

Estimativa do potencial produtivo de bioetanol e da captura de carbono de *Kappaphycus alvarezii* na costa brasileira

Daniel de Berrêdo Viana ¹

RESUMO

Este artigo avaliar as perspectivas da maricultura de macroalgas para a produção de bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) no âmbito da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Calculou-se a área apta à produção de *K. alvarezii* para auxiliar no cumprimento das metas anuais de descarbonização para o setor de combustíveis e no atingimento das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) do Brasil. Não obstante, esta produção apresenta sinergias com outros setores não-bioenergéticos, como a indústria de cosméticos, indústria alimentar e setor agropecuário, inclusive com o aumento da descarbonização de diversas cadeias produtivas a partir da adoção de produtos substitutos de baixa pegada de carbono e menor importação de fertilizantes. Os valores encontrados foram de 5.718.225 toneladas de algas secas, sequestrando 356.817,2 toneladas de CO₂ e gerando 60.041.362,5 l de etanol ao ano. Em termos de valor econômico, o preço total do etanol vendido pode chegar a R\$ 107.774.245,69 (R\$1,795/l na produção – ANP 2020), com um adicional de 15,5 milhões de CBIOs.

Palavras-chave: Macroalga, Bioetanol, *Kappaphycus alvarezii*, GEE, Blue Carbon.

INTRODUÇÃO

A preocupação mundial em relação à poluição ambiental e ao aquecimento global levou a diversas iniciativas que buscam soluções alternativas ao consumo do petróleo, principalmente como fonte energética. No Brasil, destacam-se o etanol de lignocelulose (bioetanol), combustível produzido a partir de resíduos agroindustriais, como o bagaço de cana, e o biodiesel, combustível renovável obtido a partir da transesterificação de óleos e gordura animal em reação química com um álcool primário, metanol ou etanol (ANP, 2020). Embora possam causar o conflito do uso de terra com culturas alimentícias e contribuam para a poluição atmosférica local, os biocombustíveis apresentam diversos pontos favoráveis como substitutos de fontes fósseis, uma vez que permitem uma maior segurança energética, dado que são renováveis, favorecem a previsibilidade do mercado, uma vez que não dependem de importações, e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa no setor de combustíveis.

¹ Doutor pelo Curso de Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro, danberredo@ivig.coppe.ufrj.br;

Ainda utilizam a mesma logística de distribuição vigente e apresentam compatibilidade com os motores em operação no mercado.

Nesta perspectiva, a introdução dos biocombustíveis por meio de políticas públicas na matriz energética brasileira se deu por meio do Proálcool (Programa Nacional do Alcool), em 1975. Este programa consistiu em uma iniciativa do governo brasileiro de intensificar a produção de álcool combustível para substituir a gasolina após o primeiro e segundo choque do petróleo mundial. Destaca-se que a questão ambiental não foi a principal razão que estimularam estimulou a criação do Proálcool, mas o auxílio sua contribuição à descarbonização da matriz energética brasileira se mostra de grande importância.

Como um dos esforços para cumprir os compromissos assumidos pelo Brasil na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015 (COP 21), o país estabeleceu metas anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, com o intuito de aumentar a participação de bioenergia na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030 (MME/EPE, 2016).

Para viabilizar tais metas, foi estabelecida a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) através da Lei nº 13.576/2017, com regulamentações adicionais através do Decreto nº 9.888/2019, da Portaria nº 419 de 20/11/2019 expedida pelo Ministério de Minas e Energias. A Resolução ANP nº 802/2019 estabeleceu os procedimentos para geração de lastro necessário para emissão primária do CBIO. As metas nacionais são divididas entre todos os distribuidores de combustíveis com base na proporção de combustíveis fósseis que comercializam, dando origem a metas individuais compulsórias anuais, calculadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Por outro lado, os produtores de biocombustíveis, voluntariamente, certificam sua produção e recebem notas de eficiência energético-ambiental. Essas notas, por sua vez, são multiplicadas pelo volume de biocombustível comercializado por cada produtor, o que resulta na quantidade de créditos que podem ser emitidos para o mercado.

