REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

PIGMENTOS E AMINOÁCIDOS TIPO MICOSPORINAS PRESENTES NA MACROALGA *KAPPAPHYCUS ALVAREZII*: UMA FONTE DE INTERESSE BIOTECNOLÓGICO

PIGMENTS AND MYCOSPORIN-LIKE AMINO ACIDS PRESENT IN THE MACROALGA KAPPAPHYCUS ALVAREZII: A SOURCE OF BIOTECHNOLOGICAL INTEREST

PIGMENTOS Y AMINOÁCIDOS SIMILARES A LA MICOSPORINA PRESENTES EN LA MACROALGA KAPPAPHYCUS ALVAREZII: UNA FUENTE DE INTERÉS BIOTECNOLÓGICO

Isabella Feijão de Araujo[1], Aline Nunes[2], Lohan Rodrigues Brandão Santos[3], Alex Ricardo Schneider[4], Giuseppina Pace Pereira Lima[5], Marcelo Maraschin[6]

e6127041
https://doi.org/10.47820/recima21.v6i12.7041

PUBLICADO: 12/2025

RESUMO

Pigmentos e aminoácidos tipo micosporinas (MAAs) extraídos de macroalgas possuem ampla aplicação industrial em setores como cosméticos, alimentos e farmacêuticos. Esses compostos apresentam atividades biológicas relevantes, como propriedades antioxidantes, colorantes e fotoprotetoras. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar os pigmentos (clorofilas, ficobiliproteínas e carotenoides) e os MAAs da macroalga *Kappaphycus alvarezii*, cultivada em Florianópolis, Santa Catarina, avaliando a influência de genótipos (linhagens verde e vermelha) coletados ao longo das estações do ano. Os teores de clorofilas, ficobiliproteínas, carotenoides e MAAs foram determinados por espectrofotometria ultravioleta e visível (UV-vis). Os dados foram submetidos ao teste de Scott-Knott e à análise de componentes principais (PCA). De maneira geral, os resultados indicaram variações significativas nas concentrações dos pigmentos, especialmente em relação às estações do ano, em comparação com as linhagens algais. Observou-se que o outono e a primavera, para ambas as linhagens, foram agrupados na PCA, indicando que essas estações exercem uma influência positiva no conteúdo de pigmentos. Quanto aos MAAs, os teores mais elevados foram observados durante o cultivo na primavera e no verão, para ambas as linhagens. Entre as linhagens, observou-se que a maior distinção ocorreu nas ficobiliproteínas. A ficoeritrina destacou-se na linhagem vermelha, enquanto a linhagem verde apresentou concentrações mais elevadas de ficocianina e aloficocianina. Os resultados revelam o impacto dos fatores climáticos sobre o metabolismo dos pigmentos e dos MAAs de *K. alvarezii*, sugerindo que a produção desses compostos pode ser otimizada em função da sazonalidade e, em alguns casos, da linhagem.

PALAVRAS-CHAVE: Sazonalidade. Clorofila. Ficobiliproteínas.

ABSTRACT

Pigments and mycosporine-like amino acids (MAAs) extracted from macroalgae have broad industrial applications in sectors such as cosmetics, food, and pharmaceuticals. These compounds

[1] Estudante de graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
[2] Doutora em Biotecnologia e Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, São Paulo, Brasil.
[3] Estudante de graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
[4] Doutor em Biotecnologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
[5] Doutora em Ciências Biológicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, São Paulo, Brasil.
[6] Doutor em Bioquímica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

exhibit relevant biological activities, such as antioxidant, coloring, and photoprotective properties. In this context, this study aimed to characterize the pigments (chlorophylls, phycobiliproteins, and carotenoids) and MAAs of the macroalga Kappaphycus alvarezii, cultivated in Florianópolis, Santa Catarina, evaluating the influence of genotypes (green and red strains) collected throughout the seasons of the year. The levels of chlorophylls, phycobiliproteins, carotenoids, and MAAs were determined using ultraviolet and visible spectrophotometry (UV-vis). The data were subjected to the Scott-Knott test and principal component analysis (PCA). Overall, the results indicated significant variations in pigment concentrations, especially concerning the seasons of the year, compared to the algal strains. It was observed that autumn and spring, for both strains, were clustered in the PCA, indicating that these seasons positively influence pigment content. For MAAs, higher levels were observed during cultivation in spring and summer for both strains. Among the strains, it was observed that the greatest distinction occurred in the phycobiliproteins. Phycoerythrin stood out in the red strain, while the green strain showed higher concentrations of phycocyanin and allophycocyanin. The results reveal the impact of climatic factors on the metabolism of pigments and MAAs in K. alvarezi,i suggesting that the production of these compounds can be optimized according to seasonality and, in some cases, strain.

KEYWORDS: *Seasonality. Chlorophyll. Phycobiliproteins.*

RESUMEN
Los pigmentos y aminoácidos tipo micosporinas (MAAs) extraídos de macroalgas tienen amplias aplicaciones industriales en sectores como cosméticos, alimentos, y farmacéuticos. Estos compuestos presentan actividades biológicas relevantes, como propiedades antioxidantes, colorantes y fotoprotectoras. En este contexto, este estudio tuvo como objetivo caracterizar los pigmentos (clorofilas, ficobiliproteínas y carotenoides) y los MAAs de la macroalga Kappaphycus alvarezii, cultivada en Florianópolis, Santa Catarina, evaluando la influencia de genotipos (linajes verde y rojo) recolectados a lo largo de las estaciones del año. Los contenidos de clorofilas, ficobiliproteínas, carotenoides y MAAs se determinaron mediante espectrofotometría ultravioleta y visible. Los datos se sometieron a la prueba de Scott-Knott y al análisis de componentes principales (PCA). En general, los resultados indicaron variaciones significativas en las concentraciones de pigmentos, especialmente en relación con las estaciones del año, en comparación con los linajes algales. Se observó que el otoño y la primavera, para ambos linajes, se agruparon en la PCA, indicando que estas estaciones ejercen una influencia positiva en el contenido de pigmentos. Los MAAs presentaron mayores niveles durante el cultivo en primavera y verano. Entre los linajes, se notó la mayor distinción en las ficobiliproteínas, destacando la ficoeritrina en el linaje rojo, mientras que el linaje verde mostró concentraciones más altas de ficocianina y aloficocianina. Los resultados revelan el impacto de los factores climáticos en el metabolismo de los pigmentos y los MAA en K. alvarezii, lo que sugiere que la producción de estos compuestos se puede optimizar según la estacionalidad y, en algunos casos, la cepa.

PALABRAS CLAVE*: Estacionalidad. Clorofila. Ficobiliproteínas.*

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de algas desempenha um papel significativo no comércio global, devido à vasta gama de atividades biológicas de seus metabólitos, tais como antioxidantes, anti-inflamatória, antitumoral, antiviral, antidiabética e para tratamento de doenças neurodegenerativas (Shafay *et al.,* 2022). Sua utilização tem avançado nas áreas farmacêutica, alimentícia, ambiental e cosmética (Shafay *et al.,* 2022; Farghali *et al.,* 2023). De acordo com o *The Global Seaweed*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Emerging Markets Report de 2023, estima-se que em 2030 o mercado global de algas marinhas terá o potencial de atingir US$11,8 bilhões (World Bank, 2023).

