

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS – CFM  
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA  
CURSO DE OCEANOGRAFIA

Kaoã Math Barbosa

INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO CRESCIMENTO, TEOR DE  
PIGMENTOS E REMOÇÃO DE NUTRIENTES DA ÁGUA POR *ULVA SP.*

Florianópolis

2024

Kaoã Math Barbosa

INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO CRESCIMENTO, TEOR DE  
PIGMENTOS E REMOÇÃO DE NUTRIENTES DA ÁGUA POR *ULVA* SP..

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Oceanografia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. José Bonomi Barufi

Florianópolis

2024

Barbosa, Kaoã Math

Influência da radiação eletromagnética no crescimento, teor de pigmentos e remoção de nutrientes da água por *Ulva* sp. / Kaoã Math Barbosa ; orientador, José Bonomi Barufi, coorientador, Eduardo de Oliveira Bastos, 2024.

41 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Fotobiologia. 3. Algas. 4. Nutrientes . 5. Biorremediação. I. Barufi, José Bonomi. II. Bastos, Eduardo de Oliveira. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Oceanografia. IV. Título.

Kaoã Math Barbosa

**Título:** Influência da radiação eletromagnética no crescimento, teor de pigmentos e remoção de nutrientes da água por *Ulva* sp.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso de Oceanografia

Florianópolis, 14 de julho de 2024.

[Empty dotted box]

**Banca examinadora**

[Empty dotted box]

Prof. Dr. José Bonomi Barufi  
Orientador

[Empty dotted box]

Prof. Dr. Paulo Antunes Horta  
UFSC

[Empty dotted box]

Ms. Alex Cabral

Florianópolis, 2024.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais e irmãos pelo apoio incondicional, amor e compreensão ao longo de toda essa jornada. À minha filha, por me inspirar todos os dias com sua curiosidade e paixão pela ciência.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, que fizeram parte do início ao fim dessa fase e à tornaram mais leve, vivendo comigo experiências mágicas e revigorantes. Dias de surf, acampamento, trilha e de muito estudo permearam todo esse processo.

Aos colegas de laboratório, que me ajudaram nos experimentos e sempre estiveram dispostos a esclarecer minhas dúvidas. Cada discussão, troca de ideias e assistência prática contribuíram significativamente para o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha namorada, pelo constante incentivo e por toda ajuda no desenvolvimento deste trabalho. Sua presença, amor e carinho foram fonte de motivação e inspiração.

Ao meu orientador José Bonomi Barufi, pelas grandes ideias e histórias de vida contadas que me inspiraram a seguir em frente. Suas orientações e conselhos foram enriquecedoras e me ajudaram a ver o projeto sob diferentes perspectivas.

Ao meu coorientador Eduardo Bastos, por ajudar no planejamento do experimento e pelo suporte constante durante a pesquisa. Sua orientação foi fundamental para o sucesso dos experimentos.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Laboratório de Ficologia (LAFIC) e CNPq pela infraestrutura fornecida e recursos disponibilizados para a condução dos experimentos e análises.

A todos, meu sincero agradecimento. Esse trabalho é resultado de um esforço coletivo de muitas pessoas. Serei eternamente grato pelo apoio recebido durante esta jornada.

## RESUMO

Toda forma de vida no planeta depende direta ou indiretamente da luz, seja ela de uma fonte natural ou artificial, de modo que organismos que a utilizam como fonte de energia assumem uma maior importância no estudo de respostas biológicas fotorreguladas. Espécies do gênero de macroalga *Ulva* possuem uma ampla gama de aspectos fisiológicos e morfológicos estudados, entretanto existe uma lacuna de conhecimento a respeito de como tais aspectos se comportam em diferentes condições luminosas. Nesse sentido, este trabalho avaliou a influência da qualidade da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no crescimento, teor pigmentar e absorção de nutrientes por uma espécie desse gênero. Para tanto, as algas foram coletadas na Prainha da Barra da Lagoa em Florianópolis/SC e levadas ao Laboratório de Ficologia da UFSC onde foram aclimatadas às condições gerais de cultivo durante um período de 30 dias até o início da aclimação nas condições experimentais. Após isso, foram expostas durante sete dias a oito diferentes espectros eletromagnéticos emitidos por lâmpadas LED e uma irradiância de 40  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Ao final, os resultados apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos para absorção de nutrientes, crescimento e conteúdo pigmentar, tendo sido observada uma maior eficiência dessas respostas fisiológicas em comprimentos de onda menores dentro da PAR. O tratamento com 437 nm foi o que apresentou maiores valores de clorofila a ( $0,30 \pm 0,66 \text{ mg gDW}^{-1}$ ), eficiência na remoção de f\u00f3foro total ( $68,2 \pm 1,3\%$ ) e taxa de crescimento ( $23,2 \pm 1,1\% \text{ dia}^{-1}$ ). J\u00e1 os menores valores no geral foram encontrados no tratamento com 410 nm. A luz azul se mostrou ser eficiente na remo\u00e7\u00e3o de nutrientes da \u00e1gua, crescimento e na produ\u00e7\u00e3o das clorofilas. O controle com LEDs brancos apresentou respostas mais intensas a curto prazo. O estudo sugere que a utiliza\u00e7\u00e3o de espectros monocrom\u00e1ticos com comprimentos de onda mais curtos dentro da PAR podem ser uma ferramenta interessante para otimizar e acelerar processos fisiol\u00f3gicos em *Ulva* sp., oferecendo a oportunidade para melhorar a efici\u00eancia da produ\u00e7\u00e3o e cultivo, al\u00e9m de poderem resultar em uma redu\u00e7\u00e3o de custo com energia el\u00e9trica.

**Palavras-chave:** fotobiologia, radia\u00e7\u00e3o eletromagn\u00e9tica, algas, nutrientes, fotorregula\u00e7\u00e3o.

## ABSTRACT

Every form of life on the planet depends directly or indirectly on light, whether from a natural or artificial source, making organisms that use it as an energy source of greater importance in the study of photoregulated biological responses. Species of the macroalga genus *Ulva* have a wide range of studied physiological and morphological aspects; however, there is a knowledge gap regarding how these aspects behave under different light conditions. In this regard, this study evaluated the influence of the quality of photosynthetically active radiation (PAR) on the growth, pigment content, and nutrient absorption of a species of this genus. For this purpose, the algae were acclimated to general cultivation conditions for 30 days until the start of acclimation to experimental conditions. After that, they were exposed for seven days to eight different electromagnetic spectra emitted by LED lamps with an irradiance of  $40 \mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . In the end, the results showed significant differences between treatments for nutrient absorption, growth, and pigment content, with greater efficiency of these physiological responses observed at shorter wavelengths within the PAR. The 437 nm treatment showed the highest values of chlorophyll a, nutrient removal efficiency, and growth rate, while the lowest values overall were found in the 410 nm treatment. The results indicate that the use of monochromatic blue or green spectra can be an interesting tool to optimize and accelerate biological processes in *Ulva* sp. Blue light proved to be efficient in nutrient removal from water, growth, and chlorophyll production. The control showed more intense short-term responses. The study suggests that using monochromatic spectra with shorter wavelengths within the PAR can be an interesting tool to optimize and accelerate physiological processes in *Ulva* sp., offering the opportunity to improve production and cultivation efficiency, as well as potentially reducing electricity costs.

**Keywords:** photobiology; electromagnetic radiation; algae; nutrients; photoregulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ponto de coleta do material biológico.....	14
Figura 2. Algas em aclimatação.....	15
Figura 3. Estrutura do experimento, contendo frascos cilíndricos, com <i>Ulva</i> sp. expostos a diferentes radiações monocromáticas. Ademais, estão presentes também mangueiras e cânulas de vidro para a aeração dos cultivos. ....	16
Figura 4. Espectro de radiação dos LEDs monocromáticos indicando o pico de emissão em cada um dos tratamentos. ....	17
Figura 5. Taxa de crescimento após 7 dias de cultivo. A cor das barras representa a cor dos LEDs. As letras acima da barra de desvio padrão indicam diferença significativa entre os tratamentos. ....	21
Figura 6. Valores de clorofila obtidos por análise espectrofotométrica de varredura. Média do LED branco representado pela linha preta horizontal e desvio padrão pela faixa cinza. As letras acima da barra de desvio padrão indicam diferença significativa entre os tratamentos ....	22
Figura 7. Valores de NUE após 24h de experimento. Média do LED branco representado pela linha preta horizontal e desvio padrão pela faixa cinza. As letras acima da barra de desvio padrão indicam diferença significativa entre os tratamentos. ....	23
Figura 8. Valores de NUE para cada tempo de coleta, até 24h de experimento. A cor das linhas representa a cor dos LEDs. ....	24
Figura 9. Valores de NUR após 24h de experimento. Média do LED branco representado pela linha preta horizontal e desvio padrão pela faixa cinza. As letras acima da barra de desvio padrão indicam diferença significativa entre os tratamentos. ....	25

- Figura 10. Valores do coeficiente de decaimento exponencial (k) após 24h de experimento. Média do LED branco representado pela linha preta horizontal e desvio padrão pela faixa cinza. Letras acima da barra de desvio padrão indicam diferença significativa entre os tratamentos. .... 25
- Figura 11. Mudanças na concentração de  $\text{PO}_4^{3-}$  na água em 15, 30, 60, 120, 240 e 1440 minutos de exposição. Os marcadores representam cada um dos comprimentos de onda com valores da média  $\pm$  desvio padrão. .... 27

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Resumo da anova comparando os parâmetros avaliados em função dos diferentes comprimentos de onda. Parâmetros com diferenças significativas entre os tratamentos estão em negrito ( $p < 0,05$ ). .....21
- Tabela 2: Ganho de biomassa (gramas de peso seco) e desvio padrão em cada um dos comprimentos de onda. As letras sobrescritas aos valores representam a correlação entre os tratamentos. ....21
- Tabela 3. Porcentagem de  $po_4^{3-}$  retirado da água por *ulva* sp. Ao longo do experimento em cada um dos comprimentos de onda. Valores observados nos primeiros 15 minutos em negrito. Letras acima dos valores indicam diferença significativa entre os tratamentos. ....23
- Tabela 4: valores da análise de correlação de pearson obtidos entre variáveis dependentes após exposição da alga em diferentes comprimentos de onda. Os tratamentos com correlação significativa são apresentados em negrito ( $p < 0,05$ ). Variáveis dependentes: eficiência na remoção de nutriente (nue), taxa de crescimento (tc), clorofilas a e b (clf a, b), coeficiente de decaimento exponencial do nutriente (k) e taxa de absorção de nutrientes (nur).....26

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANOVA – Análise de Variância  
ATP – Adenosina trifosfato  
clf a – Clorofila a  
clf b – Clorofila b  
k – Coeficiente da Taxa de Decaimento do Nutriente  
LAFIC – Laboratório de Ficologia  
LED – Diodo Emissor de Luz  
nm – Nanômetro  
NUE – Eficiência na Remoção de Nutrientes  
NUR – Taxa de Absorção de Nutriente  
Pt – Fósforo Total  
PAR – Radiação Fotossinteticamente Ativa  
TC – Taxa de Crescimento