O Crédito de Descarbonização (CBIO) é emitido por produtores e importadores de biocombustíveis, devidamente certificados pela ANP, com base em suas notas fiscais de compra e venda. Neste âmbito, a aquisição de CBIO será a única forma de atingir as respectivas metas anuais de descarbonização dos distribuidores de combustíveis fósseis. Cada CBIO corresponderá a uma tonelada de CO₂ evitado, retirado de circulação quando solicitada sua aposentadoria pelos distribuidores que contenham sua titularidade, uma vez que não expiram.

No entanto, algumas publicações ressaltam que a capacidade de atendimento da produção nacional de biocombustíveis às metas e legislações vigentes não estão ameaçadas somente por eventos excepcionais. De Souza et al. (2017) analisou diversos cenários de crescimento dos setores de etanol e biodiesel, com objetivo de estimar o quanto o Brasil precisaria produzir de biodiesel para atingir a meta da NDC de 18% da composição da matriz energética por biocombustíveis líquidos, a luz das previsões de crescimento do etanol. Os resultados apresentados apontam que esta meta é irreal, sendo necessário uma maior produção de outros biocombustíveis para o mercado nacional.

Adams et al. (2009) já apontava que a demanda por bioetanol superava a oferta. Desde então, a demanda pelo uso da terra continua a aumentar, ressaltando questões éticas sobre a conversão de áreas agrícolas alimentícias em áreas de cultivos bioenergéticos. Neste âmbito, é identificada a necessidade urgente de diversificação e aumento das escalas de produção, tanto o aumento da participação do bioetanol na matriz energética como de outros biocombustíveis de fontes oleaginosas, evitando assim que o Brasil falhe em atingir as metas de descarbonização em 2030. Neste âmbito, a busca por alternativas ainda pouco exploradas e que tenham capacidade de superar barreiras técnicas e socioeconômicas é imprescindível para o setor energético, incluindo aquelas rotas que não gerem um *trade-off* indesejado entre a bioenergia e a segurança alimentar, sendo uma das soluções a produção de bioetanol de algas.

As algas são seres vivos que habitam ambientes terrestres úmidos ou meios aquáticos, de água doce ou salgada. Podem ser uni- ou pluricelulares, fotossintetizantes e não possuem embrião ou tecidos especializados. Diversas espécies de algas são capazes de serem transformadas em bioenergia, alimentos e outros produtos comercialmente interessantes, sem necessitar a ocupação do solo, com baixo impacto ambiental e contribuindo para o sequestro de carbono (RAVEN et al. 2007). As algas podem ser cultivadas pela prática chamada de algicultura ou ficocultura, tanto em tanques quanto diretamente no mar, esta última englobada dentro do termo maricultura.

Adams et al. (2009) demonstrou que algumas algas marrons chegam a produzir de 3 a 11,1 kg por m² ao ano de material seco, com uma colheita acumulando mais de 50% do peso seco como açúcares, os quais podem ser fermentados em etanol. Um comparativo entre produtividade de algas e outras culturas para bioetanol pode ser visto na *Tabela 1*.

Tabela 1: Uma comparação entre as principais culturas de bioetanol e macroalgas. Adaptado de Adams, 2009.

Grão de trigo	Milho	Beterraba	Cana de açúcar	Macroalgas
---------------	-------	-----------	----------------	------------

Rendimento médio mundial (kg* ha⁻¹*ano⁻¹)	2.800	4.815	47.070	68.260	730.000
Peso seco de carboidratos hidrolisáveis (kg*ha⁻¹*ano⁻¹)	1.560	3.100	8.825	11.600	40.150
Volume potencial de etanol (l* ha⁻¹*ano⁻¹)	1.010	2.010	5.150	6.756	23.400

Dentre as espécies cultivadas no mundo e com produção no Brasil, a *Kappaphycus alvarezii* é uma macroalga vermelha (Rodophyta) que apresenta uma grande versatilidade de produtos comercialmente aproveitáveis. Como aponta Gelli (2019), desta cultura podem ser extraídos o hidrocolóide carragenana, bioativos, estimulantes agrícolas e biocombustíveis, além de poder ser consumida na alimentação humana ou animal.