Dentre as diversas macroalgas cultivadas no mundo encontram-se espécies pertencentes aos grupos *Chlorophyta* (algas verdes), *Ochrophyta* (algas pardas) e *Rhodophyta* (algas vermelhas). As algas vermelhas se destacam devido à sua ampla diversidade de *habitats* e à grande quantidade de espécies que as compõem, i.e., totalizam 7.346 espécies em seu filo (Khatri *et al.,* 2023). Este filo não apenas chama a atenção pela diversidade biológica, mas também pela presença de compostos bioativos e pigmentos de importância à indústria (Khatri *et al.,* 2023), sendo, portanto, uma fonte significativa de inovação.

Entre as algas vermelhas, *Kappaphycus alvarezii* se destaca como uma espécie de grande valor econômico, sendo a principal fonte de k-carragenana, um polissacarídeo amplamente utilizado nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética (Rudke; Andrade; Ferreira, 2020). Além da carragenina, essa alga é rica em pigmentos como clorofilas, ficobiliproteínas e carotenoides, além de conter aminoácidos tipo micosporinas (MAAs), que desempenham um papel importante como fotoprotetores (Kumar *et al.,* 2020; Rajaram *et al.,* 2021; Das *et al.,* 2023). Entretanto, é importante ressaltar que a composição bioquímica da *K. alvarezii* pode variar conforme os métodos de cultivo, as condições ambientais e as linhagens (Kumar; Kumari; Rao, 2022).

Os pigmentos extraídos de algas têm ampla aplicação na indústria, com diversas utilizações biotecnológicas (Freitas *et al.,* 2021; Nunes *et al.,* 2025a). As clorofilas, por exemplo, são conhecidas por suas propriedades antioxidantes e antimutagênicas, podendo contribuir à redução do risco de desenvolvimento de câncer. Além disso, são vistas como uma alternativa viável à substituição de pigmentos sintéticos na indústria alimentícia (Biris-Dorhoi *et al.,* 2020). As ficobiliproteínas proporcionam diversos benefícios à saúde, atuando como potentes antioxidantes e demonstrando efeitos terapêuticos e nutracêuticos significativos. Elas são neuroprotetoras, antibacterianas, antialérgicas, antitumorais, anti-Alzheimer, hepatoprotetoras, imunomoduladoras e agentes redutores de colesterol (Freitas *et al.,* 2021).

De maneira semelhante, os carotenoides são valorizados por seu valor nutricional, atuando como antioxidantes que melhoram a saúde da pele contra os raios UV, fortalecem as defesas imunológicas e contribuem à prevenção de várias doenças crônicas, além de impactarem positivamente a saúde mental e metabólica. Esses tetraterpenoides conferem cor, odor e sabor a determinados alimentos (Freitas *et al.,* 2021). Por fim, as MAAs possuem grande potencial como produtos de fotoproteção, devido à sua capacidade de absorver luz nas faixas UV-A (320-400 nm) e UV-B (280-320 nm) sem gerar radicais livres, tornando-as eficazes na prevenção de danos ao tecido cutâneo causados pela exposição solar excessiva. Esses compostos também apresentam propriedades cicatrizantes, são eficazes contra o fotoenvelhecimento da pele, estimulam a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

proliferação celular e possuem potencial anti-inflamatório, tornando-os interessantes não apenas como fotoprotetores, mas também para o tratamento de diversas condições dermatológicas (Punchakara *et al.,* 2023).

Dada a relevância dos pigmentos e dos MAAs extraídos de *K. alvarezii*, bem como as variações em suas concentrações que podem ser influenciadas por fatores climáticos, este estudo teve como objetivo determinar as concentrações de clorofilas, ficobiliproteínas, carotenoides e MAAs em amostras dessa macroalga cultivada em Florianópolis, no estado de Santa Catarina, Sul do Brasil. Esta pesquisa é justificada pelo cultivo comercial recentemente autorizado no litoral catarinense pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) em 2020 (Brasil, 2020).

2. MÉTODO

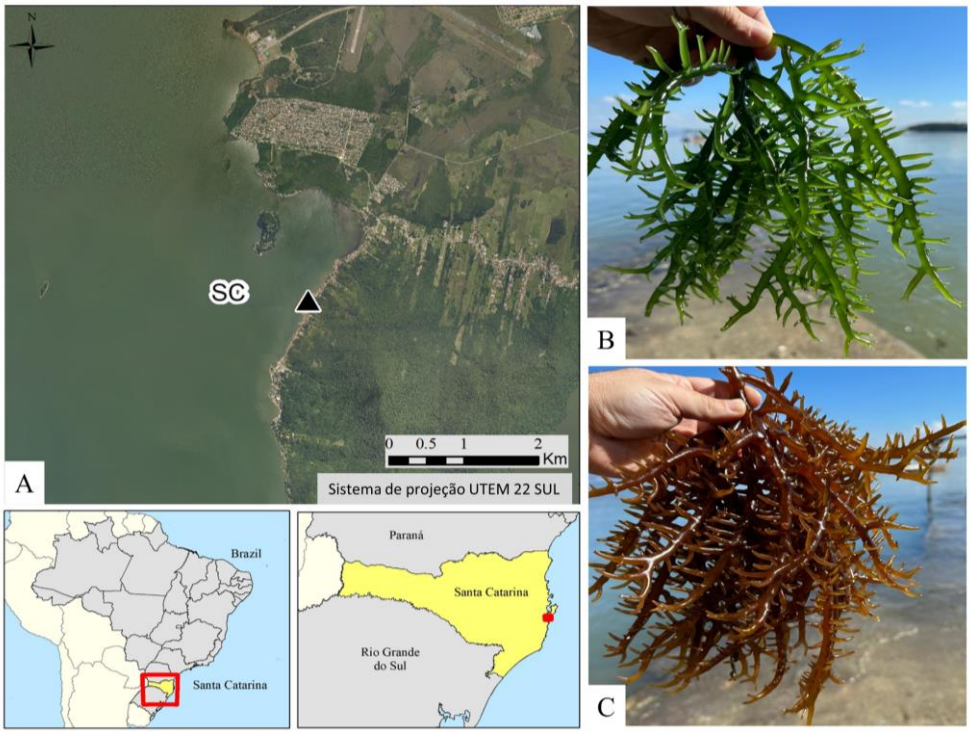
2.1. Coleta e preparo das amostras

As amostras de biomassas das linhagens verde e vermelha de *K. alvarezii* (Figuras 1B, 1C), foram coletadas sazonalmente (outono, inverno, primavera e verão) em uma fazenda marinha localizada em Florianópolis (27° 42' 32.724" S, 48° 33' 35.5" W – Figura 1A), no estado de Santa Catarina, Sul do Brasil. No total, oito amostras foram coletas ao longo do estudo, sendo uma amostra de cada linhagem por estação.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 1. Localização do sítio de coleta das amostras de linhagens verde (B) e vermelha (C) de *Kappaphycus alvarezii* em Florianópolis (A), Sul do Brasil



Fonte: Adaptado de Nunes *et al.* (2025b)

Após o recebimento das amostras, estas foram lavadas em água corrente e, em seguida, secas em liofilizador (vácuo de 0,040 mbar, câmara de condensação à −50 °C) por aproximadamente 40h, até peso constante. Todo o processo foi realizado em ambiente na ausência de luz para evitar a degradação dos pigmentos. As amostras foram armazenadas à -80 °C até a realização das análises, sendo maceradas em nitrogênio líquido antes de cada procedimento.