## LISTA DE EQUAÇÕES

Taxa de Crescimento (1).....	18
Clorofila a (2).....	18
Clorofila b (3).....	18
Eficiência na Remoção de Nutrientes (NUE) (4) .....	19
Taxa de Remoção de Nutrientes (NUR) (5).....	19
Função de Decaimento Exponencial (6) .....	19

## SUMÁRIO

<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	10
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	13
3.1	Objetivo geral	13
3.2	Objetivo específicos	13
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	14
4.1	Material biológico	14
4.2	Condições gerais de cultivo para aclimação	15
4.3	Desenho experimental	16
4.5	Análise de biomassa	18
4.6	Análise de água	18
4.7	Análise estatística	20
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	20
5.1	Análise estatística	26
5.2	Taxa de crescimento	20
5.3	Clorofila	21
5.4	Análise de água	23
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	26
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	29
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	30

## 2 INTRODUÇÃO

A luz, dentre os tipos de energia que compõem o espectro da radiação eletromagnética do sol, é a que mais tem importância na origem, evolução e manutenção das formas de vida na Terra, desde as mais simples como os micro-organismos até as mais complexas como as plantas e animais. Direta ou indiretamente, todos os seres vivos do nosso planeta dependem da luz solar, sendo ela reguladora do ritmo biológico e responsável pela capacidade de visão nos animais, como exemplo. É também fundamental para os seres autotróficos, que obtêm energia fazendo fotossíntese, processo no qual ocorre a oxidação da molécula de água em  $O_2$  - mediada pela energia luminosa absorvida por pigmentos fotossintetizantes nos cloroplastos - e a redução do  $CO_2$  em compostos orgânicos, utilizando ATP (ARNON, 1984). Esse processo tem como resultado a produção de matéria orgânica, que é incorporada pelos próprios organismos, e  $O_2$ , que é liberado no meio.

Considerando o espectro de radiação do sol, a faixa correspondente à luz visível (400 nm e 740 nm) assume maior importância, já que é nela onde ocorre a Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA), a qual fornece energia suficiente para que, após a absorção pelos diferentes tipos de pigmentos (clorofilas, carotenóides e pigmentos acessórios), a fotossíntese aconteça (BJÖRN, 2008).

Para usos práticos, a maneira pela qual esses comprimentos de onda são absorvidos pode ser descrita através de um espectro de ação, que consiste em gráficos da eficiência na resposta biológica em função dos comprimentos de onda incidentes. Classicamente, experimentos com diferentes comprimentos de onda são usados para identificação de um ou mais pigmentos fotorreceptores, os quais iniciam uma cascata biológica até efetivamente a absorção da luz se tornar uma resposta, podendo ser ela a fotossíntese, movimentos foliares ou até mesmo a mudança na coloração das folhas (GORTON, 2010).

Engelmann (1882) foi um dos primeiros a utilizar espectros de ação, tendo usado bactérias como indicadoras da presença de oxigênio com o objetivo de determinar em quais cores presentes no PAR as algas tinham uma maior taxa de fotossíntese. Posteriormente, uma investigação feita por Gates (1930) sobre o efeito da radiação UV na bactéria *Staphylococcus aureus*, encontrou uma relação entre a porcentagem de mortalidade em função da fluência de energia no sistema e a usou

para determinar quanta luz era necessária para induzir 50% de mortalidade em cada um dos comprimentos de onda.

Haxo & Blinks (1950), por sua vez, investigaram a resposta da fotossíntese e também propriedades ópticas de extratos de diferentes macroalgas, entre elas *Ulva taeniata*. Os autores observaram que o espectro de ação para a fotossíntese, medido com produção de oxigênio, foi marcado por picos máximos de eficiência na região do azul (entre 400 e 480 nm) e no vermelho (pico entre 640 e 680 nm).

As diferenças na composição espectral da radiação incidente sobre as algas possuem relação com funções biológicas, como atividades enzimáticas e fases reprodutivas (HANELT e FIGUEROA, 2013), além de também estimular variações quanto ao conteúdo pigmentar fotossintetizante (TONETTO, 2010). Segundo Carmona *et al.* (1998), na alga vermelha *Gelidium sesquipedale* isso gera como efeito uma diferença na qualidade e quantidade de ágar-ágar. A morfologia das algas pode ou não ser alterada em decorrência da exposição a diferentes qualidades espectrais de luz. A morfologia de *Gracilaria domingensis* foi alterada quando essa espécie foi cultivada sob radiação vermelha, com o estímulo à formação de ramificações na região apical dessas algas (GUIMARÃES, 2000). Porém, a exposição de outras espécies de Rhodophyta à luz vermelha, azul e verde não provocou alterações morfológicas nas mesmas (LÜNING, 1992), embora existam evidências de que a ultraestrutura das algas possa ser alterada (TSEKOS *et al.*, 2002).

A qualidade de luz permite uma melhoria na produção de biomassa e bioprodutos em algas microscópicas e macroscópicas. Por exemplo, a luz vermelha estimula a produção de lipídios (RAMANNA *et al.*, 2016). Resultados importantes também têm sido obtidos com o uso de luz azul, onde foi evidenciada maior taxa de crescimento de biomassa e produção de ácido esteárico e palmítico. Além disso, a cor vermelha somada ao verde e o azul induzem a resistência a fungos nas plantas, o que poderia ser uma característica usada em culturas de algas (HASAN *et al.*, 2017).

Outros exemplos consistem em aumentos no teor de pigmentos (ficobiliproteínas e clorofilas) em *Chondrus crispus*, regulados por luzes coloridas em comparação com as condições em luz branca (FRANKLIN *et al.* 2001). Outra alga vermelha (*Gracilaria birdiae*) também apresentou efeitos pronunciados das radiações verde, azul e vermelha no crescimento e reprodução, com ênfase na

indução de ficobiliproteínas por luz azul (BARUFI *et al.*, 2015). Esses pigmentos também foram estimulados por luz azul e luz vermelha em *Halymenia floresii*, enquanto que a radiação verde causou aumentos no crescimento e síntese de luteínas e clorofilas nessa espécie (ORTEGA *et al.*, 2008).

Além de estimular a síntese de ficobiliproteínas, a luz azul também causou o aumento na assimilação de fosfato em *Porphyra umbilicalis* (FIGUEROA *et al.*, 1995). A síntese de clorofilas e ficobiliproteínas pode estar associada com a presença de fitocromos e fotorreceptores de luz azul nessas algas (FIGUEROA e NIELL, 1991). A luz azul ainda pode causar incrementos em lâminas de *Laminaria saccharina* e sua reprodução, além da reprodução de *Petalonia fascia* e *P. zosterifolia*, que adicionalmente tiveram eixos eretos induzidos por luz vermelha (DRING e LÜNING, 1973).

Algumas espécies de algas se adaptaram para que a qualidade da luz não fosse um limitante de crescimento. Um exemplo disso são as espécies de macroalgas verdes do gênero *Ulva*. Essas algas apresentam elevada capacidade de adaptação quando exposta a altas concentrações de nutrientes e fontes luminosas com diferentes propriedades (MASSOCATO *et al.* 2022, MASSOCATO *et al.* 2023, SALVI *et al.* 2021). Junto a isso, elas apresentaram uma rápida absorção de nutrientes e reprodução em massa (SMITH, 1947), caracterizando-as como espécies oportunistas. Adicionalmente, Zhang (2010) elenca a tolerância a uma grande faixa de salinidade e temperatura e seu alto potencial de propagação como motivos pelos quais ela pode ser considerada cosmopolita.

Por se tratar de uma alga sésil, a *Ulva* sp. absorve e acumula compostos presentes na água do ambiente no qual está inserida. Dentre estes compostos podemos citar o fosfato - macronutriente de fácil assimilação pelas espécies do gênero - cujos efeitos são facilmente observáveis no crescimento das algas (VIAROLI *et al.*, 1996). Segundo Lapointe *et al.* (1986), o fosfato é um nutriente chave na fisiologia de macroalgas, pois está envolvido em processos como a síntese de ácidos nucleicos para transferência de energia, composição de NADPH - que é responsável pela redução de CO<sub>2</sub> na fotossíntese – e na síntese de carboidratos. Sua ausência pode prejudicar processos como a fotossíntese e a absorção de compostos nitrogenados (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) (Pedersen *et al.*, 2010).

Tendo como objetivo aprimorar as estimativas e predições dos efeitos de condições experimentais nas taxas de absorção de nutrientes e crescimento em *Ulva*

sp., Nesan *et al.* (2021) aplicaram modelos matemáticos baseados em equações de decaimento exponencial, adaptados para que pudessem ser utilizadas para avaliação da resposta fisiológica das algas em função das condições de cultivo.

Ainda que esses trabalhos tenham verificado a alta capacidade de *Ulva* sp. em remover nutrientes do meio externo, crescer ou produzir pigmentos, nenhum deles analisou a fotorregulação dessas respostas, isto é, se são favorecidas por algum comprimento de onda ou situação específica de tratamento com radiação.

Vale considerar que a determinação de espectros de ação demanda uma infraestrutura específica (lâmpadas monocromáticas, ou um espectrógrafo, ou filtros de corte a partir de uma lâmpada simulando a radiação solar, entre outros) de modo que são escassos trabalhos executados com essa prerrogativa em macroalgas, mais especificamente em *Ulva* sp. (Mantri *et al.*, 2020). Deste modo, o presente trabalho pretende avaliar o potencial de assimilação de fosfato, taxa de crescimento e teor de pigmentos (clorofilas a e b) pela *Ulva* sp. cultivando-a em diferentes condições de luz no intervalo entre 410 e 734 nm, a fim de identificar as fontes luminosas mais eficientes para estimular esses parâmetros.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo geral

- Descrever e avaliar a influência de radiações eletromagnéticas monocromáticas em aspectos fisiológicos de *Ulva* sp..

#### 3.2 Objetivo específicos

- Obter dados de concentração de  $\text{PO}_4^{3-}$  na água após 15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 240 min e 1440 min de cultivo de *Ulva* sp. sob oito diferentes radiações monocromáticas.
- Analisar o teor de clorofilas (a e b) e taxa de crescimento de *Ulva* sp. após exposição às diferentes radiações monocromáticas;
- Avaliar a eficiência na remoção (NUE), taxa de absorção do nutriente da água (NUR) e o coeficiente da taxa de decaimento do nutriente (k) de *Ulva* sp. após cultivo em radiações monocromáticas.