Diversos autores apontam a capacidade de produção de bioetanol desta espécie. Meinita et al. (2011) comparou 55 espécies para a produção de bioetanol, e a alga *Kappaphycus alvarezii* foi selecionada como o melhor recurso para a produção de bioetanol devido à sua alta quantidade de biomassa e galactose do tipo D, além de ser uma das algas vermelhas mais abundantes e facilmente cultiváveis no mundo. Hargreaves et al. (2013) apresentou o uso de *Kappaphycus alvarezii* como matéria-prima para a produção de etanol 3G, resultando em uma proporção de 105 l de etanol por tonelada de algas marinhas secas. Roldán et al (2017) apresenta resultados que destacam a usabilidade dos diferentes carboidratos de *K. alvarezii* para a eventual produção de bioetanol. É mencionado que a produtividade média do bagaço de cana no Brasil é de 7,5 kg/m² ao ano e atinge a maturidade somente após um ano de cultivo, mas para *K. alvarezii* é de 18,3 kg/m² ao ano, sem intervalos produtivos, ressaltando que o processo produtivo pode ser carbono-negativo, ou seja, de quarta geração.

Ainda assim, apesar do Brasil apresentar um grande potencial para a produção de macroalgas, principalmente pelo tamanho de sua costa, clima, topografia, condições ambientais, grande mercado consumidor e podendo apresentar espécies com taxas de crescimento de 4 a 8% ao dia (PAULA et al., 1999; GELLI, 2019), os dados da produção nacional da FAO (2020) para o ano de 2016, apontaram somente 700 toneladas para a espécie fresca de *K. alvarezii*, sendo o estado do Rio de Janeiro o maior produtor.

Para tentar melhorar o aproveitamento destas commodities de grande flexibilidade econômica, um passo importante é determinar a extensão espacial da costa adequada à produção potencial de algas. A sugestão de novas áreas para cultivo de macroalgas no Brasil pressupõe o

cruzamento dessas variáveis, sendo estas, diversas vezes, únicas e específicas para cada situação/espécie analisada. Assim, é importante que se selecione adequadamente as variáveis de entrada de um modelo teórico.

Neste contexto, o presente estudo busca identificar a área apta da costa brasileira à produção de macroalgas da espécie *Kappaphycus alvarezii* voltado à cadeia do bioetanol, assim como fomentar a discussão de políticas públicas voltadas à expansão legal da área cultivável de macroalgas no litoral nacional e incentivar a instalação de novos projetos de maricultura.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi organizado em duas etapas com distintas atividades: Etapa 1 - Identificação de locais aptos para a algicultura de *Kappaphycus alvarezii* para relacionando à cadeia de bioetanol e; Etapa 2 - Estimativa da captura de carbono e potencial produtivo de bioetanol de algas na costa brasileira. A Etapa 1 envolveu duas atividades, e a inserção desses critérios no programa ArcGIS 10,5 e o QGIS 3.16, softwares de SIG capazes de realizar os cálculos geoespaciais e análises espaciais necessárias.

Um dos primeiros critérios utilizados foi a identificação das práticas e locais de cultivo de *K. Alvarezii*, as quais variam de acordo com a cultura e condições ambientais locais. Diversos autores (HURTADO & AGBAYANI, 2002; PEREIRA, 2008; HAYASHI et al., 2010; GELLI & BARBIERI, 2015; RADIARTA & ERLANI, 2016; KUMAR et al., 2016; MANTRI et al., 2017; GELLI 2019; FAO, 2020) ressaltam que a seleção do local é muito importante, distando de fontes de água doce, como rios, riachos e áreas estuarinas, bem como de outras fontes de nutrientes ou resíduos industriais, e apresentar proteção de fortes marés ou ondas.

A partir da análise desta bibliografia foram construídos o arcabouço teórico e as considerações para a incorporação de cada fator na metodologia de análise proposta. Os fatores considerados e suas faixas aptas são descritos na sequência.

A distância da costa é um fator relacionado a algumas variáveis relativas ao posicionamento dos cultivos, incluindo a intensidade da energia mecânica do mar (local de arrebatamento, direção das correntes), assim como relativo à logística produtiva, influenciando nos equipamentos necessários para o deslocamento, combustível e embarque dos produtores. Neste contexto, buscou-se na literatura e em imagens de satélite (utilizado o programa Google Earth Pro) a maior distância da costa encontrada em diferentes cultivos de *K. alvarezii* no mundo, atividade resumida na *Tabela 2*.

Tabela 2: Análise da distância da costa de cultivos de *K. alvarezii* no mundo.

Localidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Referência ²
Baía de Gerupuk, Lombok central, Sonda Ocidental, Indonésia.	410 m	417 m			ERLANIA & RADIARTA 2014; RADIARTA & ERLANI, 2015, 2016
Baía de Malasoro, Sulawesi do Sul, Indonésia.	1560 m	1860 m	1150 m		SETYAWIDATI et al. 2017a, 2017b
Semporna, Sabah, Malásia.	289 m	725 m	1540 m	3390 m	KUMAR et al. 2020
Ilha Sibutu, Tawi-Tawi, Filipinas.	830 m	1190 m			Análise de imagem de satélite
Baía de Palk, entre a costa sudeste da Índia e o Sri Lanka.	432 m	240 m			PERIYASAMY et al. 2016
Baía de Cam Ranh, Khanh Hoa, Vietnã.	1927 m	1284 m	727 m		HUNG et al. 2009
Ilha Grande, RJ, Brasil.	62 m	30 m	41 m	150 m	Trabalho de campo
Baía Norte, SC, Brasil.	197 m				HAYASHI et al. 2010a
Baía da Marambaia, RJ, Brasil.	60 m				GÓES & REIS, 2011

Dada a incipiência da indústria brasileira, nossa grande extensão de costa e a maior facilidade logística de operação quanto menor o percurso de trabalho, foi considerada uma distância máxima de 2000 m da costa, compatível com a consideração de áreas abrigadas em baías, como as Baías da Guanabara e de Sepetiba (RJ), Norte e Sul (SC), todas com extensões lineares consideravelmente superiores a esta distância. Esta base foi proveniente da Agência Nacional de Águas, especificamente a representação linear da linha de costa (BHO 2017).

A literatura aponta que a temperatura é considerada um dos principais fatores abióticos que influenciam a taxa de crescimento diário, o qual é a base da aptidão à implantação dos cultivos da espécie em estudo. Paula et al. (2002) apresentaram dados de taxas de crescimento de *Kappaphycus alvarezii* entre 3,6 a 8,9% ao dia, correlacionados principalmente com a temperatura da água do mar. Ainda, Bulboa e Paula (2005) concluíram que a temperatura é um fator chave no controle das taxas de crescimento de *Kappaphycus alvarezii* e que a mesma não é capaz de se desenvolver em temperaturas abaixo de 18°C por um período maior que quatro semanas.

Gelli (2019) adotou em seu trabalho como faixa ótima de temperatura para o crescimento da macroalga *K. alvarezii* de 20 a 30 °C. Setyawidati et al. (2017) apontou que temperatura média mensal variou de 25 °C a 30 °C. Kumar et al. (2016) apresentou valores de temperatura médios de 26,51 °C. Orbita et al. (2013) apresentaram temperaturas da água nas áreas de cultivo entre 25 °C a 31 °C. Kumar et al. (2020) aponta melhores desempenhos de *K. alvarezii* a 27–30°C, com relatos de enfraquecimento acima de 33°C e baixa sobrevivência a aumentos repentinos de temperatura acima de 36°C. No presente trabalho, a área considerada apta foi a com temperatura mínima anual mensal de 18 °C. Foram utilizados os dados do sensor

² Os trabalhos com * apresentam distância da costa mencionadas pelos autores, não aferidas por imagem.

MODIS-AQUA, especificamente a média mensal climatológica entre 04/07/2002 a 03/11/2020 (NASA, 2021).

A salinidade aparece como um fator importante para a sobrevivência de cultivos de *K. alvarezii* quando em extremos, principalmente em áreas costeiras com aporte de água doce de rios. Dentre as faixas de salinidade encontradas na literatura, podemos apontar os trabalhos de Hayashi et al. (2011b), que identificou que a macroalga não sobrevivia abaixo de 15 PSU após 3 dias, enquanto que a 55 PSU apresentaram baixas taxas de crescimento. Estes autores apontaram o intervalo de 25 a 45 PSU como limites adequados de salinidade. Orbita et al. (2013) identificou que as maiores produtividades da macroalga ocorriam em salinidades de 24‰ - 30‰. Gelli (2019) adotou como faixa ótima de salinidade de 25 a 45 o/oo para essa macroalga. Neste contexto de valores de salinidade, adotou-se como faixa de operação 25 a 45 PSU. No entanto, como a resolução espacial não é elevada, de modo que não é possível captar a influência de deságue de rios de variados portes na salinidade da costa brasileira, de modo que foi incluído um buffer de 500 metros da foz de rios, devido a possível alteração da salinidade do ambiente de produção.