2.2. Análise de clorofilas

Para a análise de clorofilas, utilizou-se o protocolo adaptado de Osório et al. (2020). Para isso, 160 mg de alga foram transferidos para tubo Falcon de 15 mL em triplicata (n = 3). Em seguida, adicionaram-se 6,4 mL de etanol a 99% (v/v) e a mistura foi homogeneizada em vórtex. Após a homogeneização, o material foi centrifugado (4.000 rpm, 15 min, 4°C) e o sobrenadante coletado à análise do conteúdo de clorofilas. As absorbâncias (λ = 632 nm, 649 nm, 665 nm, 696 nm e 750 nm) foram registradas em um leitor de microplacas (ThermoPlate®, modelo P-reader) para a quantificação dos analitos de interesse, conforme as equações 1, 2, 3, 4 e 5.

(1) Clo a (µg/mL) = 0,0604 x (A_{632} - A_{750}) - 4,5224 x (A_{649} - A_{750}) + 13,2969 x (A_{665} - A_{750}) - 1,7453 x (A_{696} - A_{750})

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

(2) Clo b (µg/mL) = - 4,1982 x (A_{632} - A_{750}) + 25,7205 x (A_{649}- A_{750}) - 7,4096 x (A_{665} - A_{750}) - 2,7418 x (A_{696} - A_{750})

(3) Clo c (µg/mL) = 28,4593 x (A_{632} - A_{750}) - 9,9944 x (A_{649} - A_{750}) - 1,9344 x (A_{665} - A_{750}) - 1,8093 x (A_{696} - A_{750})

(4) Clo d (µg/mL) = -0,2007 x (A_{632} - A_{750}) + 0,0848 x (A_{649} - A_{750}) - 0,1909 x (A_{665} - A_{750}) + 12,1302 x (A_{696} - A_{750}).

(5) Clo total (µg/mL) = Cl a + Cl b + Cl c + Cl d

2.3. Análise de ficobiliproteínas

A metodologia adaptada de Kursar, van der Meer e Alberte (1983) foi utilizada à determinação do conteúdo de ficobiliproteínas nas bioamostras. Uma alíquota de biomassa (160 mg) foi transferida para tubo Falcon de 15 mL, em triplicata (n = 3), seguido da adição de 6,4 mL de solução tampão fosfato e agitação em vórtex. As amostras foram incubadas por 3h em um homogeneizador digital de rotação (Satra – Agro-Bit®), ao abrigo de luz. Após esse período, as amostras foram centrifugadas (4.000 rpm, 10 min, 4°C) e 300 µL do sobrenadante foram transferidos para microplacas de 96 poços. A leitura das absorbâncias foi realizada em leitor ThermoPlate® (modelo P-reader), nos comprimentos de ondas de 498 nm, 614 nm e 651 nm para o cálculo dos pigmentos de interesse, utilizando as equações 6, 7, 8 e 9.

(6) Aloficocianina (APC): 181,3 x A_{651} - 22,3 x A_{614}

(7) Ficocianina (PC): 151,1 x A_{614} - 99,1 x A_{651}

(8) Ficoeretrina (PE): 155,8 x A_{498} - 40,0 x A_{614} - 10,5 x A_{651}

(9) Total: APC + PC + PE

2.4. Análise de carotenoides

Para a análise de carotenoides adaptou-se a metodologia de Aman *et al.* (2005). Inicialmente, 300 mg da amostra (n = 3) foram adicionados a 3 mL de metanol P.A. A mistura foi homogeneizada em vórtex e mantida ao abrigo de luz por 1h, à 24°C. Em seguida, as amostras foram centrifugadas (4.000 rpm, 10 min, 24°C) e uma alíquota de 300 µL do sobrenadante foi transferida para microplacas de 96 poços, seguido da leitura da absorbância (λ = 450 nm) em leitor de microplacas (ThermoPlate®, modelo P-reader). β-caroteno (Sigma-Aldrich, MO - USA) foi utilizado como padrão analítico à construção da curva de calibração externa, nas concentrações de 15,63 a 2000 µg/mL (y = 0,0007x, r^2 = 0,9316).

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

2.5. Análise de aminoácidos tipo micosporinas (MAAs)

Para a determinação do conteúdo de MAAs, foi estabelecido um protocolo baseado na análise por espectrofotometria de varredura UV-vis. Inicialmente, 300 mg da amostra foram dissolvidos em 10 mL de água destilada, seguido de agitação em um agitador magnético e centrifugação a 4.000 rpm durante 10 minutos a 24°C. Em seguida, 3 mL da amostra foram coletados em triplicata (n = 3) e transferidos para cubetas de quartzo para análise no espectrofotômetro UV-vis. Após a primeira leitura, uma segunda análise foi realizada. Nela, coletou-se 1 mL das amostras e adicionou-se 9 mL de água destilada, resultando em uma nova diluição para avaliação. As leituras de absorbância foram realizadas ao longo da faixa espectral de 200 a 800 nm, com resolução de 2 nm por ponto de dados. Por fim, os dados foram compilados e os resultados salvos em uma planilha eletrônica no formato .xlsx.

2.6. Análise de dados

O conjunto de dados gerado foi submetido ao teste de Scott & Knott ($p < 0,05$), considerando uma probabilidade de erro de 5% nas comparações de médias. Todos os dados foram analisados utilizando o *software* AgroEstat (v. 1.1.0.712). A análise de componentes principais (PCA, do inglês *Principal Component Analysis*) foi realizada por meio do algoritmo de decomposição em valores singulares (SVD). A PCA e os perfis espectrais UV-vis foram gerados com auxílio do The Unscrambler® X (v. 10.4).

3. RESULTADOS

A análise dos dados de conteúdo de clorofilas identificou diferenças estatísticas significativas resultantes dos efeitos dos fatores sazonalidade e genótipos, i.e., linhagens algais verde e vermelha (Tabela 1 e 2). Para a clorofila *a* teores superiores foram detectados na linhagem verde de *K. alvarezii* coletada durante a primavera e o outono, sem diferenças estatísticas entre estas estações, mas com distinções em relação ao verão e inverno. Na linhagem vermelha, observou-se um padrão semelhante, com o outono apresentando o maior conteúdo daquele pigmento, seguido pela primavera, havendo diferenças estatísticas de conteúdos em relação às demais estações. Entre as linhagens verde e vermelha, diferenças estatísticas foram notadas apenas nas estações de primavera e verão (Tabela 1).

Para a clorofila *b*, conteúdo superior ($p<0,05$) foi observado na amostra da linhagem verde coletada na primavera, diferenciando-se das demais estações. Resultado similar foi detectado quando os conteúdos daquele pigmento foram comparados entre as linhagens de *K. alvarezii*. No que tange à concentração de clorofila *c*, diferenças estatísticas somente foram observadas às amostras da linhagem verde ao longo das estações, com teores superiores na primavera e no

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

inverno. No entanto, os teores daquele pigmento não se mostram significativamente distintos entre as linhagens para nenhuma das estações investigadas (Tabela 1).

Tabela 1. Concentrações (µg/mL) de clorofilas *a*, *b* e *c* de amostras de biomassas das linhagens verde e vermelha de *Kappaphycus alvarezii* cultivada em Florianópolis-SC, Sul do Brasil, consoante às estações de coleta

Estação	Clorofila a		Clorofila b		Clorofila c	
	Verde	Vermelha	Verde	Vermelha	Verde	Vermelha
Primavera	4,64 ± 0,38 aA	3,51 ± 0,04 bB	0,16 ± 0,01 aA	0,10 ± 0,02 aB	0,10 ± 0,05 aA	0,08 ± 0,02 aA
Verão	1,01 ± 0,05 bA	0,62 ± 0,06 cB	0,01 ± 0,00 cA	0,01 ± 0,00 aA	0,02 ± 0,03 bA	0,01 ± 0,00 aA
Outono	5,03 ± 0,25 aA	4,57 ± 0,46 aA	0,05 ± 0,03 bA	0,06 ± 0,03 aA	0,01 ± 0,00 bA	0,01 ± 0,00 aA
Inverno	1,23 ± 1,35 bA	1,23 ± 1,36 cA	0,02 ± 0,04 bA	0,31 ± 0,47 aA	0,07 ± 0,08 aA	0,66 ± 1,01 aA

Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças estatísticas significativas (teste de Scott & Knott, $p < 0,05$). Letras minúsculas diferenciam médias entre as estações, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre linhagens dentro da mesma estação.