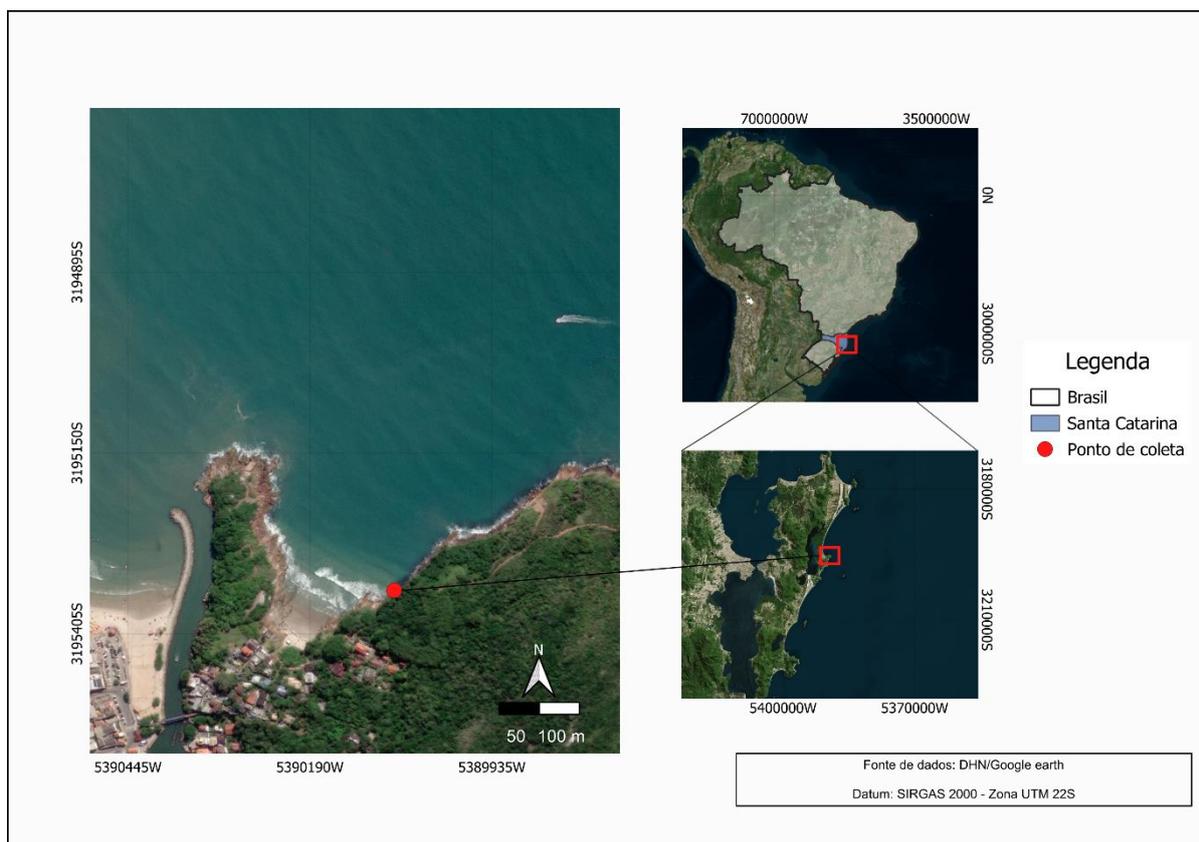
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os experimentos e análises foram conduzidos na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O cultivo e análise de clorofila e taxa de crescimento foram feitos no Laboratório de Ficologia (LAFIC). Já a análise de nutrientes presentes na água foi feita no Laboratório de Oceanografia Química.

### 4.1 Material biológico

Os exemplares de *Ulva* sp. foram coletados na prainha da Barra da Lagoa em Florianópolis, Santa Catarina ( $27^{\circ}34'25.4''S$   $48^{\circ}25'16.6''W$ ) (Figura 1).

Figura 1. Ponto de coleta do material biológico.



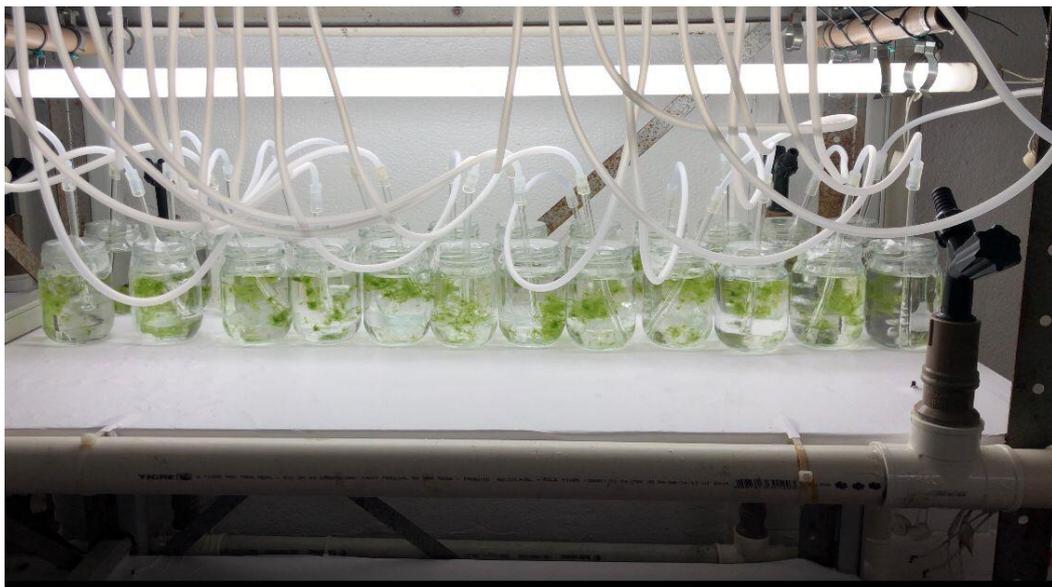
Fonte: Autor (2024).

A biomassa coletada e armazenada em recipiente térmico foi transportada para o LAFIC, onde passou por lavagem com água do mar esterilizada, sendo também feita a limpeza com pincéis a fim de eliminar as epífitas, invertebrados e sedimento associados às algas. Em seguida, foi realizada a aclimação das algas às condições gerais de cultivo durante um período de 30 dias até o início do experimento.

## 4.2 Condições gerais de cultivo para aclimação

As algas foram aclimatadas com salinidade 32, temperatura 25°C, com fonte luminosa composta por lâmpadas LED brancas com irradiância de  $40 \mu\text{mol f\u00f3tons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , com aeração do meio e fotoper\u00edodo de 12 horas (Bastos *et al.*, 2019) (Figura 2). As algas foram cultivadas com \u00e1gua do mar esterilizada enriquecida com solu\u00e7\u00e3o Von Stoch 100% (VS100) ( $2 \text{ mL.L}^{-1}$ ) (Edwards 1970), com densidade de  $0,8 \text{ g.L}^{-1}$ , em frascos de 200 mL.

Figura 2. Algas em aclima\u00e7\u00e3o.



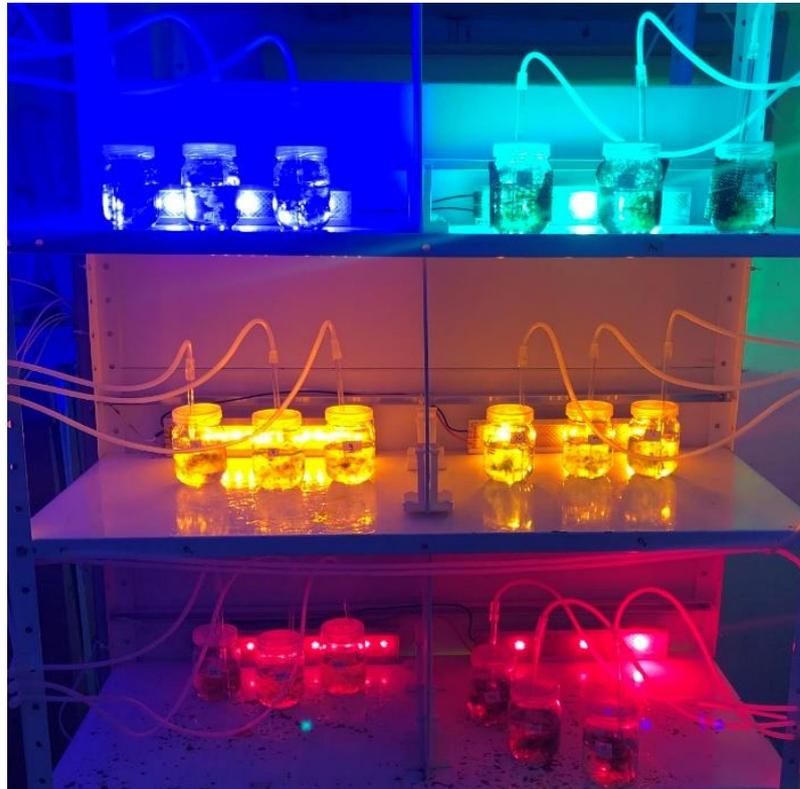
Fonte: Autor (2024).

Vale considerar que no ambiente, as algas est\u00e3o sujeitas a irradi\u00e2ncias crescentes durante o per\u00edodo diurno, que podem atingir at\u00e9 mais de  $2000 \mu\text{mol f\u00f3tons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , de modo que o valor a ser utilizado n\u00e3o se configura uma quantidade demasiado elevada, evitando fotoinibi\u00e7\u00e3o da fotoss\u00edntese das algas em laborat\u00f3rio (Arnold e Murray, 1980). Fortes *et al.* (1980) observou que a satura\u00e7\u00e3o do crescimento para *Ulva* sp. em condi\u00e7\u00f5es experimentais pode ocorrer a partir de  $70 \mu\text{mol f\u00f3tons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

### 4.3 Desenho experimental

Após a aclimatação, foram pesadas 0,16 g de alga em balança analítica e transferidas para recipientes cilíndricos de 200 ml, os quais foram expostos às diferentes fontes luminosas monocromáticas (Figura 3).

Figura 3. Estrutura do experimento, contendo frascos cilíndricos, com *Ulva* sp. expostos a diferentes radiações monocromáticas. Ademais, estão presentes também mangueiras e cânulas de vidro para a aeração dos cultivos.

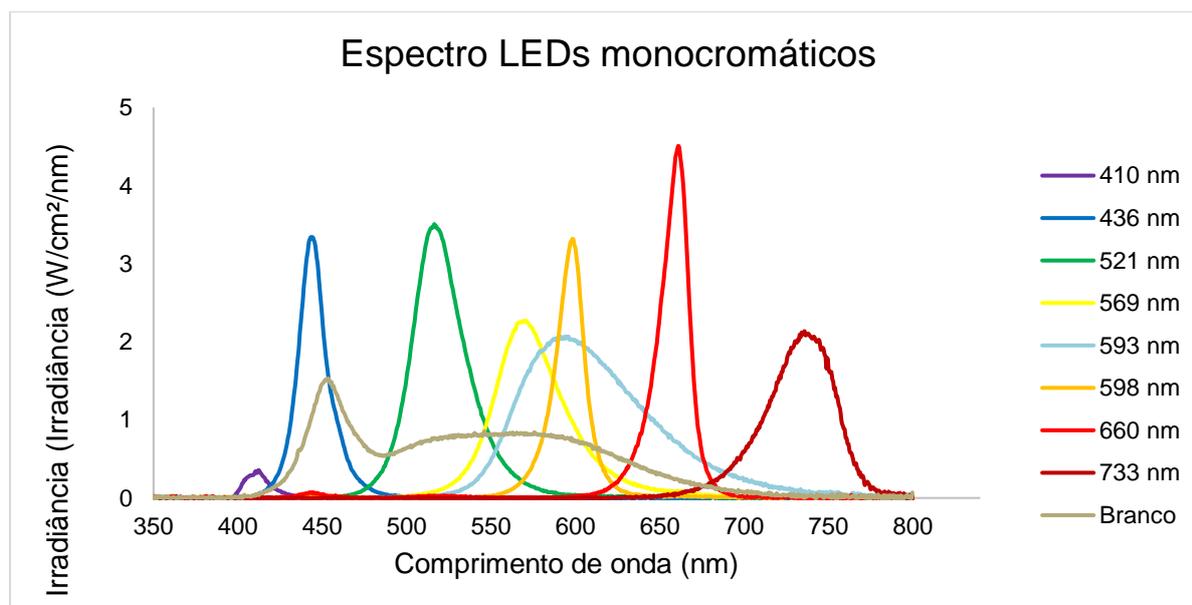


Fonte: Autor (2024).