Para os dados de salinidade foram utilizados os produtos do JPL SMAP-SSS V5.0 CAP, nível 3, a salinidade da superfície do mar mapeada mensalmente (SSS) do observatório NASA Soil Moisture Active Passive (SMAP). Os produtos são globais em extensão e quadriculados a 0,25 graus x 0,25 graus com uma resolução espacial aproximada de 60 km (JPL, 2020).

A partir do resultado da metodologia sobre os fatores hidrológico-ambientais, buscou-se adequar os resultados à realidade da costa brasileira. Áreas que a priori apresentam incompatibilidades legais e de uso com cultivos de maricultura de algas foram excluídos do resultado final. Apesar de existir a possibilidade de atividades produtivas de baixo impacto em unidades de Uso Sustentável segundo o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (Lei nº 9985, de 18 e julho de 2000), como a *K. alvarezii* apresenta relatos de comportamento de espécie invasora, foram consideradas como inadequadas todas as Unidades de Conservação marinhas, a partir da base de dados do ICMBio de junho de 2020.

Também foi considerado o trabalho e recomendações de Castelar et al. (2015) que considerou uma zona tampão para proteger recifes de coral, igualmente adotada neste trabalho. Foi utilizado o conjunto de dados de grade generalizada das localizações de recifes mundiais (IMARS/USF, IRD, UNEP-WCMC, THE WORLDFISH CENTER AND WRI, 2011). A partir desses dados, foi gerado um buffer de 20 km de distância no ArcGIS, área considerada não apta para novas culturas de macroalga.

Por fim, é necessário atentar à Instrução Normativa IBAMA N° 185, de 22 de julho de 2008. Esta IN, voltada especificamente para o cultivo da alga em questão, estabelece a delimitação permitida do cultivo, exclusivamente, na área compreendida entre a Baía de Sepetiba (RJ) e a Ilha Bela (SP),

Para a Etapa 2 se realizou o cálculo potencial da produção de novos cultivos de *K. alvarezii* e sequestro de CO₂ associado. Essa estimativa utilizará a metodologia adotada no trabalho de SONDAK et al. (2017). Especificamente para *Kappaphycus*, o teor de carbono percentual no peso seco está entre 20.73±1.73% segundo Widowati et al. 2012, ou de 1,6-1,8 % da alga fresca. Róldan (2017) apresentou valores próximos a 34% de carbono no peso seco.

Consideramos uma produtividade por hectare de 150 toneladas ao ano, com uma razão de 10 % entre alga fresca e alga seca, ou seja, 15 toneladas ao ano de alga seca por hectare cultivado. Esta alga fresca apresenta um percentual de carbono médio de 1,7%, ou seja, 2,55 toneladas de carbono fixadas anualmente por hectare. Para a conversão em toneladas de CO₂ foi utilizado o fator de 3,67, o que leva a um sequestro de carbono anual de 9,36 toneladas por hectare cultivado de *K. alvarezii*.

Cálculo da produção de bioetanol e potencial de geração de créditos de carbono

Após verificar diferentes rotas processuais (MEINITA et al. 2011; ROLDÀN et al., 2017), foi escolhido os resultados de Hargreaves et al. (2013), com 105 l de etanol por tonelada seca de *K. alvarezii* (1.575 litros por hectare ao ano), ou de 61 l de etanol por tonelada desta macroalga somente através da rota de sacarificação e fermentação da fração celulósica (915 litros por hectare ao ano), permitindo outros usos para a fração líquida.

Em relação aos créditos de carbono, o valor da tonelada emitida de carbono equivalente comercializados por empresas em mercados internacionais distintos varia de menos de US\$ 1 a 906 por tCO₂e (WBG, 2020), de modo que neste trabalho adotou-se US\$ 10 /tCO₂e (similar a Sondak et al., 2016), chegando a US\$ 93,60 ou R\$ 509,18 por hectare de *K. alvarezii* plantado.