A concentração de clorofila *d* da linhagem verde destacou-se na amostra coletada no inverno, diferenciando-se ($p<0,05$) em relação às demais amostras. De modo contrário, para a linhagem vermelha, não foram detectadas diferenças estatísticas ao longo das estações, apesar de apresentar uma média superior no inverno, o que pode ser atribuído ao alto desvio padrão. Por fim, a linhagem verde apresentou maior concentração de clorofila *d* nas amostras coletadas na primavera em relação ao genótipo vermelho (Tabela 2).

No que diz respeito ao conteúdo total de clorofila, a linhagem verde apresentou teores superiores no outono e na primavera, diferindo em relação às demais estações. Para a linhagem vermelha, somente a amostra coletada no verão mostrou-se discrepante em seus conteúdos daqueles pigmentos. A análise comparativa entre as linhagens algais revelou diferença estatística somente às amostras coletadas na primavera e no verão, com conteúdo superior na linhagem verde. O incremento percentual final foi de 33% e 67% em relação à linhagem vermelha (Tabela 2).

Tabela 2. Concentrações (µg/mL) de clorofila *d* e total de amostras de biomassas das linhagens verde e vermelha de *Kappaphycus alvarezii* cultivada em Florianópolis -SC, Sul do Brasil, consoante às estações de coleta

Estação	Clorofila d		Clorofila total	
	Verde	Vermelha	Verde	Vermelha
Primavera	0,04 ± 0,01 bA	0,03 ± 0,01 aB	4,95 ± 0,42 aA	3,72 ± 0,03 aB
Verão	0,00 ± 0,00 bA	0,00 ± 0,00 aA	1,04 ± 0,03 bA	0,62 ± 0,05 bB
Outono	0,00 ± 0,00 bA	0,00 ± 0,00 aA	5,06 ± 0,28 aA	4,61 ± 0,43 aA
Inverno	1,23 ± 1,89 aA	1,37 ± 2,28 aA	1,37 ± 1,51 bA	2,60 ± 3,26 aA

Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas, conforme o teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). Letras minúsculas diferenciam-se entre as estações, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre linhagens dentro da mesma estação.

A análise das ficobiliproteínas revelou concentrações superiores de aloficocianina (APC) nas amostras de algas cultivadas na primavera e outono para a linhagem verde, enquanto maiores conteúdos foram detectados no inverno às amostras da linhagem vermelha. Adicionalmente, a linhagem verde apresentou conteúdos superiores daquele pigmento nas amostras coletadas na

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

primavera, verão e outono, enquanto a linhagem vermelha mostrou maior teor de APC no inverno (Tabela 3).

A ficocianina (PC) foi detectada em maior concentração na amostra de primavera da linhagem verde, diferenciando-se estatisticamente das demais estações. Para a linhagem vermelha, conteúdos mais elevados ($p<0,05$) foram registrados na primavera e no inverno. Assim como APC, a linhagem verde apresentou teores superiores na primavera, verão e outono, enquanto a linhagem vermelha diferenciou-se quanto à amostra coletada no inverno (Tabela 3).

Tabela 3. Conteúdos (µg/mL) de aloficocianina (APC) e ficocianina (PC) de amostras de biomassas das linhagens verde e vermelha de *Kappaphycus alvarezii* cultivada em Florianópolis (SC), Sul do Brasil

Estação	APC		PC	
	Verde	Vermelha	Verde	Vermelha
Primavera	9,29 ± 2,15 aA	5,67 ± 0,24 bB	6,68 ± 1,11 aA	3,57 ± 0,29 aB
Verão	3,73 ± 0,14 cA	0,60 ± 0,02 dB	1,80 ± 0,09 cA	0,46 ± 0,12 cB
Outono	8,30 ± 0,56 aA	4,02 ± 0,36 cB	2,87 ± 0,48 bA	1,76 ± 0,13 bB
Inverno	6,28 ± 0,25 bB	8,29 ± 1,84 aA	2,65 ± 0,34 bB	3,48 ± 0,72 aA

Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças estatísticas significativas, conforme o teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). Letras minúsculas diferenciam médias entre as estações, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre linhagens dentro da mesma estação.

A análise dos conteúdos de ficoeritrina (PE) detectou maiores teores nas amostras coletadas na primavera, outono e inverno à linhagem verde, diferenciando-se estatisticamente do verão. Por sua vez, a linhagem vermelha apresentou teores superiores nas biomassas colhidas na primavera, seguido pelo outono e inverno. Entre as linhagens, as amostras de biomassa vermelha apresentaram conteúdos superiores na primavera, outono e inverno, enquanto no verão a linhagem verde destacou-se (Tabela 4).

O conteúdo total de ficobiliproteínas (FT) mostrou-se superior na linhagem verde às amostras coletadas na primavera, seguido do outono e inverno. Para a linhagem vermelha, maiores médias foram observadas nas bioamostras de primavera e inverno, seguidas pelo outono. De interesse, ressalta-se que as amostras de verão apresentaram baixos teores para ambas as linhagens, com reduções de 65% e 85% em relação às maiores médias observadas: primavera (verde) e inverno (vermelha). Em relação às linhagens, os conteúdos de FT foram semelhantes na primavera, todavia, as linhagens diferiram quanto aos valores médios observados no inverno (linhagem verde, incremento de 117%) e outono e inverno (linhagem vermelha, incrementos de 15% e 62%, respectivamente) (Tabela 4).

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Tabela 4. Teores (µg/mL) de ficoeritrina (PE) e ficobiliproteína total (FT) de amostras de biomassas das linhagens verde e vermelha de *Kappaphycus alvarezii* cultivada em Florianópolis (SC), Sul do Brasil

Estação	PE		FT	
	Verde	Vermelha	Verde	Vermelha
Primavera	11,65 ± 0,74 aB	21,32 ± 0,69 aA	27,62 ± 3,99 aA	30,56 ± 0,33 aA
Verão	4,15 ± 0,03 bA	3,39 ± 0,74 cB	9,68 ± 0,23 cA	4,45 ± 0,83 cB
Outono	10,79 ± 1,83 aB	19,60 ± 0,22 bA	21,97 ± 2,86 bB	25,38 ± 0,51 bA
Inverno	10,57 ± 0,28 aB	19,83 ± 2,09 bA	19,49 ± 0,77 bB	31,60 ± 4,64 aA

Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças estatísticas significativas (teste de Scott & Knott, $p < 0,05$). Letras minúsculas diferenciam médias entre as estações, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre linhagens dentro da mesma estação.

Para os carotenoides, a linhagem verde apresentou conteúdo superior ($p<0,05$) durante o outono, similar ao observado para a linhagem vermelha. A análise comparativa entre as linhagens revelou conteúdo superior daqueles pigmentos nas amostras de biomassa verde em relação à vermelha nas biomassas algais coletadas na primavera e no verão, com incrementos de 39% e 54%, respectivamente. As biomassas coletadas no outono e inverno não diferiram estatisticamente em seus conteúdos de carotenoides (Tabela 5).