Oito diferentes espectros de radiação foram utilizados, com comprimentos de onda específicos (de 410 nm a 740 nm), conforme a Figura 4. A irradiância utilizada foi a mesma da aclimatação, para garantir que o único fator de influência fosse a energia dos comprimentos de onda.

A aferição da qualidade luminosa dos LEDs foi feita utilizando um espectroradiômetro modelo Avantes, resultando em um espectro das radiações emitidas por cada um deles (Figura 4).

Figura 4. Espectro de radiação dos LEDs monocromáticos indicando o pico de emissão em cada um dos tratamentos.



Fonte: Autor (2024)

No início do experimento foram adicionados 2 mL/L do meio de cultura VS100, o qual foi preparado em laboratório contendo 140  $\mu\text{mol}$  de  $\text{PO}_4^{3-}$ . Uma irradiância comum foi encontrada para cada um dos LEDs, utilizando um quantômetro (LI-COR, modelo LI-1500 com sensor esférico). Três réplicas foram cultivadas, recebendo a mesma irradiância em cada um dos comprimentos de onda. Foram totalizados assim 27 tratamentos (considerando os três para o controle em luz LED branca), com duração de sete dias.

Para análise de nutrientes, entretanto, foram realizadas coletas até as primeiras 24h, sendo o restante do experimento utilizado para análise de biomassa. Alíquotas de 10 mL de água foram coletadas utilizando pipetas volumétricas e tubos falcon de 15 mL para armazenamento em seis momentos durante o experimento (15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 240 min e 1440 min), sendo filtradas e imediatamente congeladas para posterior análise. A temperatura foi medida também nesses seis momentos.

Após sete dias de exposição aos LEDs, foi feita a coleta e congelamento da biomassa para posterior análise. A secagem foi feita utilizando um Liofilizador modelo LJ-UP. Esse equipamento faz a secagem do material biológico congelado removendo a água por sublimação sob vácuo e baixas temperaturas, preservando

assim as estruturas e compostos presentes nas algas. Estes métodos analíticos da biomassa e da água são discriminados abaixo. Os teores de clorofila a e b totais e taxa de crescimento foram mensurados a partir das amostras liofilizadas.

#### 4.5 Análise de biomassa

Como mencionado anteriormente, ao final do experimento (sete dias) a biomassa das algas foi congelada e posteriormente liofilizada. Após isso as algas foram pesadas em balança analítica para obtenção do seu peso seco. Os dados de biomassa inicial e biomassa final foram usados para o cálculo das taxas de crescimento, conforme proposto por Lignell e Pedersén (1989) na Equação 1:

$$TC = ((M_f / M_i)^{1/t} - 1) \times 100 \quad (1)$$

onde  $M_f$  é a massa ao final do período de tempo,  $M_i$  é a massa ao início do experimento e  $t$  é o tempo (sete dias).

Os conteúdos de clorofila a e b totais foram obtidos a partir das algas liofilizadas no início e final do experimento. Uma alíquota de 3 mg de biomassa seca foi macerada com os eppendorfs imersos em  $N_2$  líquido e em seguida foram ressuspensas em acetona 90%. A extração se deu com a incubação desse material *overnight* no escuro a uma temperatura de 4 °C. Em seguida, os extratos foram centrifugados durante 10 minutos a 4 °C e 10000 rpm. O material sobrenadante foi retirado e lido em espectrofotômetro de varredura (Global Analyzer), permitindo a quantificação dos pigmentos seguindo as Equações 2 e 3, propostas por Ritchie (2006):

$$\text{Chl a } (\mu\text{g/ml}) = 11,867 \times (A_{664} - A_{750}) - 1,786 \times (A_{647} - A_{750}) \quad (2)$$

$$\text{Chl b } (\mu\text{g/ml}) = 18,978 \times (A_{647} - A_{750}) - 4,895 \times (A_{664} - A_{750}) \quad (3)$$

#### 4.6 Análise de água

Após as coletas da água do experimento, foi feita a filtração da água para remoção de macropartículas e posterior análise dos nutrientes por colorimetria em um espectrofotômetro UV-visível HITACHI U-2900. O fosfato inorgânico presente na água foi analisado seguindo o protocolo proposto por Grasshoff *et al.* (1983). Esse método avalia a concentração de íons  $HPO_4^{2-}$  e  $PO_4^{3-}$ , por técnica colorimétrica,

utilizando-se espectrofotômetro. O método baseia-se na reação dos íons fosfato com o íon molibdato ((NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>MO<sub>7</sub>O<sub>24</sub>4H<sub>2</sub>O) em meio ácido, dando origem ao complexo fosfomolibdato, que é reduzido à um composto de coloração azul após a adição de ácido ascórbico (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>). A quantidade do complexo azul fosfomolibdênio formado é proporcional à concentração de fósforo presente nas amostras, podendo assim ser quantificado por espectrofotometria em 880 nm.

Os dados da análise de nutriente considerando o concentração de fosfato presente na água foram utilizados para calcular a eficiência na remoção (NUE), a taxa de absorção do nutriente da água (NUR) e o coeficiente k de uma função de decaimento exponencial ajustada para cinética de absorção.

Os valores de NUE foram obtidos avaliando as mudanças na concentração de PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> em função do tempo, conforme Equação. 4:

$$\text{NUE (\%)} = 100 - \left( \frac{C_{t+1} \times 100}{C_t} \right) \quad (4)$$

onde C<sub>t</sub> representa a concentração inicial e C<sub>t+1</sub> a concentração após o tempo t+1.

O NUR expressa a quantidade de nutriente absorvida por unidade de tempo por volume por peso seco da alga e também é determinado através das mudanças na concentração do nutriente, conforme Equação 5:

$$\text{NUR } (\mu\text{mol.g}^{-1} \text{ DW h}^{-1}) = \frac{(C_t \times V_t) - (C_{t+1} \times V_{t+1})}{B \times \Delta t} \quad (5)$$

V<sub>t</sub> representa o volume inicial (em L), C<sub>t+1</sub> a concentração após o t+1, V<sub>t+1</sub> o volume em t+1 (em L); B representa a massa seca usada (em gramas), e Δt o intervalo de tempo entre t e t+1 (em horas).

Para o cálculo do coeficiente k, os dados foram ajustados à uma função de decaimento exponencial adaptada, proposta por Nesan (2021), como segue na Equação 6:

$$Y = (Y_0 - P)e^{-kx} + P \quad (6)$$

Onde  $Y$  e  $Y_0$  são as concentrações final e inicial de nutrientes,  $P$  é a concentração mais baixa estimada pela absorção da alga,  $x$  o tempo (em horas) e  $k$  a constante da taxa de decaimento. O coeficiente  $k$  representa a eficiência da alga na remoção de nutrientes da água, ou seja, quanto maior o valor de  $k$ , mais rápido a concentração do nutriente diminui. Foram calculados para cada um dos oito tratamentos esses coeficientes, sendo assim obtida a informação da efetividade de uma variação no comprimento de onda promover uma determinada oscilação na resposta de interesse, nesse caso, a absorção de nutrientes. Os valores de  $k$  foram obtidos utilizando o Software KaleidaGraph 4.0. As representações gráficas foram feitas utilizando o Software OriginPro 2019.

#### 4.7 Análise estatística

Todos os parâmetros analisados tiveram seus dados sujeitos ao teste de normalidade de variância (Shapiro-Wilk). O efeito dos diferentes comprimentos de onda nos parâmetros analisados foi avaliado a partir de uma Análise de Variância unifatorial (fator: comprimento de onda).

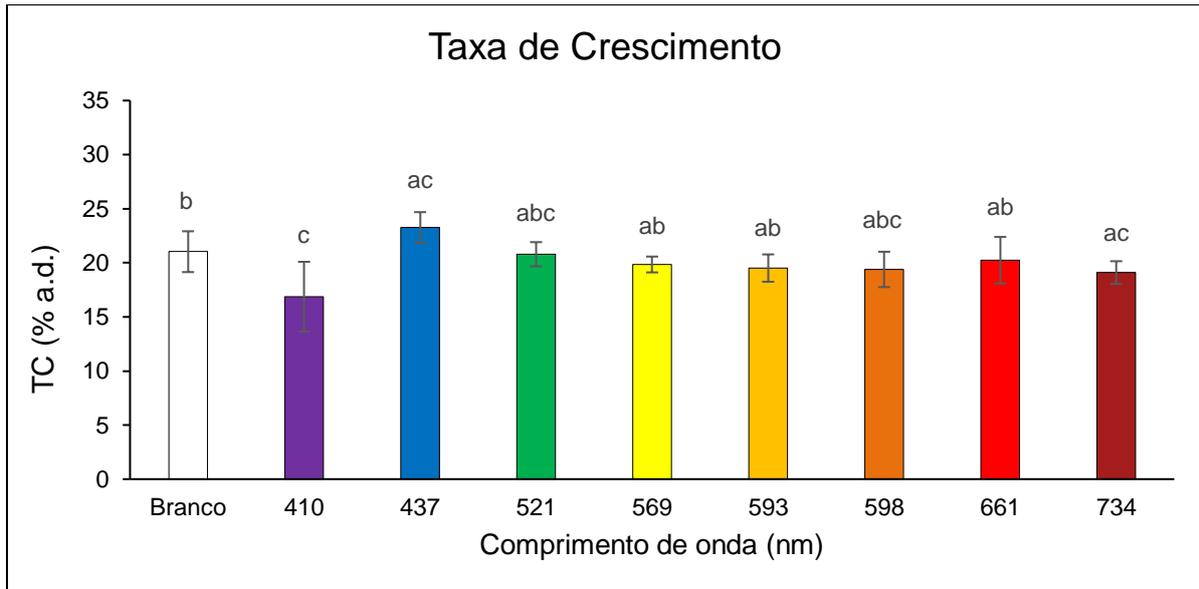
Quando encontrados efeitos significativos ( $p < 0,05$ ), um teste *a posteriori* de Newman-Keuls foi realizado. Além disso, as variáveis dependentes analisadas foram relacionadas por meio do teste de correlação de Pearson. Para as análises estatísticas foi utilizado o Software Statistica 7.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Taxa de crescimento

A taxa de crescimento diário apresentou diferença significativa para o fator comprimento de onda (ANOVA:  $p = 0,003$ ) (Tabela 1). Os valores variaram entre  $16,8 \pm 1,4$  e  $23,2 \pm 1,1\%$  dia<sup>-1</sup>. O tratamento utilizando 437 nm obteve a maior taxa após os sete dias quando comparados ao controle. Já o tratamento com 410 nm foi o que apresentou a menor taxa (Figura 5).