Como o processo de certificação envolve custos elevados com consultoria, inviabilizando pequenos produtores a aderirem às certificações de emissões, uma boa alternativa pode ser o cadastro no RenovaBio, buscando a venda para os produtores de combustíveis fósseis internos. Dado o preço médio de CBIOS em 2020 de R\$ 43,66 (MME, 2021), o total esperado de créditos de carbono da plantação de 1 hectare *K. alvarezii* chega a R\$ 408,66.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A costa brasileira, que, segundo o IBGE (2019) alcança 10.959 km de extensão, apresenta dentro do buffer de 2 quilômetros, uma área de 2.914.344 hectares. Após a consideração das restrições levantadas no trabalho, incluindo a temperatura mínima inferior a 18 °C, as unidades de conservação, a presença de corais, a salinidade inferior a 25 PSU e o buffer de 500m dos rios, foi encontrado uma área apta a novos cultivos de *K. alvarezii* de 762.430 hectares, ou seja, pouco mais de 26% da área total.

A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam total de áreas aptas à novos cultivos de *K. alvarezii* e as áreas por tipologia de restrição consideradas no presente trabalho para a costa brasileira. O destaque para a região permitida pela Instrução Normativa nº185 do Ibama considera uma distância mínima da costa de 200m como um todo, uma vez que não se tem as informações georreferenciadas de extensões de praias e costões rochosos, atendendo assim ao afastamento mínimo mais restritivo do artigo 7º da norma em questão. A Figura 1 apresenta o mapa deste resultado.

Tabela 3: Extensão das áreas aptas a novos cultivos de K. alvarezii na costa brasileira.

Áreas	Hectares	Percentual
Área da Costa até 2 km	2.914.344	100%
Área da costa até 2 km apta a novos cultivos	762.430	26,16%
Área legalmente apta pela IN 185	129.231	4,43%

Tabela 4: Extensão das restrições a novos cultivos de K. alvarezii na costa brasileira.

Restrições (áreas de exclusão)*	Hectares	Percentual
Salinidade < 25 PSU	799.142	27,42%
Foz de Rios (500m)	66.413	2,28%
Unidades de Conservação e Corais	1.252.593	42,98%
Temperatura mínima da superfície da água < 18 °C	552.235	18,95%

*Os: existem superposições de restrições em diversos locais.



Figura 1: Áreas de restrição e apta a novos cultivos de *K. alvarezii* na costa brasileira.

A partir destes resultados são apresentados na *Tabela 5* os valores para o uso de 5% da área apta e da área permitida pela IN IBAMA n° 185, não somente para respeitar a legislação, mas também compreendendo as incompatibilidades locais com outros usos da costa e outras restrições, como outras áreas marinhas já demarcadas, parques aquícolas, áreas portuárias, lançamentos de esgoto e conflitos com fundeadouros de embarcações, marinas, áreas de navegação marítima, pontos de colocação de redes de espera, locais de arrasto pesqueiro e pontos de instalação de cercos flutuantes.

Tabela 5: Produtividade, litros de álcool e créditos de carbono dos cultivos potenciais de K. alvarezii na costa brasileira.

	Produtividade de algas secas (ton/ano)	CO ₂ sequestrado (ton/ano)	Etanol total (litros/ano)	Créditos de carbono possíveis (US\$/ano)	CRBIOs (R\$/ano)
Área apta	571.822,5	356.817,2	60.041.362,5	\$ 3.568.172,40	R\$ 15.578.640,70
Area permitida pela IN IBAMA n° 185	96.923,3	60.480,1	10.176.941,3	\$ 604.801,08	R\$ 2.640.561,52

O total de etanol (60.041.362,5 l) potencialmente produzido a partir de novos cultivos de *K. Alvarezii* é baixo (0,2%) quando comparado ao produzido pela safra de 2015/2016, de 30.000.000.000 l (CONAB, 2018). No entanto, comparado a produção do nordeste brasileiro (879.214.200 l) perfaz 6,8% do total, e supera a produção do Rio de Janeiro (58.656.600 l), se demonstrando uma alternativa interessante à importação e gastos com transporte.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir desta pesquisa, pode-se concluir que a análise espacial pode ser empregada para definir a área potencial para o cultivo de algas marinhas. O cultivo existente é incipiente, com menos de 700 ton de algas frescas anuais (FAO, 2020), mas podendo chegar a 5.718.225 ton, sequestrando 356.817,2 ton de CO₂ e gerando 60.041.362,5 l de etanol ao ano. Em termos de valor econômico, o valor total do etanol vendido pode chegar a R\$ 107.774.245,69 (R\$1,795/l na produção – ANP 2020), com um adicional de 15,5 milhões em CBIOS. A produção estimada de bioetanol a partir de *K. Alvarezii* pode contribuir para alavancar o mercado de CBIOS, contribuindo para o atendimento da NDC brasileira, ainda que preços do carbono estejam muito abaixo do necessário para atender as metas do Acordo de Paris. Menos de 5 % das emissões de GEE estão precificadas na faixa adequada das metas em 2020 (WBG, 2020), sendo necessário uma precificação mais adequada das emissões/captura de carbono para mitigar as mudanças climáticas.