Tabela 5. Concentração (mg/g) de carotenoides totais de amostras de biomassas das linhagens verde e vermelha de *Kappaphycus alvarezii* cultivada em Florianópolis (SC), Sul do Brasil

Estação	Carotenoide	
	Verde	Vermelha
Primavera	5,79 ± 0,32 bA	4,16 ± 0,37 cB
Verão	1,25 ± 0,33 cA	0,81 ± 0,21 dB
Outono	11,30 ± 4,77 aA	10,54 ± 1,23 aA
Inverno	8,07 ± 0,08 bA	7,27 ± 1,09 bA

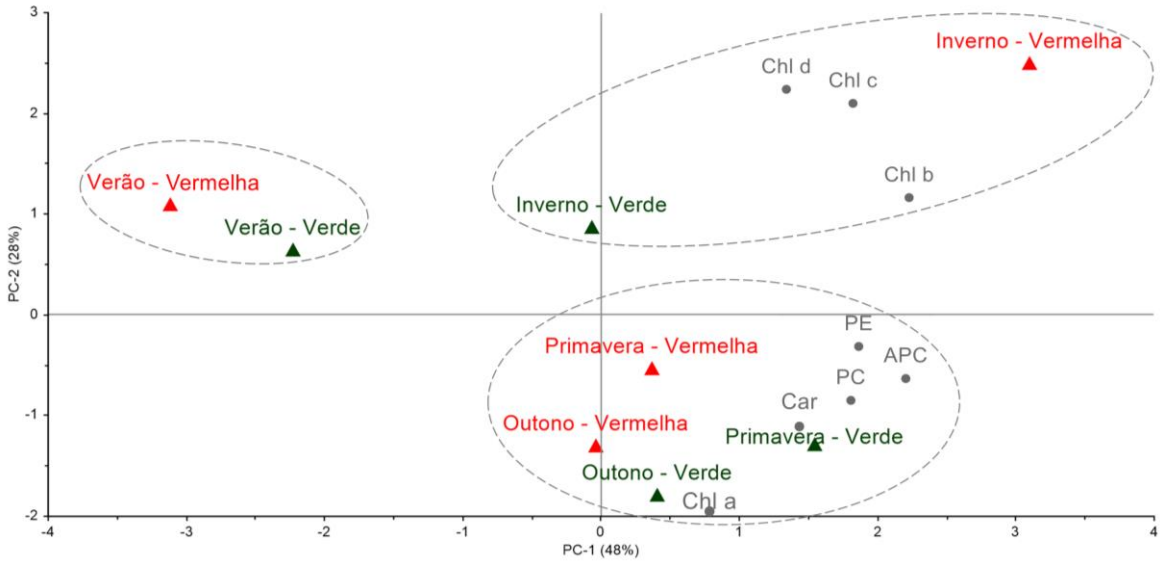
Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças estatísticas significativas, conforme o teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). Letras minúsculas diferenciam médias entre as estações, enquanto letras maiúsculas indicam diferenças entre linhagens dentro da mesma estação.

Num segundo momento, o conjunto de dados de conteúdos de pigmentos foi utilizado à construção de modelos descritivos, via análise de componentes principais (PCA). O modelo capturou 76% da variância total dos dados, com PC1 e PC2 representando 48% e 28%, respectivamente. Foram identificados três agrupamentos: o primeiro consistiu nas amostras de inverno das linhagens verde e vermelha, agrupadas com as clorofilas b, c e d; o segundo agrupamento incluiu as amostras de primavera e outono das linhagens verde e vermelha, caracterizado por teores similares de clorofila a aloficocianina, ficocianina, ficoeritrina e carotenoides; por fim, o terceiro agrupamento reuniu as linhagens verde e vermelha coletadas durante o verão (Figura 2).

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 2. Análise de componentes principais (PC1 e PC2) do conjunto de dados de conteúdos de clorofilas *a* (Chl a), *b* (Chl b), *c* (Chl c), d (Chl d), aloficocianina (APC), ficocianina (PC), ficoeritrina (PE) e carotenoides (Car) de amostras de biomassas de linhagens verde e vermelha de *Kappaphycus alvarezii* cultivada em Florianópolis-SC, Sul do Brasil

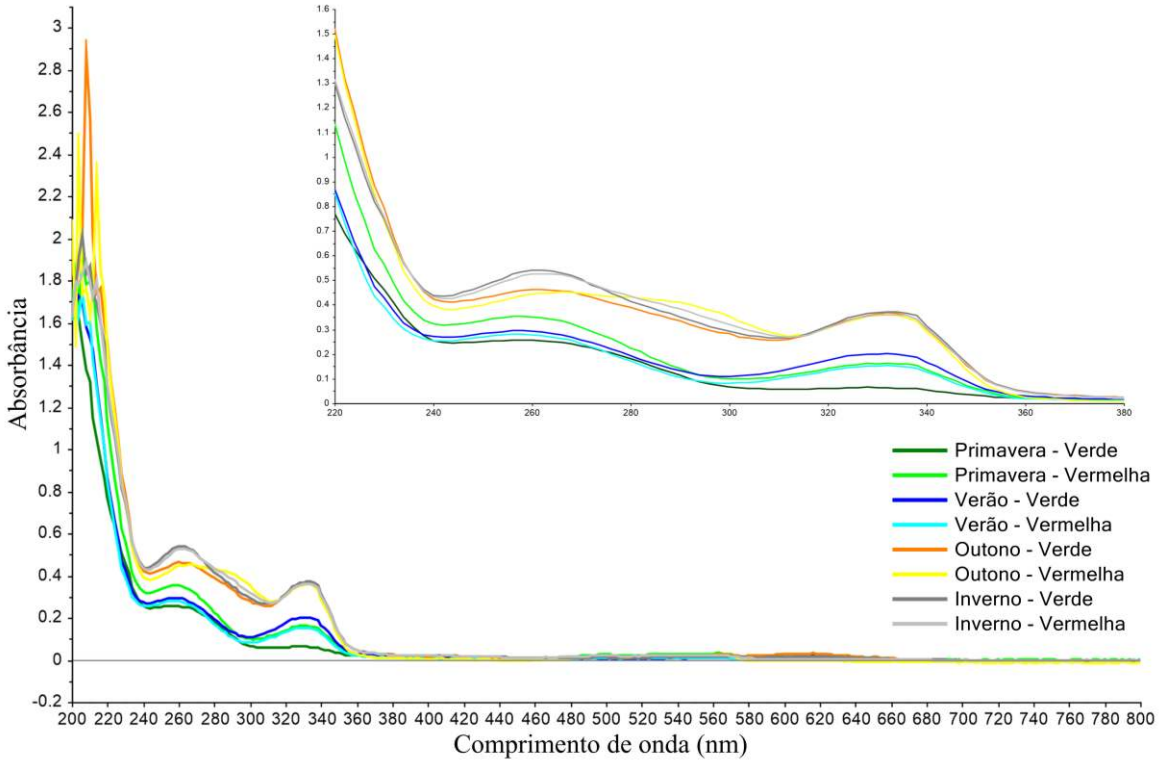


A análise do perfil espectroscópico UV-vis foi conduzida para identificar a presença de MAAs nas amostras de *K. alvarezii*. Para isso, foi realizada uma varredura na faixa de 200 a 800 nm, que proporcionou informações relevantes sobre compostos fenólicos e MAAs. Essas substâncias foram detectadas na faixa de 220 a 380 nm (Figura 3).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 3. Perfis espectroscópicos de UV-Vis (200–800 nm e 220–380 nm) do extrato aquoso da biomassa das linhagens verde e vermelha de *Kappaphycus alvarezii* coletadas ao longo das estações no ano em Florianópolis-SC, Sul do Brasil