Figura 5. Taxa de crescimento após 7 dias de cultivo. A cor das barras representa a cor dos LEDs. As letras acima da barra de desvio padrão indicam diferença significativa entre os tratamentos.



Fonte: Autor (2024)

Tabela 1: Resumo da ANOVA comparando os parâmetros avaliados em função dos diferentes comprimentos de onda. Parâmetros com diferenças significativas entre os tratamentos estão em negrito ( $p < 0,05$ ).

	NUE	TC	Clorofila a	Clorofila b	k	NUR
p	<b>0,000</b>	<b>0,003</b>	0,640	0,677	<b>0,003</b>	<b>0,000</b>
F	14,230	4,612	0,761	0,714	4,715	6,048

Os valores do ganho de biomassa apresentaram diferença significativa entre os tratamentos (ANOVA:  $p = 0,00$ ,  $F = 5,71$ ) e foram obtidos em maior magnitude no tratamento com 437 nm e menores valores em 410 nm ( $0,120 \pm 0,011$  e  $0,073 \pm 0,003$  g DW, respectivamente) como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Ganho de biomassa (gramas de peso seco) e desvio padrão em cada um dos comprimentos de onda. As letras sobrescritas aos valores representam a correlação entre os tratamentos.

	Ganho biomassa (g)
Branco	$0,106 \pm 0,017$ <sup>a</sup>
410	$0,073 \pm 0,003$ <sup>c</sup>
437	<b><math>0,120 \pm 0,011</math></b> <sup>abc</sup>
521	$0,112 \pm 0,012$ <sup>ab</sup>
569	$0,099 \pm 0,009$ <sup>ab</sup>
593	$0,108 \pm 0,011$ <sup>ab</sup>
598	$0,091 \pm 0,007$ <sup>ab</sup>

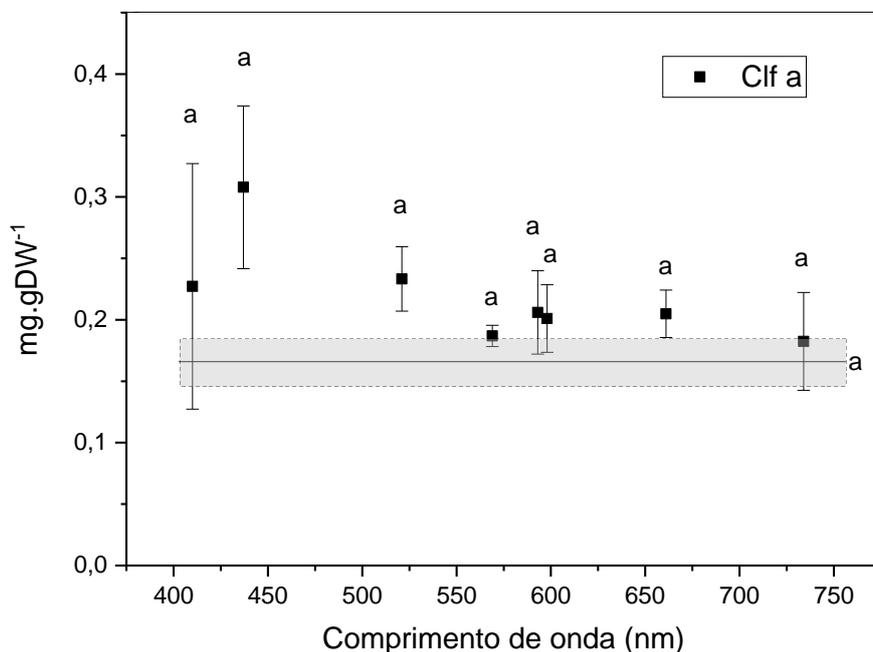
661	0,111 ± 0,008 <sup>ab</sup>
734	0,110 ± 0,018 <sup>bc</sup>

Fonte: Autor (2024)

## 5.2 Clorofila

Os dados da análise de clorofila a e b não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos (ANOVA:  $p=0,38$ ,  $F=1,14$  e  $p=0,50$ ,  $F=0,94$  respectivamente). Todos os comprimentos de onda obtiveram numericamente, valores maiores de teor do pigmento se comparados ao controle, com valores máximos chegando a  $0,30 \pm 0,66 \text{ mg.g DW}^{-1}$  (Figura 6).

Figura 6. Valores médios de clorofila obtidos por análise espectrofotométrica de varredura com desvio padrão. Média do LED branco representado pela linha preta horizontal e desvio padrão pela faixa cinza. As letras acima da barra de desvio padrão indicam diferença significativa entre os tratamentos



Fonte: O Autor (2024)

Observou-se uma relação inversa de proporcionalidade entre o comprimento de onda e as clorofilas a e b, uma vez que os tratamentos com picos de emissão em regiões mais próximas do início do espectro da luz visível foram os que apresentaram maior teor das clorofilas.

### 5.3 Análise de água

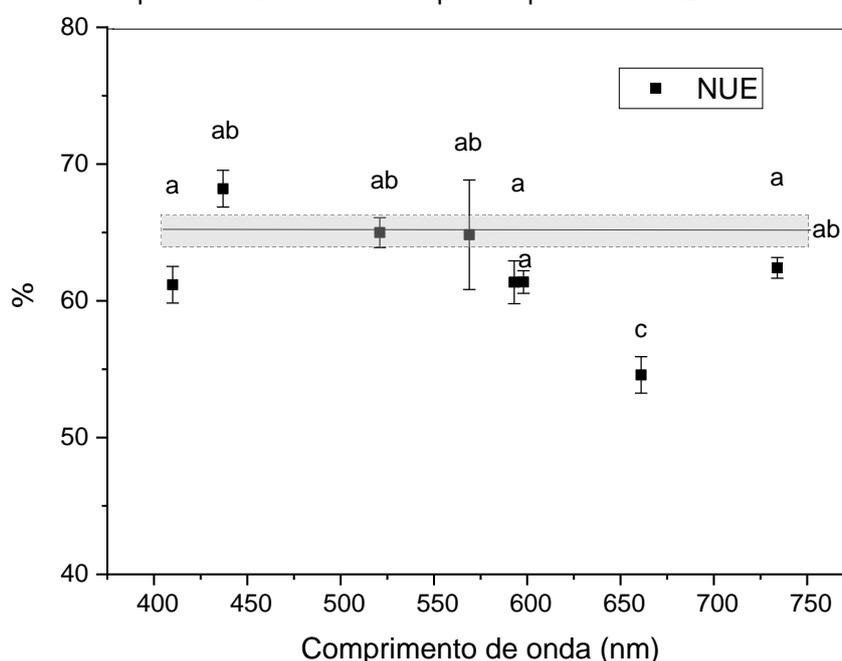
Durante os primeiros 15 minutos de exposição houve uma redução abrupta na quantidade de fósforo total na água, onde todos os tratamentos tiveram mais de 40% do nutriente presente inicialmente na água consumido. Os valores da porcentagem de  $\text{PO}_4^{3-}$  consumido nos primeiros instantes não apresentou diferença significativa entre os grupos ( $p = 0,70$ ,  $F = 0,67$ ). Essa redução variou entre  $42,9 \pm 2\%$  e  $50,1 \pm 1,77$ , conforme Tabela 3.

Tabela 3. Porcentagem de  $\text{PO}_4^{3-}$  retirado da água por *Ulva* sp. ao longo do experimento em cada um dos comprimentos de onda. Valores observados nos primeiros 15 minutos em negrito. Letras acima dos valores indicam diferença significativa entre os tratamentos.

Tempo	410	437	521	569	593	598	661	734	Branco
15	<b>46,6 ± 0,4<sup>a</sup></b>	<b>49,2 ± 0,5<sup>a</sup></b>	<b>42,9 ± 1,8<sup>a</sup></b>	<b>47,5 ± 1,3<sup>a</sup></b>	<b>45,7 ± 2,0<sup>a</sup></b>	<b>48,6 ± 1,2<sup>a</sup></b>	<b>47,7 ± 1,7<sup>a</sup></b>	<b>48,6 ± 0,6<sup>a</sup></b>	<b>50,1 ± 2,0<sup>a</sup></b>
30	50,6 ± 0,6	49,7 ± 0,2	43,0 ± 1,9	50,8 ± 2,4	47,7 ± 3,0	49,8 ± 2,3	48,3 ± 2,3	50,0 ± 1,0	50,5 ± 1,2
60	50,7 ± 1,6	51,2 ± 0,8	47,9 ± 1,8	51,5 ± 2,4	49,3 ± 2,9	51,1 ± 1,7	50,4 ± 2,3	51,9 ± 1,7	53,0 ± 1,5
120	55,2 ± 3,4	54,8 ± 0,9	49,7 ± 1,9	53,7 ± 1,2	51,4 ± 1,5	51,5 ± 1,7	51,0 ± 2,1	53,4 ± 1,6	55,2 ± 1,5
240	58,2 ± 2,5	55,0 ± 1,3	52,1 ± 0,8	59,2 ± 1,3	55,9 ± 3,4	55,1 ± 3,7	52,2 ± 0,9	55,2 ± 1,6	59,1 ± 3,3
1440	61,2 ± 2,8	68,2 ± 1,3	65,0 ± 3,3	64,8 ± 0,5	61,4 ± 2,8	61,4 ± 3,9	54,6 ± 2,6	62,4 ± 2,9	65,3 ± 3,6

Os valores de NUE após as 24h apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos (ANOVA:  $p=0,000$  e  $F=14,23$ ) e variaram entre  $54,6 \pm 1,3$  e  $68,2 \pm 1,3\%$ , nos tratamentos 661 nm e 437 nm respectivamente (Figura 7).

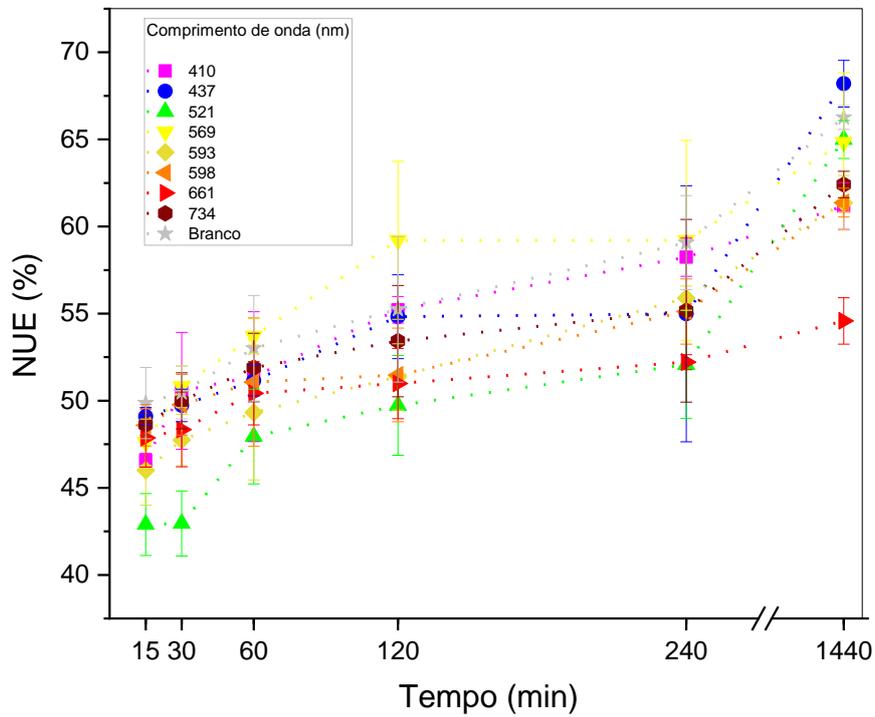
Figura 7. Valores de NUE após 24h de experimento. Média do LED branco representado pela linha preta horizontal e desvio padrão pela faixa cinza.