Neste âmbito, mais iniciativas como o RenovaBio precisam ser estimuladas, e que apresentem valores de carbono adequados à mitigação demandada pelo aquecimento global, ao fomento de tecnologias sustentáveis e efetivamente permita a transição para uma matriz energética e sociedade neutra em carbono, almejando, no futuro, sequestrar o carbono antrópico já emitido. Ainda existem diversas sinergias do aumento do cultivo nacional de macroalgas para outros setores não-bioenergéticos, como a indústria de cosméticos, indústria alimentar e setor agropecuário, inclusive com o aumento da descarbonização de diversas cadeias produtivas a partir da adoção de produtos substitutos de baixa pegada de carbono e menor importação de fertilizantes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis através do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP nº 41.

REFERÊNCIAS

- ANP. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2020. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. - Rio de Janeiro: ANP, 2008- . 2020.
- MME/EPE. **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia** Rio de Janeiro. Empresa de Pesquisa Energética, 2016.
- DE SOUZA, DANIELA TATIANE; LAVIOLA, BRUNO GALVÊAS; SANTOS, GILMAR SOUZA; CAPDEVILLE, GUY DE; ESQUIAGOLA, MARCIA MITIKO ONOYAMA; JÚNIOR, MANOEL TEIXEIRA SOUZA. Cenários sobre contribuição do biodiesel para ampliar a participação de biocombustíveis na matriz energética brasileira em 2030. – Brasília, DF : **Embrapa Agroenergia**, 2017.
- ADAMS MJ, GALLAGHER JA, DONNISON IS. Fermentation study on *Saccharina latissima* for bioethanol production considering variable pre-treatments. **J Appl Phycol** 21:569–574. 2009.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R. F. & EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 7ª edição. Editora Guanabara/Koogan Rio de Janeiro. 2007.
- HAYASHI, L., SANTOS, A. A., FARIA, G. S. M., NUNES, B. G., SOUZA, M. S., FONSECA, A. L. D., ... BOUZON, Z. L... *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Areschougiaceae) cultivated in subtropical waters in Southern Brazil. **Journal of Applied Phycology**, 23(3), 337–343. .2010a. doi:10.1007/s10811-010-9543-5
- MONDAL D, SHARMA M, MAITI P, PRASAD K, MEENA M, SIDDHANTA AK, BHATT P, IJARDAR S, MOHANDAS VP, GHOSH A, ESWARAN K, SHAH BG, GHOSH PK. Fuel intermediates, agricultural nutrients and pure water from *Kappaphycus alvarezii* seaweed. **RSC Adv** 3:17989–17997 2013.
- ORBITA, M.L.S., 2013. Growth rate and carrageenan yield of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Gigartinales) cultivated in Kolambugan, Lanao del Norte, Mindanao, Philippines. **AAB Bioflux** 5 (3), 128–139.
- MEINITA, M.D.N., KANG, J., JEONG, G. *et al.* Bioethanol production from the acid hydrolysate of the carrageenophyte *Kappaphycus alvarezii* (cottonii). **J Appl Phycol** 24, 857–862 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9705-0>
- GELLI, V. C.; BARBIERI, E. Cultivo e aproveitamento da macroalga *Kappaphycus alvarezii* para pequenos maricultores. In: EDITORES, P. & J. (Ed.). **Aquicultura no Brasil: Novas Perspectivas**. 2p. 641–658. 2015.
- HARGREAVES, P.L, BARCELOS, C.A. COSTA, A.C.A. PEREIRA Jr., N. Production of ethanol 3G from *Kappaphycus alvarezii*: evaluation of different process strategies, **Bioresour. Technol**. 143, 257–263. 2013.
- ROLDÁN, I. U. M. et al. Chemical, structural, and ultrastructural analysis of waste from the carrageenan and sugar-bioethanol processes for future bioenergy generation. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 233–243, dez. 2017.
- PAULA, E. J. J. de et al. Strain selection in *Kappaphycus alvarezii* var. *alvarezii* (Solieriaceae, Rhodophyta) using tetraspore progeny. **Journal of Applied Phycology**, v. 11, n. 1, p. 111–121, 1999. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1023/A:1008085614360>>.