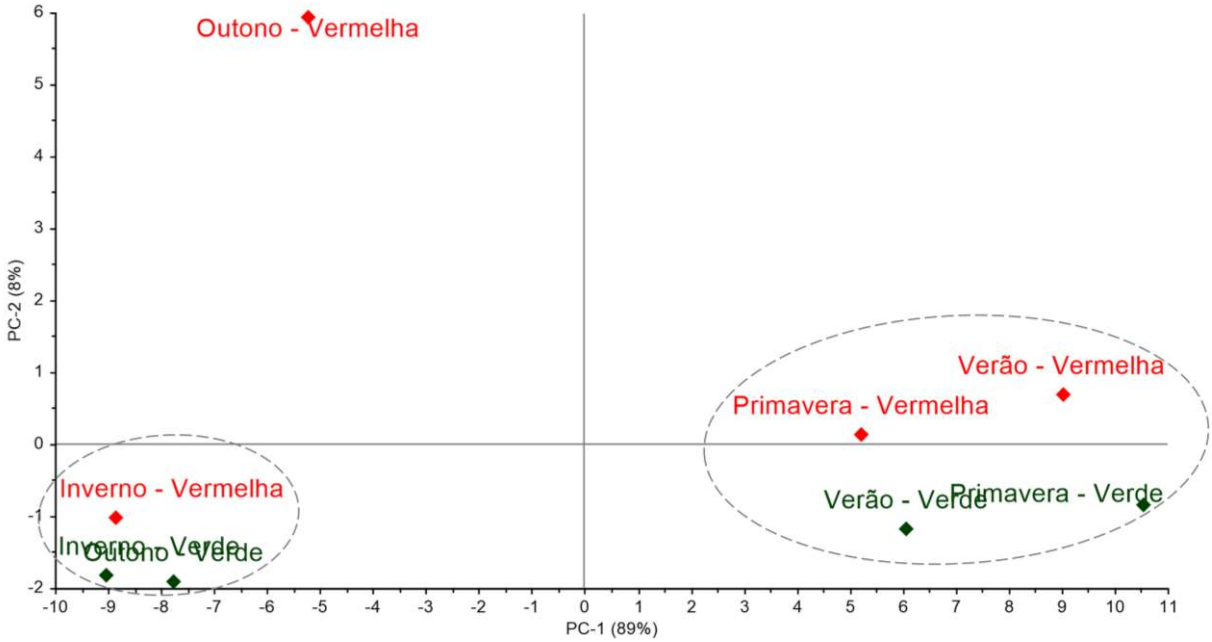


Como a quantificação desses compostos não é realizada da mesma maneira que a dos demais pigmentos, já que não existe um comprimento de onda específico para sua delimitação, empregou-se a PCA. Na PCA do perfil espectroscópico na faixa de 220-380 nm, observou-se uma variância total de 97%, com a PC1 representando 89% do modelo. A separação entre as amostras foi especialmente influenciada pelas diferentes linhagens (verde e vermelha). As amostras da linhagem vermelha coletadas na primavera e no verão agruparam-se em PC1+/PC2+, enquanto as amostras da linhagem verde, também da primavera e do verão, foram agrupadas em PC1+/PC2-. Por outro lado, as amostras de inverno e outono da linhagem verde, assim como a amostra de inverno da linhagem vermelha, foram classificadas em PC1- e PC2-. Notavelmente, a amostra de outono da linhagem vermelha apareceu isolada em PC1- e PC2+ (Figura 4).

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 4. Análise de componentes principais (PC1 e PC2) do conjunto de dados de absorbâncias UV-Vis (220–380 nm) extrato aquoso da biomassa das linhagens verde e vermelha de *Kappaphycus alvarezii* coletadas ao longo das estações no ano em Florianópolis-SC, Sul do Brasil



4. DISCUSSÃO

As análises das amostras de biomassa das linhagens verde e vermelha de *K. alvarezii* cultivadas em Florianópolis, Sul do Brasil, revelaram diferenças estatísticas significativas nos teores dos pigmentos. Em relação às clorofilas, destaca-se a clorofila *a* como o principal pigmento responsável pela fotossíntese nas macroalgas. A clorofila *a* absorve luz principalmente nas faixas azul e vermelha do espectro solar, refletindo a luz verde, desempenhando um papel crucial na captura de energia solar. Em *K. alvarezii*, a clorofila *a*, para além de ser essencial à conversão de luz solar em energia química, serve como um indicador importante da saúde e do vigor da alga (Mirkovic *et al.,* 2016; Mandal; Dutta, 2020). Os níveis de clorofila podem ser influenciados por diversos fatores, como a disponibilidade de nutrientes (Gee *et al.,* 2020), as condições ambientais (Kotta; Kitsiou, 2019) e o manejo dos cultivos (Wang *et al.,* 2023). Neste estudo, verificou-se que nas duas linhagens investigadas maiores teores de clorofila *a* foram registrados nas amostras coletadas na primavera e no outono, estações de temperaturas amenas no Sul do Brasil.

Ademais, destaca-se como relevante o conteúdo de clorofila *a* observado nas amostras coletadas no inverno, onde não houve distinção entre as diferentes linhagens. Além disso, as linhagens apresentaram concentrações relevantes de clorofila *d* naquela estação, com menores teores na primavera e ausência no verão e no outono. A clorofila *d* difere da clorofila *a* em sua estrutura química pela substituição de um grupo vinil por um grupo formil na posição C-3 do anel de clorina. Essa modificação confere à clorofila *d* propriedades de absorção deslocadas para a

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

região do vermelho distante (Kiang *et al.,* 2022). Em um estudo realizado com a cianobactéria *Acaryochloris marina*, observou-se que a clorofila *d* constitui mais de 90% do conteúdo total de clorofila, incluindo as clorofilas presentes nos centros de reação, onde ocorre a fotoquímica. Isso permite que *A. marina* prospere em habitats de baixa luminosidade, estando amplamente distribuída em ambientes salinos temperados e tropicais rasos, onde a luz visível é filtrada, frequentemente em associação com algas vermelhas ou animais (Ulrich *et al.,* 2024).

As ficobiliproteínas, por sua vez, são pigmentos acessórios hidrofílicos organizados em ficobilissomas, estruturas especializadas associadas ao fotossistema II. Elas atuam como antenas coletoras de luz, captando fótons em regiões espectrais onde a clorofila tem baixa eficiência (especialmente azul-esverdeada), e transferindo a energia à clorofila por meio de um processo sequencial entre ficoeritrina → ficocianina → aloficocianina. Esta adaptação é particularmente importante em ambientes aquáticos, onde a qualidade da luz varia com a profundidade e a turbidez da água (Saluri; Kaldamäe; Tuvikene, 2019).

As análises dos pigmentos de interesse considerando os fatores sazonalidade e genótipos (i.e., linhagens verde e vermelha) de *K. alvarezii* revelaram variações estatisticamente significativas nos teores de ficobiliproteínas (aloficocianina, ficocianina e ficoeritrina), refletindo a influência de fatores ambientais e genéticos. Ao analisar o conteúdo total desses pigmentos, observa-se que no outono e inverno teores mais altos são registrados na linhagem vermelha, enquanto no verão a linhagem verde destaca-se.