Fonte: O Autor (2024)

A Figura 8 mostra como os valores de NUE variaram ao longo do tempo até as 24h.

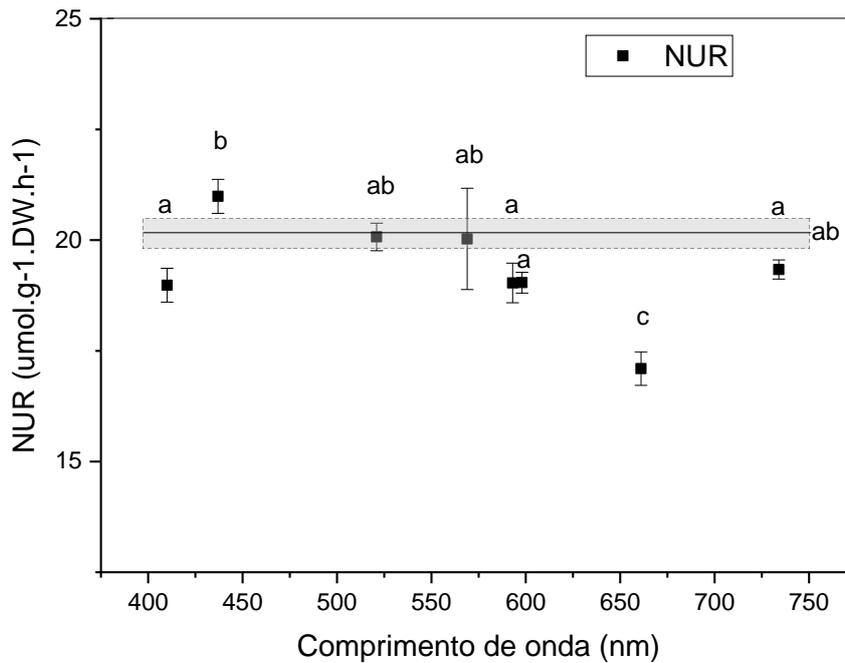
Figura 8. Valores de NUE para cada tempo de coleta, até 24h de experimento. A cor das linhas representa a cor dos LEDs.



Fonte: O Autor (2024)

Os valores de NUR apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos (ANOVA:  $p = 0,00$ ,  $F = 6,06$ ) variando entre  $15,24 \pm 1,15$  e  $22,62 \pm 0,9$   $\mu\text{mol.g}^{-1}.\text{DW.h}^{-1}$  (Figura 9).

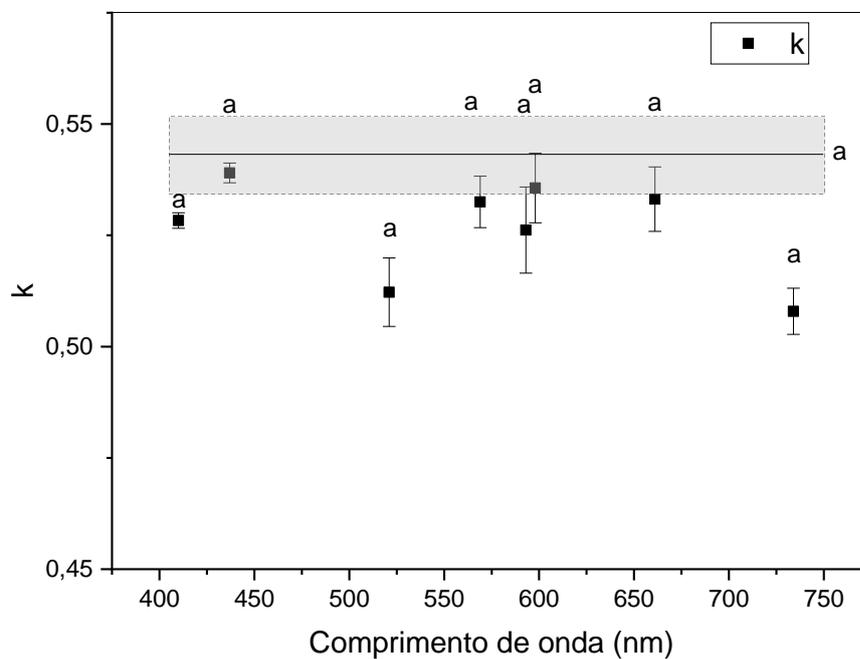
Figura 9. Valores de NUR após 24h de experimento. Média do LED branco representado pela linha preta horizontal e desvio padrão pela faixa cinza.



Fonte: O Autor (2024)

O coeficiente  $k$  variou entre  $0,543 \pm 0,009$  e  $0,507 \pm 0,052$  para o controle e 734 nm, respectivamente, e não apresentou diferença significativa entre os tratamentos.

Figura 10. Valores do coeficiente de decaimento exponencial ( $k$ ) após 24h de experimento. Média do LED branco representado pela linha preta horizontal e desvio padrão pela faixa cinza.



#### 5.4 Análise estatística

Como apresentado anteriormente, foi feita uma Análise de Variância unifatorial para o fator comprimento de onda, tendo sido obtido os valores de diferenças significativas que constam na Tabela 4.

A análise de correlação de Pearson indicou que o NUR se correlacionou positivamente com o NUE ( $r = 1,00$ ). A clorofila a apresentou correlação positiva com a clorofila b ( $r = 0,99$ ). Já os valores de k e de Taxa de crescimento não apresentaram correlação significativa com nenhum dos outros parâmetros analisados (Tabela 4).

Tabela 4: Valores da Análise de Correlação de Pearson obtidos entre variáveis dependentes após exposição da alga em diferentes comprimentos de onda. Os tratamentos com correlação significativa são apresentados em negrito ( $p < 0,05$ ). Variáveis dependentes: Eficiência na remoção de nutriente (NUE), Taxa de crescimento (TC), Clorofilas a e b (Clf a, b), Coeficiente de decaimento exponencial do nutriente (k) e Taxa de absorção de nutrientes (NUR).

	NUE	TC	Chl a	Chl b	k	NUR
NUE		0,27	0,02	0,09	-0,15	<b>1,00</b>
TC			-0,15	-0,10	0,02	0,27
Chl a				<b>0,99</b>	-0,10	0,02
Chl b					-0,12	0,09
k						-0,15
NUR						
GB						

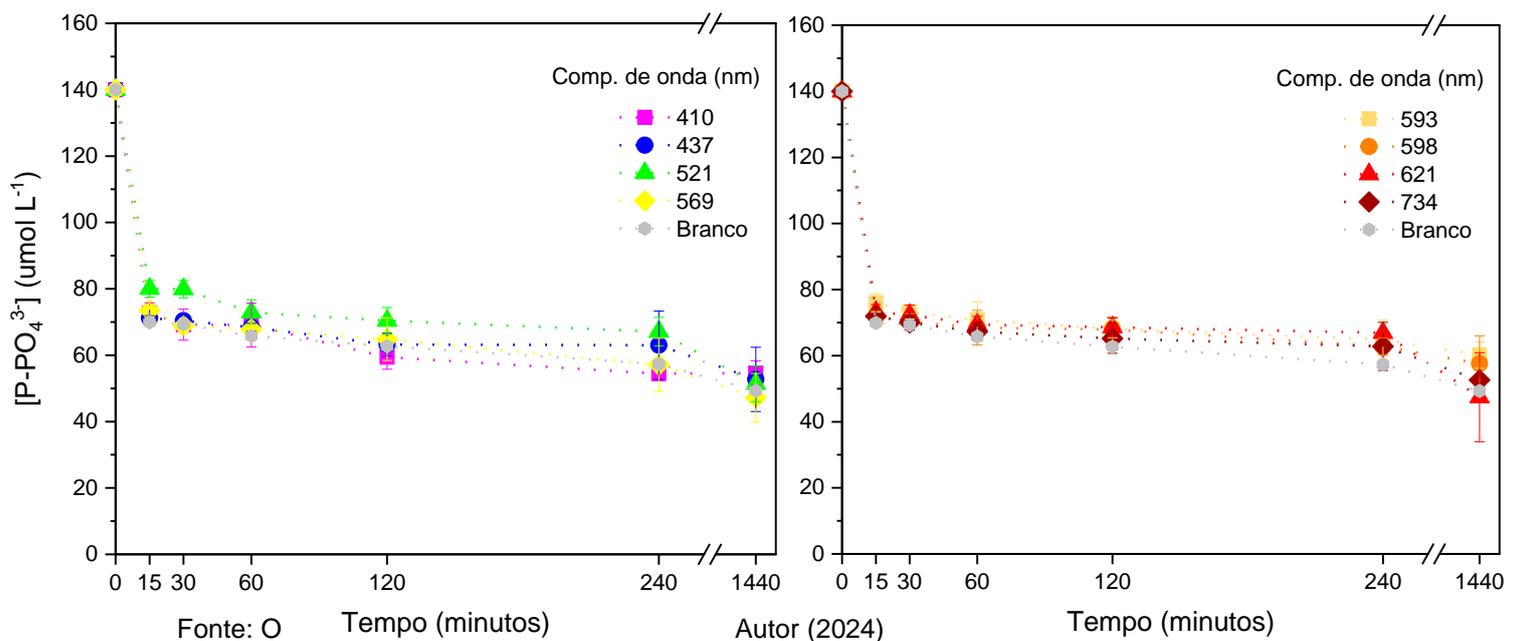
## 6 DISCUSSÃO

O comprimento de onda que apresentou numericamente resultados mais expressivos considerando todos os parâmetros analisados foi o de 437 nm, que obteve uma maior eficiência na remoção de nutrientes, e taxa de crescimento. Tendo isso em vista, pode-se inferir que comprimentos de onda mais energéticos (azul e verde) geram respostas biológicas de maior magnitude em detrimento dos com menor energia associada, o que pode ser indicativo de preferência da alga em crescer em regiões mais superficiais nos ambientes naturais de ocorrência. Já os menores valores, no geral, foram observados no comprimento de onda de 410 nm, o que pode ter como explicação, seu pico de emissão se encontrar no limite inferior

da PAR (400 a 750 nm), sendo assim um espectro de luz monocromática ineficiente na indução de respostas fisiológicas.

