seasonal variations. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, *81*(5). <https://doi.org/10.1017/s0025315401004532>
- Gregory, J. M., Jones, C. D., Cadule, P., & Friedlingstein, P. (2009). Quantifying carbon cycle feedbacks. *Journal of Climate*, *22*(19), 5232–5250. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2949.1>

- Grupo de Trabalho para o planeamento e operacionalização de centros eletroprodutores baseados em fontes de energias renováveis de origem ou localização oceânica (Despacho n.º 11404/2022, de 23 de setembro).* (2023).
- Haines-Young, R., & Potschin-Young, M. B. (2018). Revision of the common international classification for ecosystem services (CICES V5.1): A policy brief. *One Ecosystem*, 3. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>
- Hasselström, L., Visch, W., Gröndahl, F., Nylund, G. M., & Pavia, H. (2018). The impact of seaweed cultivation on ecosystem services - a case study from the west coast of Sweden. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 53–64. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2018.05.005>
- Heinze, C. (2014). The role of the ocean carbon cycle in climate change. *European Review*, 22(1), 97–105. <https://doi.org/10.1017/S1062798713000665>
- Holmyard, N. (2011, Agosto 17). *Seaweed farming for profit*. SeafoodSource. <https://www.seafoodsource.com/features/seaweed-farming-for-profit>
- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E., Pidgeon, E., & Simpson, S. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(1), 42–50. <https://doi.org/10.1002/FEE.1451>
- Hurd, C. L., Law, C. S., Bach, L. T., Britton, D., Hovenden, M., Paine, E. R., Raven, J. A., Tamsitt, V., & Boyd, P. W. (2022). Forensic carbon accounting: Assessing the role of seaweeds for carbon sequestration. *Journal of Phycology*, 58(3), 347–363. <https://doi.org/10.1111/jpy.13249>
- INE. (2020). *Conta Satélite do Mar 2016-2018*.
- IPCC. (2001). Climate change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Em *Ipcc*.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories*.
- IPCC. (2014). 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Em T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, B. Jamsranjav, M. Fukuda, & T. Troxler (Eds.), *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

- Change* (Core Writing Team, H. Lee, & J. Romero, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- IPMA. (sem data). *Normais climatológicas*. Obtido 12 de Junho de 2024, de <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>
- Jagtap, A. S., & Meena, S. N. (2022). Seaweed farming: A perspective of sustainable agriculture and socio-economic development. Em *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability* (pp. 493–501). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00022-3>
- Jia, G., Shevliakova, E., Artaxo, P., Noblet-Ducoudré, N. De, Houghton, R., House, J., Kitajima, K., Lennard, C., Popp, A., Sirin, A., Sukumar, R., & Verchot, L. (2022). Land–climate interactions. Em *Climate Change and Land* (pp. 131–248). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.004>
- Kerrison, P. D., Stanley, M. S., Edwards, M. D., Black, K. D., & Hughes, A. D. (2015). The cultivation of European kelp for bioenergy: Site and species selection. *Biomass and Bioenergy*, 80, 229–242. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2015.04.035>
- Khanjani, M. H., Zahedi, S., & Mohammadi, A. (2022). Integrated multitrophic aquaculture (IMTA) as an environmentally friendly system for sustainable aquaculture: functionality, species, and application of biofloc technology (BFT). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45), 67513–67531. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22371-8>
- Khatiwala, S., Primeau, F., & Hall, T. (2009). Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean. *Nature*, 462(7271), 346–349. <https://doi.org/10.1038/nature08526>
- Kim, J. K., Yarish, C., Hwang, E. K., Park, M., Kim, Y., Kim, J. K., Yarish, C., Hwang, E. K., Park, M., & Kim, Y. (2017). Seaweed aquaculture: cultivation technologies, challenges and its ecosystem services. *Algae*, 32(1), 1–13. <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2017.32.3.3>
- Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G. J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdajie, A. Al, House, J., Pachauri, S., Figueroa, M., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S. K., Khennas, S., de la Rue du Can, S., ... Minx, J. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*, 16(7), 073005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>
- Lei n.º 98/2021, de 31 de dezembro (2021), Diário da República n.º 253/2021, Série I.