No entanto, ressalta-se que as amostras coletadas no verão apresentaram os menores teores de ficobiliproteínas, independente dos genótipos. É importante considerar que o conteúdo total destes pigmentos foi amplamente influenciado pelos altos valores de ficoeritrina nas amostras da linhagem vermelha. Os conteúdos de aloficocianina e ficocianina, por sua vez, foram mais elevados na linhagem verde, em amostras coletadas na primavera, verão e outono.

Dessa forma, fica evidente que o genótipo da linhagem pode impactar drasticamente os conteúdos das ficobiliproteínas de *K. alvarezii*, permitindo que o cultivo em larga escala seja direcionado com base nas aplicações desejadas à biomassa algal. Por exemplo, a aloficocianina pode ser empregada na indústria alimentícia como pigmento e nutriente. Além disso, estudos demonstram seus efeitos antioxidantes e anticancerígenos (Shang *et al.,* 2023). A ficocianina, por sua vez, possui alto potencial de aplicação industrial devido às suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, imunomoduladoras, neuroprotetoras e hepatoprotetoras. Seu caráter fluorescente também a torna valiosa como sonda em ensaios clínicos e imunológicos. Por ser um pigmento natural e seguro, tem sido apontada como alternativa aos corantes sintéticos, sendo amplamente utilizada nas indústrias alimentícia e cosmética (Krakauskaité *et al.,* 2025). A ficoeritrina possui forte fluorescência e alto potencial antioxidante, o que a torna útil no diagnóstico e prevenção de doenças como câncer e problemas cardíacos, além de fortalecer o sistema

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

imunológico. Sua resistência à oxidação e capacidade de proteger estruturas celulares a tornam valiosa como composto bioativo (Tan *et al.,* 2023).

Para os carotenoides, o máximo conteúdo foi detectado em amostras de outono, sem diferenças estatísticas entre as linhagens investigadas. Isso demonstra que esse importante pigmento, responsável por funções essenciais como a fotoproteção, mostrou-se mais influenciado pelas condições ambientais das áreas de cultivo no sul do Brasil do que pelos genótipos investigados.

A presença elevada de carotenoides no outono pode estar relacionada a fatores como a redução da intensidade luminosa, fotoperíodo e temperatura que estimulam a produção desses pigmentos como uma resposta adaptativa aquela condição de estresse (Giani; Martínez-Espinosa, 2020).

A análise dos dados sobre as concentrações dos pigmentos investigados revela que que as linhagens verde e vermelha foram agrupadas entre si nas diferentes estações (inverno, verão, primavera e outono). Assim, observa-se que a distinção nos conteúdos de clorofilas, carotenoides e ficobiliproteínas se dá principalmente em função da época de cultivo e coleta das algas, e não pela linhagem em si. As condições climáticas da primavera e do outono favoreceram a biossíntese e o acúmulo desses metabólitos nas duas linhagens de *K. alvarezii* estudadas (Figura 2). Essas estações parecem proporcionar um ambiente propício para o anabolismo de componentes essenciais ao processo fotossintético, refletindo uma resposta adaptativa das algas às variações sazonais, o que, por sua vez, impacta o metabolismo energético celular. Essas informações são fundamentais para otimizar as estratégias de cultivo, permitindo que os produtores maximizem a produção de pigmentos de interesse em períodos favoráveis ao longo do ano.

Em relação aos MAAs, compostos cruciais para a proteção contra a radiação UV em macroalgas vermelhas, observou-se um padrão semelhante ao verificado para os demais pigmentos, com as amostras sendo separadas principalmente com base na sazonalidade (Figura 4). Dessa forma, constata-se que as algas, incluindo suas diversas linhagens, podem adaptar sua produção de MAAs para otimizar a proteção contra a exposição à radiação UV (Orfanoudaki *et al.,* 2019). Este estudo confirmou esse fenômeno, evidenciando um aumento nos níveis de MAAs nos períodos de maior exposição solar (primavera e verão). Em relação à aplicação destas, os MAAs têm se destacado na indústria por suas propriedades de fotoproteção, sendo utilizadas em protetores solares, cremes antienvelhecimento e formulações antioxidantes. Além disso, destacam-se pela boa estabilidade, eficácia e por oferecerem uma alternativa natural aos filtros UV sintéticos. Seu uso em nanoemulsões e formulações autoconservantes representa um avanço nas aplicações cosméticas (Urrea-Victoria *et al.,* 2025).

Os resultados encontrados apontam que parâmetros ambientais, como temperatura, salinidade, intensidade e qualidade da luz influenciam no acúmulo desses metabólitos (Paransa *et*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

al., 2020). Essas condições sazonais afetam diretamente a atividade fotossintética e a produção de pigmentos, sugerindo que as algas se adaptam às mudanças no ambiente para otimizar sua eficiência fotossintética e proteção contra estresses (Siddiqui *et al.,* 2024). A temperatura, por exemplo, pode afetar as taxas metabólicas, enquanto a salinidade influencia a osmoproteção e a absorção de nutrientes. A intensidade e qualidade da luz, por sua vez, são cruciais para a fotossíntese e a biossíntese de pigmentos e MAAs, com diferentes espectros de luz estimulando a produção de pigmentos específicos (Hotos, 2021; Kumar *et al.,* 2020).

Em uma perspectiva mais ampla, a análise sazonal e entre linhagens de *K. alvarezii* cultivada no sul do Brasil revelou variações distintas na composição de pigmentos (clorofilas, ficobiliproteínas, carotenoides) e MAAs. Essas diferenças enfatizam a importância de considerar tanto o período de cultivo quanto o perfil genético para maximizar o potencial biotecnológico da espécie.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo demonstrou que a macroalga *K. alvarezii*, cultivada em Florianópolis, Sul do Brasil, apresentou variações significativas nos teores de pigmentos e aminoácidos tipo micosporinas ao longo das estações do ano. Para alguns pigmentos, especialmente as ficobiliproteínas, constatou-se que as linhagens também influenciam o conteúdo final obtido. Assim, considerar a estação de cultivo e a linhagem pode permitir o alcance de um maior potencial biotecnológico, especialmente para aplicações nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica.

Além disso, destaca-se a relevância de estudos adicionais que envolvam outras áreas de produção, a fim de determinar os possíveis efeitos ambientais e sazonais nas concentrações dos compostos de interesse. Por fim, investigações futuras que explorem a eficácia funcional desses pigmentos em diferentes contextos industriais poderão abrir novas oportunidades para o aproveitamento sustentável dessa macroalga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Algas Brasil Ltda. (Florianópolis, Santa Catarina) pela gentil cessão das algas verdes e vermelhas para este estudo.

FINANCIAMENTO

A pesquisa foi apoiada pela bolsa 2023/03886-1 (A.N.) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP); pelos auxílios 314977/2025-2 (A.R.S.), 311719/2023-6 (G.P.P.L.) e 405949/2022-7 e 306495/2023-6 (M.M.), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tecnológico, Brasil (CNPq); e pelo auxílio 2024TR002499 (M.M.) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Santa Catarina (FAPESC).

REFERÊNCIAS

AMAN, R. *et al.* Isolation of carotenoids from plant materials and dietary supplements by high-speed counter-current chromatography. **Journal of Chromatography A**, v. 1074, p. 99-105, 2005. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.03.055

BIRIS-DORHOI, E.-S. *et al.* Macroalgae – A sustainable source of chemical compounds with biological activities. **Nutrients**, v. 12, n. 10, p. 1–23, 2020. https://doi.org/10.3390/nu12103085

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Instrução Normativa nº 1, de 21 de janeiro de 2020**. Brasília, 2020. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-1-de-21-de-janeiro-de-2020-239404226. Acesso em: 03 maio 2024.