O decaimento abrupto na quantidade de nutrientes da água nos primeiros 15 minutos também foi observado no estudo feito por Salvi *et al.* (2021). As mudanças na concentração do nutriente apresentaram um padrão notável, compartilhado por todos os comprimentos de onda, tendo sido observado um decréscimo expressivo nos momentos iniciais do experimento (Figura 11).

Figura 11. Mudanças na concentração de  $\text{PO}_4^{3-}$  na água em 15, 30, 60, 120, 240 e 1440 minutos de exposição. Os marcadores representam cada um dos comprimentos de onda com valores da média  $\pm$  desvio padrão.



Como mostra a Tabela 3, mesmo não havendo sido encontradas diferenças significativas entre os tratamentos (ANOVA:  $p = 0,78$ ,  $F = 0,581$ ), o controle obteve, numericamente, uma maior absorção nos primeiros 15 minutos ( $50,1 \pm 1,2\%$ ). Isso pode ser interpretado como uma resposta das algas à mudança nas condições de cultivo, visto que já estavam sendo expostas à essa qualidade luminosa, com os fotorreceptores adaptados e cascata biológica já ajustada para que a absorção da luz se tornasse efetivamente uma resposta, como observado por Dickson *et al.* (1982), que avaliou a adaptação osmótica e absorção de nutrientes em *Ulva lactuca*. Complementando essa observação, Runcie *et al.* (2004) constataram que as condições de aclimatação podem ter influenciado no rápido consumo de nutrientes,

após avaliar a cinética de absorção de P com variações quantitativas e temporais de enriquecimento do nutriente.

Os maiores teores de clorofila em comprimentos de onda menores corroboram com o que foi observado por Eismann (2020), que avaliou essa resposta em função da exposição à diferentes qualidades de fonte luminosa e obteve como resultado um maior teor de clorofilas a e b nas cores azul e verde. Lin *et al.* (2011) obteve valores de clorofila a entre  $0,199 \pm 0,052$  e  $0,684 \pm 0,116$  mg/gDW<sup>-1</sup> para luzes verde e verde escuro respectivamente, o que vai de encontro à faixa de valores obtidos nesse estudo (de  $0,166 \pm 0,019$  à  $0,307 \pm 0,066$ ). Zhao *et al.* (2016) também avaliou o conteúdo pigmentar em *Ulva* sp., nesse caso em diferentes camadas da coluna d'água (superfície ao fundo), que apresentou valores entre  $0,12 \pm 0,03$  para camadas superficiais e  $0,21 \pm 0,02$  mg/gDW<sup>-1</sup> para camadas mais profundas, o que pode ser associado à variação da qualidade da radiação, devido à diferente penetração da luz na água em cada um dos comprimentos de onda. Smith (1989) constatou que algas sésseis, sujeitas a variações no regime de maré, estado da água e transparência da atmosfera, podem desenvolver mecanismos de adaptabilidade que permitem às algas maximizarem a captura de energia para que seja mantida a efetividade fotossintética sob diferentes condições de luz.

A taxa de crescimento diário apresentou uma pequena variação, na qual pôde ser observada uma tendência inversamente proporcional aos comprimentos de onda, similar ao observado por Le *et al.* (2018), que obteve maiores valores para *Ulva* spp. quando cultivadas em luz de LED monocromática azul ( $12,13$  % dia<sup>-1</sup>) em detrimento às cultivadas em LED vermelho ( $10,12$  % dia<sup>-1</sup>). Gong *et al.* (2020) também relatam uma maior contribuição para a taxa de crescimento do LED azul quando comparado com o vermelho, corroborando com a suposição de que comprimentos de onda menores e mais energéticos (a partir da região do azul) são mais eficazes para o crescimento da alga. Estes estudos fornecem um respaldo importante, demonstrando que processos podem ser fotorregulados em *Ulva* sp., entretanto, apenas o tratamento com 437 nm apresentou valores acima do controle, o que indica que comprimentos de onda maiores podem não ser uma alternativa interessante para otimização das condições de cultivo que favorecem o crescimento.

Pimputka *et al.* (2009) avaliaram o rendimento energético de LEDs monocromáticos e observaram uma maior eficiência teórica para as cores azul e amarelo em detrimento às demais, considerando também o branco. Schubert *et al.*

(2005) descobriram que LEDs monocromáticos geralmente consomem menos energia para produzir a mesma quantidade de luz devido à ausência de perda na conversão das cores, uma vez que os de cor branca são produzidos pela integração de todas as outras cores. Tendo em vista esses resultados, os LEDs monocromáticos podem ser alternativas interessantes para redução de custo em cultivos laboratoriais sem prejuízo às respostas fisiológicas das algas.

Muitos outros estudos avaliaram parâmetros similares aos analisados nesse trabalho em *Ulva* spp., no entanto, a comparação entre os resultados obtidos é prejudicada por conta das condições de cultivo durante o experimento, as quais possuem fatores de influência diferentes, como a concentração e fonte de nutrientes, estado e densidade das algas, tempo de incubação, fluxo de água ou tipo de substrato (Runcie *et al.* 2003; Lubsch *et al.* 2018; Salvi *et al.* 2021, Chunrong *et al.* 2004; Wang *et al.* 2019).

## 7 CONCLUSÕES

O estudo sugere que comprimentos de onda mais energéticos (a partir de 437 nm) geram respostas fisiológicas de mesma intensidade ou até mais expressivas quando comparadas ao controle com LEDs brancos, tendo sido observada uma maior redução de fosfato na água e taxa de crescimento sob 437 nm, associados à maior NUE e taxa de absorção de nutrientes (NUR) quanto aos fosfatados. Os teores de pigmentos permaneceram estatisticamente similares entre os tratamentos, indicando que a qualidade da luz não foi significante na produção de pigmentos, mas influenciou outros processos biológicos.

No entanto, algumas limitações devem ser consideradas. A pesquisa foi conduzida em laboratório e pode não representar precisamente o ambiente natural onde a alga ocorre. Estudos futuros devem considerar a influência de fatores como a variação da intensidade luminosa, de temperatura, perdas por evaporação ou então disponibilidade de outros nutrientes, além de incluir experimentos em ambientes mais próximos da realidade para que possa ser validada a aplicabilidade dos resultados obtidos nesse estudo em cultivos de maior escala.

Em resumo, os resultados apresentados indicam que a utilização de espectros monocromáticos de comprimentos mais curtos (dentro da PAR) podem ser uma ferramenta interessante para otimizar e acelerar processos biológicos em *Ulva*

sp., oferecendo a oportunidade para melhorar a eficiência da produção e cultivo, além de poderem diminuir o gasto com energia elétrica. Esse estudo contribui para o entendimento das interações dos diferentes comprimentos de onda dentro da PAR e respostas fisiológicas da *Ulva* sp.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNON, Daniel I.. The discovery of photosynthetic phosphorylation. **Trends In Biochemical Sciences**, v. 9, n. 6, p. 258-262, 1984. Elsevier BV.

Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0968-0004\(84\)90159-2](http://dx.doi.org/10.1016/0968-0004(84)90159-2). Acesso em: 17/02/2023

ALE, Marcel Tutor; MIKKELSEN, Jørn Dalgaard; MEYER, Anne S.. Differential growth response of *Ulva lactuca* to ammonium and nitrate assimilation.

**Journal Of Applied Phycology**, v. 23, n. 3, p. 345-351, 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-010-9546-2>

BJÖRN, L., and Govindjee. The Evolution of Photosynthesis and Chloroplasts.

**Current Science**, v. 96, n. 11, p. 1466–74, 2009. Disponível em:

<http://www.jstor.org/stable/24104775>. Acesso em: 30/03/2023.

BARUFI, J.; FIGUEROA, F.; PLASTINO, E. Effects of light quality on reproduction, growth and pigment content of *Gracilaria birdiae* (Rhodophyta: Gracilariales). **Sci.** v. 79, n.1, p.15-24, 2015. Acesso em: 02/03/2023.

CARMONA, R.; VERGARA, J.; LAHAYE, M.; NIELL, F. Light quality affects morphology and polysaccharide yield and composition of *Gelidium sesquipedale* (Rhodophyceae). **Journal Of Applied Phycology**, v. 10, n. 3, p. 323-332, 1998. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1023/a:1008042904972>. Acesso em: 30/03/2023.

CARNEIRO, V.. **Estudos morfológicos e moleculares do gênero *Ulva* L. (Ulvaceae, Chlorophyta) no sudeste do Brasil**. 195 f. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências, 2021.

Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41132/tde-14082021-150524/publico/Victor\\_Carneiro\\_CORRIG.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41132/tde-14082021-150524/publico/Victor_Carneiro_CORRIG.pdf). Acesso em: 17/02/2023.

EDWARDS, P. Illustrated guide to the seaweeds and sea grasses in the vicinity of Porto Aransas, Texas. **Contributions in Marine Science**, v.15, p. 1-228, 1976. Acesso em: 02/03/2023.

EISMANN, Alejandra Irina; REIS, Renata Perpetuo; SILVA, Anita Ferreira da; CAVALCANTI, Diana Negrão. Ulva spp. carotenoids: responses to environmental conditions. *Algal Research*, v. 48, p. 101916, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2020.101916>. Acesso em 02/04/2024.

ENGELMANN, T. Ueber Sauerstoffausscheidung von Pflanzenzellen im Mikrospectrum. **Botanische Zeitung**: v. 40, p. 663-669, 1882. Acesso em: 08/03/2023.

DRING, M.; Lüning K. Induction of two-dimensional growth and hair formation by blue light in the brown alga *Scytosiphon lomentaria*. **Z. Pflanzenphysiol. Bd.** v. 75, p.107-117, 1973. Acesso em: 19/03/2023.

FIGUEROA, F.; AGUILERA, J.; NIELL, F.. Red and blue light regulation of growth and photosynthetic metabolism in *Porphyra umbilicalis* (L.) Kützing (Bangiales, Rhodophyta). *Eur. J. Phycol.* v. 30: p. 11-18, 1995. Acesso em: 15/04/2023.

FIGUEROA, F.; GÓMEZ, F.; BARUFI, J.; VEGA, J.; MASSOCATO, T.; PINCHETTI, J.; KORBEE, N. Interactive effects of solar radiation and inorganic nutrients on biofiltration, biomass production, photosynthetic activity, and the accumulation of bioactive compounds in *Gracilaria cornea* (Rhodophyta). **Algal Res.**, v. 68, 2022 .Acesso em: 02/04/2023.

FRANKLIN, L.; KRÄBS, G.; KUHLENKAMP, R. Blue light and UVA radiation control the synthesis of mycosporine-like amino acids in *Chondrus crispus*

(Florideophyceae). **Phycol, J.** v. 37: p. 257-270, 2001. Acesso em: 14/04/2023.

FONSECA, A. L. D.; BRAGA, E. S.; EICHLER, B. B. Distribuição espacial dos nutrientes inorgânicos dissolvidos e da biomassa fitoplanctônica no sistema pelágico da Lagoa da Conceição; Santa Catarina, Brasil. *Atlântica, Rio Grande*, v. 24, n. 2, p. 69-83, 2000. Acesso em: 17/02/2023.