- Lian, Y., Wang, R., Zheng, J., Chen, W., Chang, L., Li, C., & Yim, S. C. (2023). Carbon sequestration assessment and analysis in the whole life cycle of seaweed. *Environmental Research Letters*, 18(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdae9>
- Lothmann, R., & Sewilam, H. (2023). Potential of innovative marine aquaculture techniques to close nutrient cycles. *Reviews in Aquaculture*, 15(3), 947–964. <https://doi.org/10.1111/raq.12781>
- Lovelock, C. E., & Reef, R. (2020). Variable impacts of climate change on blue carbon. *One Earth*, 3(2), 195–211. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.010>
- Lubchenco, J., & Haugan, P. M. (2023). The expected impacts of climate change on the ocean economy. Em *The Blue Compendium* (pp. 15–50). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16277-0_2
- Lubsch, A., & Lansbergen, R. A. (2020). Seaweed factsheet: Carbon carrying capacity in seaweed cultivation. Em *Proseaweed - Wageningen Marine Research*.
- Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P. S., Lovelock, C. E., Smale, D. A., Apostolaki, E. T., Atwood, T. B., Baldock, J., Bianchi, T. S., Chmura, G. L., Eyre, B. D., Fourqurean, J. W., ... Duarte, C. M. (2019). The future of blue carbon science. *Nature Communications*, 10, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>
- Macreadie, P. I., Costa, M. D. P., Atwood, T. B., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Lovelock, C. E., Serrano, O., & Duarte, C. M. (2021). Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(12), 826–839. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190104. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>
- MarLIN. (2006). *BIOTIC - Biological Traits Information Catalogue*. Marine Life Information Network. Plymouth: Marine Biological Association of the United Kingdom.
- McCarthy, G. D., Brown, P. J., Flagg, C. N., Goni, G., Houpert, L., Hughes, C. W., Hummels, R., Inall, M., Jochumsen, K., Larsen, K. M. H., Lherminier, P., Meinen, C. S., Moat, B. I., Rayner, D., Rhein, M., Roessler, A., Schmid, C., & Smeed, D. A. (2020). Sustainable Observations of the AMOC: Methodology and Technology. *Reviews of Geophysics*, 58(1). <https://doi.org/10.1029/2019RG000654>

- McKinsey & Company. (2022). *Blue carbon: The potential of coastal and oceanic climate action*.
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. Em *Frontiers in Ecology and the Environment* (Vol. 9, Número 10). <https://doi.org/10.1890/110004>
- Mosqueira, M., Pombo, A., Borges, C., Brito, A. C., Zacarias, N., Esteves, R., & Palma, C. (2022). Potential for coastal and offshore aquaculture in Portugal: Insights from physico-chemical and oceanographic conditions. *Applied Sciences*, 12(5), 2742. <https://doi.org/10.3390/app12052742>
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine. (2022). A research strategy for ocean-based carbon dioxide removal and sequestration. Em *A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26278>
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valedes, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (2009). *Blue carbon: A rapid response assessment*.
- Oliveira, E. V. de, Galhano, F., & Pereira, B. (1990). Atividades agro-marítimas em Portugal. Em *Atividades agro-marítimas em Portugal*. <https://doi.org/10.4000/books.etnograficapress.6338>
- O'Shea, R., Capuzzo, E., Hemming, V., Grebe, G., Stafford, R., van den Burg, S. W. K., Wood, D., Watson, G., Wells, V., Johnson, T., Erbs, S., W. van Hal, J., Binnerts, B., Collins, A. M., & Howe, C. (2024). Managing offshore multi-use settings: Use of conceptual mapping to reduce uncertainty of co-locating seaweed aquaculture and wind farms. *Journal of Environmental Management*, 358, 120696. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120696>
- Paine, E. R., Schmid, M., Boyd, P. W., Diaz-Pulido, G., & Hurd, C. L. (2021). Rate and fate of dissolved organic carbon release by seaweeds: A missing link in the coastal ocean carbon cycle. *Journal of Phycology*, 57(5), 1375–1391. <https://doi.org/10.1111/jpy.13198>
- Pereira, L. (2022). Macroalgae: Diversity and Conservation. Em *Life Below Water* (pp. 527–539). https://doi.org/10.1007/978-3-319-98536-7_33
- Peteiro, C., & Freire, Ó. (2013). Biomass yield and morphological features of the seaweed *Saccharina latissima* cultivated at two different sites in a coastal bay in the Atlantic coast