DAS, D. *et al.* Phytochemical constituents, antimicrobial properties and bioactivity of marine red seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) and seagrass (*Cymodocea serrulata*). **Foods**, v. 12, n. 14, p. 1-15, 2023. https://doi.org/10.3390/foods12142811

FARGHALI, M. *et al.* Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 1, p. 1-56, 2023. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01520-y

FREITAS, M. V. *et al.* Red seaweed pigments from a biotechnological perspective. **Phycology**, v. 2, n. 1, p. 1–29, 2021. https://doi.org/10.3390/phycology2010001

GEE, D. *et al.* The effect of nutrient and phytohormone supplementation on the growth, pigment yields and biochemical composition of newly isolated microalgae. **Process Biochemistry**, v. 92, p. 61-68, 2020. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.03.001

GIANI, N.; MARTÍNEZ-ESPINOSA, R. Carotenoids as a protection mechanism against oxidative stress in *Haloferax mediterranei*. **Antioxidants**, v. 9, n. 11, p. 1-15, 2020. https://doi.org/10.3390/antiox9111060

HOTOS, G. Culture growth of the cyanobacterium *Phormidium* sp. in various salinity and light regimes and their influence on its phycocyanin and other pigments content. **Marine Science and Engineering**, v. 9, p. 1-13, 2021. https://doi.org/10.3390/jmse9080798

KHATRI, K. et al. Functional genomic and transformation resources for commercially important red macroalgae (Rhodophyta). **Algal Research**, v. 74, p. 1-13, 2023. https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103227

KIANG, N. *et al.* Discovery of chlorophyll d: isolation and characterization of a far-red cyanobacterium from the original site of Manning and Strain (1943) at Moss Beach, California. **Microorganisms**, v. 10, p. 1-22, 2022. https://doi.org/10.3390/microorganisms10040819

KOTTA, D.; KITSIOU, D. Chlorophyll in the Eastern Mediterranean sea: correlations with environmental factors and trends. **Environments**, v. 6, n. 8, p. 1-24, 2019. https://doi.org/10.3390/environments6080098

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

KRAKAUSKAITÉ, U. et al. Optimised extraction and purification of dual-function cosmetic-grade phycocyanin and allophycocyanin from dried *Arthrospira platensis* biomass using conventional methods. **Applied Sciences**, v. 15, n. 2, p. 1-18, 2025. https://doi.org/10.3390/app15020532

KUMAR, K. S.; KUMARI S.; RAO, P. V. S. Studies on nutritional composition of three colour forms of *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty. **Indian Journal of Geo-Marine Sciences**, v. 51, n. 1, p. 18-25, 2022.

KUMAR, Y. N. *et al.* Impact of elevated temperature on the physiological and biochemical responses of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta). **PloS One**, v. 15, n. 9, p. 1-16, 2020. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239097

KURSAR, T. A.; VAN DER MEER, J.; ALBERTE, R. S. Light-harvesting system of the red alga *Gracilaria tikvahiae* 1: I. biochemical analyses of pigment mutations. **Plant Physiology**, v. 73, n. 2, p. 353-360, 1983. https://doi.org/10.1104/pp.73.2.353

MANDAL, R.; DUTTA, G. From photosynthesis to biosensing: Chlorophyll proves to be a versatile molecule. **Sensors International**, v. 1, p. 1-7, 2020. https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100058

MIRKOVIC, T. et al. Light absorption and energy transfer in the antenna complexes of photosynthetic organisms. **Chemical Reviews**, v. 117, n. 2, p. 249-293, 2016. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00002

NUNES, A. et al. Biotechnological applications of biogenic nanomaterials from red seaweed: a systematic review (2014–2024). **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n. 9, p. 1-31, 2025a. https://doi.org/10.3390/ijms26094275

NUNES, A. et al. Characterization of seaweed, aqueous extract, and residue from *Kappaphycus alvarezii* cultivated in Brazil for potential industrial applications. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 145, p. 1-18, 2025b. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107780

ORFANOUDAKI, M. *et al.* Chemical profiling of mycosporine-like amino acids in twenty-three redalgal species. **Journal of Phycology**, v. 55, p. 393-403, 2019. https://doi.org/10.1111/jpy.12827

OSÓRIO, C. et al. Pigments content (chlorophylls, fucoxanthin and phycobiliproteins) of different commercial dried algae. **Separations**, v. 7, n. 2, p. 1-14, 2020. https://doi.org/10.3390/separations7020033

PARANSA, D. *et al.* Pigment concentration of red algae, *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty ex Silva during the cultivation in the coastal waters of Nain Island, North Sulawesi, Indonesia. **AACL Bioflux**, v. 13, p. 2788-2797, 2020.

PUNCHAKARA, A. *et al.* Applications of mycosporine-like amino acids beyond photoprotection. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 89, n. 11, p. 1–16, 2023. https://doi.org/10.1128/aem.00740-23

RAJARAM, R. et al. Phytochemical profiling and antioxidant capacity of *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty collected from seaweed farming sites of tropical coastal environment. **Aquaculture Research**, v. 52, n. 7, p. 3438–3448, 2021. https://doi.org/10.1111/are.15188

RUDKE, A. R.; ANDRADE, C. J.; FERREIRA, S. R. S. *Kappaphycus alvarezii* macroalgae: An unexplored and valuable biomass for green biorefinery conversion. **Trends in Food Science & Technology**, v. 103, p. 1-11, 2020. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.018

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

SALURI, M.; KALDAMÄE, M.; TUVIKENE, R. Extraction and quantification of phycobiliproteins from the red alga *Furcellaria lumbricalis*. **Algal Research**, v. 37, p. 115-123, 2019. https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.11.013

SHAFAY, S. E. L. *et al.* Antioxidant, antidiabetic, anti-inflammatory and anticancer potential of some seaweed extracts. **Food Science and Technology**, v. 42, p. 1-12 2022. https://doi.org/10.1590/fst.20521

SHANG, M. *et al.* Fluorescence and antioxidant activity of heterologous expression of phycocyanin and allophycocyanin from *Arthrospira platensis*. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1-13, 2023. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1127422

SIDDIQUI, S. *et al.* Variable salinity induced physio-chemical and chlorophyll a fluorescence responses in *Kappaphycus alvarezii*, a commercial carragenophyte. **Journal of Applied Phycology**, v. 36, p. 1489–1502, 2024. https://doi.org/10.1007/s10811-023-03180-z

TAN, H. *et al.* A review on a hidden gem: phycoerythrin from blue-green algae. **Marine Drugs**, v. 21, p. 1-24, 2023. https://doi.org/10.3390/md21010028

ULRICH, N. *et al.* Ecological diversification of a cyanobacterium through divergence of its novel chlorophyll d-based light-harvesting system. **Current Biology**, v. 34, p. 2972–2979, 2024. https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.05.022

URREA-VICTORIA, V. *et al.* The role of mycosporine-like amino acids in skin care formulations: a patent review (2014–2024). **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 24, p. 847-861, 2025. https://doi.org/10.1007/s43630-025-00717-8

WANG, W. *et al.* Cultivation practices with various mulching materials to regulate chlorophyll fluorescence, cuticular wax, and rapeseed productivity under semi-arid regions. **Agricultural Water Managemen**t, v. 288, p. 1-12, 2023. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108465

WORLD BANK. **Global Seaweed New and Emerging Markets Report 2023**. World Bank Group, 2023. Disponível em: https://www.worldbank.org/en/topic/environment/publication/global-seaweed-new-and-emerging-markets-report-2023. Acesso em: 7 maio. 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.