GONG, Jingyu; LIU, Zhiwei; ZOU, Dinghui. Growth and photosynthetic characteristics of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) and *Ulva lactuca* (Chlorophyta) cultured under fluorescent light and different LED light. *Journal Of Applied Phycology*, v. 32, n. 5, p. 3265-3272, 3 jun. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-020-02151-y>. Acesso em: 13/04/2024.

GUIMARÃES, M. **Aspectos fisiológicos de *Gracilaria domingensis* (Gracilariales, Rhodophyta): subsídios para a compreensão da manutenção do polimorfismo pigmentar.** 2000. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Acesso em: 30/03/2023.

HANELT, D.; FIGUEROA, F.. Physiological and Photomorphogenic Effects of Light on Marine Macrophytes. **Ecological Studies**, p. 3-23, 2012. Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-28451-9\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-28451-9_1). Acesso em: 27/03/2023.

HASAN, M.; BASHIR, T.; GHOSH, R.; LEE, S.; BAE, H. An overview of LEDs' effects on the production of bioactive compounds and crop quality. **Molecules**, v. 22(9), p. 1–12, 2017. Acesso em: 17/02/2023.

HAXO, F. T.; BLINKS, L. R.. PHOTOSYNTHETIC ACTION SPECTRA OF MARINE ALGAE. **Journal Of General Physiology**, v. 33, n. 4, p. 389-422, 20 mar. 1950. Rockefeller University Press. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1085/jgp.33.4.389>. Acesso em: 01/03/2023.

KLUGE, R.; ULIANA, Jaqueline V.; SILVA, Paula P. M. da. Physiological and Environmental Aspects of Photosynthesis. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 56-73, 2015. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20150004>. Acesso em: 11/01/2023.

LE, Bao; SHIN, Jong-Am; KANG, Man-Gu; SUN, Sangmi; YANG, Seung Hwan; CHUNG, Gyuhwa. Enhanced growth rate and ulvan yield of *Ulva pertusa* using light-emitting diodes (LEDs). *Aquaculture International*, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 937-946, 27 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10499-018-0260-4>. Acesso em: 02/04/2024.

LIGNELL, Å., PEDERSÉN, M. Agar Composition as a Function of Morphology and Growth Rate. Studies on Some Morphological Strains of *Gracilaria secundata* and *Gracilaria verrucosa* (Rhodophyta). **Botm**, v. 32, n. 3, p. 219-228, 1989. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1515/botm.1989.32.3.219>. Acesso em: 02/02/2023.

LIGNELL, A., PERDESÉN, M. Agar composition as function of morphology and growth rate. Studies on some morphological strains of *Gracilaria secundata* and *Gracilaria verrucosa* (Rhodophyta), **Bot. Mar.** v. 32, p. 219–227, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/botm.1989.32.3.219>. Acesso em: 08/03/2023.

LIN, Apeng; SHEN, Songdong; WANG, Guangce; YI, Qianqian; QIAO, Hongjin; NIU, Jianfeng; PAN, Guanghua. Comparison of Chlorophyll and Photosynthesis Parameters of Floating and Attached *Ulva prolifera*. *Journal Of Integrative Plant Biology*, v. 53, n. 1, p. 25-34, 30 nov. 2010. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.01002.x>. Acesso em: 02/04/2024.

LIN, Apeng; SHEN, Songdong; WANG, Guangce; YI, Qianqian; QIAO, Hongjin; NIU, Jianfeng; PAN, Guanghua. Comparison of Chlorophyll and Photosynthesis Parameters of Floating and Attached *Ulva prolifera*. **Journal Of Integrative Plant Biology**, v. 53, n. 1, p. 25-34, 30 nov. 2010. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.01002.x>

FIGUEROA, F. Red, blue and green photoreceptors controlling chlorophyll, biliprotein and total protein synthesis in the red alga *Chondrus crispus*. Br. **Phycol. J.** v. 26: p. 383-392, 1991. Acesso em: 21/01/2023.

LUBSCH, Alexander; TIMMERMANS, Klaas. Uptake kinetics and storage capacity of dissolved inorganic phosphorus and corresponding N: p dynamics in *Ulva lactuca* (Chlorophyta). *Journal Of Phycology*, v. 54, n. 2, p. 215-223, 16 jan. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jpy.12612>. Acesso em: 13/04/2024.

LÜNING, K.; DRING, M.J. The influence of light quality on the development of the brown algae *Petalonia* and *Scytosiphon*. Br. **Phycol. J.** v. 8: p. 333-338, 1973. Acesso em: 02/02/2023.

LÜNING, K.. Day and night kinetics of growth rate in green, brown and red seaweeds. **J. Phycol.** v. 28: p. 794-803, 1992. Acesso em: 02/02/2023.

LÜNING, K.; DRING, M.J. Action spectra and spectral quantum yield of photosynthesis in marine macroalgae with thin and thick thalli. **Mar. Biol.** v. 87: p. 119-129, 1985. Acesso em: 02/02/2023.

MANTRI, Vaibhav A.; KAZI, Mudassar Anisoddin; BALAR, Nikunj B.; GUPTA, Vishal; GAJARIA, Tejal. Concise review of green algal genus *Ulva* Linnaeus. *Journal Of Applied Phycology*, v. 32, n. 5, p. 2725-2741, 26 jun. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-020-02148-7>. Acesso em: 03/04/2024.

MASSOCATO, T. F., ROBLES, V., MOREIRA, B. R., VARELA, P., SILVA, L., OLIVEIRA, W. D. S., & FIGUEROA, F. D. L. . Growth, biofiltration and photosynthetic performance of *Ulva* sp. cultivated in fishpond effluents: An outdoor study. **Frontiers in Marine Science**. 2022. Acesso em: 02/04/2023.

MASSOCATO, T.F., ROBLES, V., VEGA, J. *et al.* Short-term nutrient removal efficiency and photosynthetic performance of *Ulva pseudorotundata* (Chlorophyta): potential use for Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA). **J Appl Phycol** v. 35, p. 233–250, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s10811-022-02888-8>. Acesso em: 08/03/2023.

MOREIRA, C. Pigmentos fotossintéticos. **Rev. Ciência Elem.**, v. 2(03): p.197, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.24927/rce2014.197>. Acesso em: 06/04/2023.

ORTEGA J.; SNOEIJIS P.; ROBLEDO D. Growth and pigment composition in the red alga *Halymenia floresii* cultured under different light qualities. **J. Appl. Phycol.** v. 20: p. 253-260, 2008. Acesso em: 03/12/2022.

PANG, S.; LIU, Feng; SHAN, T.; XU, N.; ZHANG, Z.; GAO, S.; CHOPIN, T.; SUN, S.. Tracking the algal origin of the *Ulva* bloom in the Yellow Sea by a combination of molecular, morphological and physiological analyses. **Marine Environmental Research**, v. 69, n. 4, p. 207-215, maio 2010. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.10.007>. Acesso em: 11/02/2023.

PIMPUTKA, S., SPECK, J. S., DENBAARS, S. P., & NAKAMURA, S.. Prospects for LED lighting. **Nature Photonics**, v. 3(4), p. 180-182, abril 2009. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nphoton.2009.32>. Acesso em: 04/04/2024.

RAMANNA, L.; RAWAT, I.; BUX, F. Light enhancement strategies improve microalgal biomass productivity. **Renew Sustain Energy Rev**, 2017. 80: p..765-773. Acesso em: 17/02/2023.

RITCHIE, Raymond J.. Consistent Sets of Spectrophotometric Chlorophyll Equations for Acetone, Methanol and Ethanol Solvents. **Photosynthesis Research**, v. 89, n. 1, p. 27-41, 9 jun. 2006. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11120-006-9065-9>. Acesso em: 11/02/2023.

RUNCIE, John W.; RITCHIE, Raymond J.; LARKUM, Anthony W.D.. Uptake kinetics and assimilation of inorganic nitrogen by *Catenella nipae* and *Ulva lactuca*. *Aquatic Botany*, v. 76, n. 2, p. 155-174, jun. 2003. Elsevier BV.

[http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3770\(03\)00037-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3770(03)00037-8). Acesso em: 13/04/2024.

SALVI, K.; OLIVEIRA, W.; HORTA, P.; RÖRIG, L.; BASTOS, E. A new model of Algal Turf Scrubber for bioremediation and biomass production using seaweed aquaculture principles. **Journal Of Applied Phycology**, v. 33, n. 4, p. 2577-2586, 16 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-021-02430-2>. Acesso em: 17/11/2022.

SCHUBERT, E. Fred; KIM, Jong Kyu. Solid-State Light Sources Getting Smart. *Science*, [S.L.], v. 308, n. 5726, p. 1274-1278, 27 maio 2005. **American Association for the Advancement of Science (AAAS)**. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1108712>. Acesso em: 05/05/2024.

SERRANO, A., LOSADA, M. Action spectra for nitrate and nitrite assimilation in blue-green algae. **Plant Physiol.** 1988; 86(4):1116-9. doi:10.1104/p.86.4.1116.

SMITH, Gilbert M.. On the reproduction of some pacific coast species of *Ulva*. **American Journal Of Botany**, v. 34, n. 2, p. 80-87, fev. 1947. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1537-2197.1947.tb12961.x>. Acesso em: 13/02/2023.

SMITH, Richard L.; Institute Of Mathematical Statistics. Extreme Value Analysis of Environmental Time Series: An Application to Trend Detection in Ground-Level Ozone. **Statistical Science**, Michigan, v. 4, n. 4, p. 367-377, nov. 1989. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2245845>. Acesso em: 13/05/2024.

TSEKOS, I.; NIELL, F.X.; AGUILERA, J. Ultrastructure of the thallus stage of *Porphyra leucosticta* (Rhodophyta) grown in red, blue and green light. **Phycol. Res.** v. 50: p. 251-264, 2002. Acesso em: 25/11/2022.

TONETTO, A.. **Efeitos da irradiância e da composição espectral da luz sobre o estabelecimento e desenvolvimento de comunidades de macroalgas lólicas em substratos artificiais**. 55 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/87902>. Acesso em: 11/01/2023.

VIAROLI, P.; BARTOLI, M.; BONDAVALLI, C.; CHRISTIAN, R.; GIORDANI, G.; NALDI, M. Macrophyte communities and their impact on benthic fluxes of oxygen, sulphide and nutrients in shallow eutrophic environments. **Coastal Lagoon Eutrophication And Anaerobic Processes** (C.L., p. 105-119, 1996. Springer Netherlands. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-1744-6\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-1744-6_9). Acesso em: 09/01/2023.

YANG, Y.; WEATHERS, P. Red light and carbon dioxide differentially affect growth, lipid production, and quality in the microalga, *Ettlia oleoabundans*. **Appl. Microbiol. Biotechnol.** v. 99: p.489-499, 2015. Acesso em: 25/11/2022.

ZHAO, Xinyu; TANG, Xuexi; ZHANG, Huanxin; QU, Tongfei; WANG, Ying. Photosynthetic adaptation strategy of *Ulva prolifera* floating on the sea surface to environmental changes. *Plant Physiology And Biochemistry* v. 107, p. 116-125, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.036>. Acesso em: 13/04/2024.