- PEREIRA, R. (2008). *Mass Production of Marine Macroalgae*. In: Jørgensen, Sven Erik & Fath, Brian D. **Encyclopedia of Ecology**. Elsevier, 2236–2247. doi:10.1016/B978-008045405-4.00066-5
- FAO. 2020. FIGIS - Fisheries Statistics - Aquaculture - Global Aquaculture Production 1950-2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/fishery/statistics/global-aquaculture-production/query/en>>. Acesso em out/2020
- HURTADO, A. Q. & AGBAYANI, R. F. Deep-Sea Farming of *Kappaphycus* Using the Multiple Raft, Long-Line Method. **Botanica Marina** Vol. 45, 2002, pp. 438–444
- KUMAR, K. SURESH; GANESAN, K.; SUBBA RAO, P. V.; THAKUR, M. C. Seasonal studies on field cultivation of *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty on the northwest coast of India. **Journal of Applied Phycology**, 28(2), 1193–1205. 2016. doi:10.1007/s10811-015-0629-y
- KUMAR YN, POONG S-W, GACHON C, BRODIE J, SADE A, LIM P-E. Impact of elevated temperature on the physiological and biochemical responses of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta). **PLoS ONE** 15(9): e0239097. 2020.
- MANTRI, VAIBHAV A.; ESWARAN, K.; SHANMUGAM, M.; GANESAN, M.; VEERAGURUNATHAN, V.; THIRUPATHI, S.; REDDY, C.R.K.; SETH, ABHIRAM . An appraisal on commercial farming of *Kappaphycus alvarezii* in India: success in diversification of livelihood and prospects. **Journal of Applied Phycology**, 29(1), 335–357. 2017. doi:10.1007/s10811-016-0948-7
- BULBOA, C. R.; DE PAULA, E. J. Introduction of non-native species of *Kappaphycus* (Rhodophyta, Gigartinales) in subtropical waters: Comparative analysis of growth rates of *Kappaphycus alvarezii* and *Kappaphycus striatum* in vitro and in the sea in south-eastern Brazil. **Phycological Research**, v. 53, n. 3, p. 183–188, 1 set. 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1440-183.2005.00385.x>>.
- NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, OCEAN ECOLOGY LABORATORY, OCEAN BIOLOGY PROCESSING GROUP. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua {Dataset Name} Data; NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. 2021. Site: <<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/aqua/>> Accessed on 10/04/2021.
- JPL. JPL CAP SMAP Sea Surface Salinity Products. Ver. 5.0. **PO.DAAC**, CA, USA. 2020. Dataset accessed [2021-04-07] at <https://doi.org/10.5067/SMP50-3TMCS>
- WORLD BANK GROUP - WBG. State and trends of carbon pricing 2020. The World Bank, Washington DC, May 2020
- MME. Balanço do primeiro ano do RenovaBio. 2021. Acesso em 25/04/2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1/balanco-do-primeiro-ano-do-renovabio>>
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. 3 - Terceiro Levantamento. Brasília: CONAB, p. 16. dez. 2018.
- GELLI, V. C. **Desenvolvimento ordenado e potencial da produção da macroalga *Kappaphycus alvarezii* no estado de São Paulo para extração de biofertilizante**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, SP. 111 pp. 2019.
- SONDAK, C. F. A.; ANG JR., P. O.; BEARDALL, J. et al. Carbon dioxide mitigation potential of seaweed aquaculture beds (SABs). *J Appl Phycol* DOI 10.1007/s10811-016-1022-1
- INSTRUÇÃO NORMATIVA IBAMA. Nº 185, DE 22 DE JULHO DE 2008.
- INSTITUTE FOR MARINE REMOTE SENSING, UNIVERSITY OF SOUTH FLORIDA (IMARS/USF), INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT (IRD), UNEP-WCMC, THE WORLD FISH CENTER, AND WRI. **Global Coral Reefs composite dataset compiled from multiple sources for use in the Reefs at Risk Revisited project incorporating products from the Millennium Coral Reef Mapping Project prepared by IMaRS/USF and IRD**. 2011.