- of Spain. *Journal of Applied Phycology*, 25(1), 205–213. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9854-9>
- Peteiro, C., Sánchez, N., & Martínez, B. (2016). Mariculture of the Asian kelp *Undaria pinnatifida* and the native kelp *Saccharina latissima* along the Atlantic coast of Southern Europe: An overview. *Algal Research*, 15, 9–23. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2016.01.012>
- Pinho, D., Bertocci, I., Arenas, F., Franco, J. N., Jacinto, D., Castro, J. J., Vieira, R., Sousa-Pinto, I., Wernberg, T., & Tuya, F. (2016). Spatial and temporal variation of kelp forests and associated macroalgal assemblages along the Portuguese coast. *Marine and Freshwater Research*, 67(1). <https://doi.org/10.1071/MF14318>
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020, de 10 de julho (2020), Diário da República n.º 133/2020, Série I.
- Röckmann, C., Lagerveld, S., & Stavenuiter, J. (2017). Operation and maintenance costs of offshore wind farms and potential multi-use platforms in the Dutch North Sea. Em *Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean: The Untapped Potential for Marine Resources in the Anthropocene*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51159-7_4
- Ross, F., Boyd, P. W., Filbee-Dexter, K., Watanabe, K., Ortega, A., Krause-Jensen, D., Lovelock, C., Sondak, C. F. A., Bach, L. T., Duarte, C. M., Serrano, O., Beardall, J., Tarbuck, P., & Macreadie, P. I. (2023). Potential role of seaweeds in climate change mitigation. *Science of The Total Environment*, 885, 163699. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.163699>
- Ross, F., Tarbuck, P., & Macreadie, P. I. (2022). Seaweed afforestation at large-scales exclusively for carbon sequestration: Critical assessment of risks, viability and the state of knowledge. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1015612>
- Sæther, M., Diehl, N., Monteiro, C., Li, H., Niedzwiedz, S., Burgunter-Delamare, B., Scheschonk, L., Bischof, K., & Forbord, S. (2024). The sugar kelp *Saccharina latissima* II: Recent advances in farming and applications. *Journal of Applied Phycology*, 36(4), 1953–1985. <https://doi.org/10.1007/S10811-024-03213-1>
- SeaForester. (sem data). Obtido 20 de Junho de 2024, de <https://www.seaforester.org/>
- Sjøtun, K., Fredriksen, S., & Rueness, J. (1998). Effect of canopy biomass and wave exposure on growth in *Laminaria hyperborea* (Laminariaceae: Phaeophyta). *European Journal of Phycology*, 33(4), 337–343. <https://doi.org/10.1080/09670269810001736833>

- Smale, D. A., Burrows, M. T., Moore, P., O'Connor, N., & Hawkins, S. J. (2013). Threats and knowledge gaps for ecosystem services provided by kelp forests: a northeast Atlantic perspective. *Ecology and Evolution*, 3(11), 4016–4038. <https://doi.org/10.1002/ece3.774>
- Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., Ferreira, J. J., & Miranda, P. M. A. (2015). Climate change and the Portuguese precipitation: ENSEMBLES regional climate models results. *Climate Dynamics*, 45(7–8), 1771–1787. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2432-x>
- Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., Lima, D. C. A., & Miranda, P. M. A. (2017). Future precipitation in Portugal: high-resolution projections using WRF model and EURO-CORDEX multi-model ensembles. *Climate Dynamics*, 49(7–8), 2503–2530. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3455-2>
- Spano, D., Snyder, R. L., & Cesaraccio, C. (2003). *Mediterranean Climates* (pp. 139–156). https://doi.org/10.1007/978-94-007-0632-3_10
- Steneck, R. S., Graham, M. H., Bourque, B. J., Corbett, D., Erlandson, J. M., Estes, J. A., & Tegner, M. J. (2002). Kelp forest ecosystems: Biodiversity, stability, resilience and future. Em *Environmental Conservation* (Vol. 29, Número 4). <https://doi.org/10.1017/S0376892902000322>
- St-Gelais, A. T., Fredriksson, D. W., Dewhurst, T., Miller-Hope, Z. S., Costa-Pierce, B. A., & Johndrow, K. (2022). Engineering a low-cost kelp aquaculture system for community-scale seaweed farming at nearshore exposed sites via user-focused design process. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 848035. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.848035>
- The Fish Site*. (2023, Dezembro 12). <https://thefishsite.com/>
- The Nature Conservancy and Bain & Company. (2023). *Analysis of farmed seaweed carbon crediting and novel markets to help decarbonize supply chains*.
- Verra. (2022, Outubro 6). *Verified carbon standard*. <https://verra.org/programs/verified-carbon-standard/>
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389–395. <https://doi.org/10.1038/416389a>
- Watson, A., Judd, S., Watson, James., Lam, A., & Mackenzie, D. (2008). *The extraordinary nature of the Great Western Woodlands*. The Wilderness Society of WA.
- Weather Spark*. (sem data). Obtido 28 de Setembro de 2024, de <https://pt.weatherspark.com/>

WindFloat Atlantic. (sem data). Obtido 27 de Abril de 2024, de <https://www.windfloat-atlantic.com/pt-pt/>

Wood, G. V., Filbee-Dexter, K., Coleman, M. A., Valckenaere, J., Aguirre, J. D., Bentley, P. M., Carnell, P., Dawkins, P. D., Dykman, L. N., Earp, H. S., Ennis, L. B., Francis, P., Franco, J. N., Hayford, H., Lamb, J. B., Ling, S. D., Layton, C., Lis, E., Masters, B., ... Wernberg, T. (2024). Upscaling marine forest restoration: challenges, solutions and recommendations from the Green Gravel Action Group. *Frontiers in Marine Science*, *11*, 1364263. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1364263>

World Bank. (2023). *Global Seaweed: New and Emerging Markets Report*. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/40187>