

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA VEGETAL

FABRÍCIO BRONZONI DE OLIVEIRA

**PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA FITOPLANCTÔNICA SUBMETIDA A
DIFERENTES QUALIDADES ESPECTRAIS DA LUZ**

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Valéria de Oliveira Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Stéfano Zorzal de Almeida

Vitória, ES

2020

FABRÍCIO BRONZONI DE OLIVEIRA

**PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA FITOPLANCTÔNICA SUBMETIDA A
DIFERENTES QUALIDADES ESPECTRAIS DA LUZ**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Biologia Vegetal.

Orientadora: Valéria de Oliveira Fernandes

Coorientador: Stéfano Zorzal de Almeida

Vitória, ES

2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

B869p Bronzoni de Oliveira, Fabrício, 1993-
PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA FITOPLANCTÔNICA
SUBMETIDA A DIFERENTES QUALIDADES ESPECTRAIS
DA LUZ / Fabrício Bronzoni de Oliveira. - 2020.
58 f. : il.

Orientadora: Valéria de Oliveira Fernandes.

Coorientador: Stéfano Zorzal de Almeida.

Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais.

1. Produtividade primária. 2. Primary production. I. de Oliveira Fernandes, Valéria. II. Zorzal de Almeida, Stéfano. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Humanas e Naturais. IV. Título.

CDU: 57

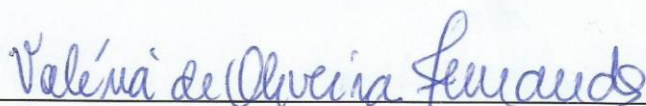
Fabício Bronzoni de Oliveira

“Produtividade primária fitoplanctônica submetida a diferentes qualidades espectrais da luz”.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais, da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Biologia Vegetal.

Aprovada em 03 de março de 2020.

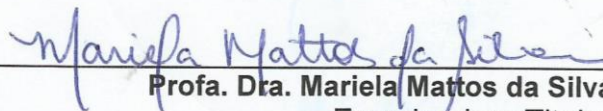
Comissão Examinadora:



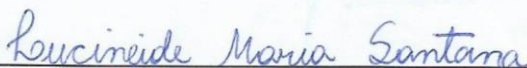
Profa. Dra. Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)
Orientadora e Presidente da Comissão Examinadora



Prof. Dr. Stéfano Zorzal Almeida (UFES)
Coorientador



Profa. Dra. Mariela Mattos da Silva (UFES)
Examinadora Titular Interna



Profa. Dra. Lucineide Maria Santana (FEST/UFES)
Examinadora Titular Externa

“[...] Eu nunca esperei nada em troca,
só escrevi, mano [...]

**Se tudo der errado amanhã,
depois do amanhã eu ainda ‘tô aqui, mano [...]**

(Rashid - Se tudo der errado amanhã, 2017)

“DEDICO ESTE TRABALHO AS
DUAS MULHERES DA MINHA VIDA,
FABÍOLA E MARILENE”

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos listados aqui são curtos, porém bastante sinceros.

Agradeço primeiramente à pessoa mais importante da minha vida, minha amada mãe Marilene, por sempre ter me empurrado pra frente e por ter suportado todas as barras, durante uma vida inteira, para que eu chegasse até aqui.

À minha noiva linda, Fabíola, pelo carinho, apoio emocional e sentimental e companheirismo durante essa jornada, desde a graduação.

Ao meu irmão Maurício, por cada moral e cada abraço dado desde sempre.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, que sempre estavam à disposição em ajudar durante o trabalho.

Aos meus colegas de trabalho da FAESA, em especial à Prof.^a Alessandra Delazari por ter me aberto as portas do mundo das algas e possibilitado o início dessa caminhada.

Ao Prof. Stéfano Zorzal, pelos ensinamentos e oportunidade de desenvolvimento acadêmico, profissional.

À minha orientadora Prof.^a Valéria Fernandes, por ter me recebido de braços abertos em sua equipe, pela oportunidade, pelos ensinamentos e conversas ao longo destes dois anos.

RESUMO

O conhecimento sobre o processo de produtividade primária é de fundamental importância para o entendimento do metabolismo e dinâmica energética em ecossistemas naturais. O presente estudo objetivou analisar os efeitos de três faixas de comprimentos de onda (azul, verde e vermelho), na produtividade primária fitoplanctônica da lagoa da UFES, campus de Goiabeiras, Vitória (ES). O experimento foi feito em triplicata ($n=3$), utilizando o método de frascos claros e escuros, sendo os filtros de luz aplicados aos frascos claros. Também foram utilizados filtro transparente e tratamento controle (sem aplicação de filtro). A periodicidade das coletas foi mensal, num ciclo anual, na área central da lagoa. A produtividade primária foi avaliada pelo método Winkler e os dados foram expressos em $\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. A comunidade fitoplanctônica foi avaliada em relação a riqueza, densidade, biovolume, frequência de ocorrência, táxons abundantes e dominantes e a biomassa avaliada a partir das concentrações clorofila *a*, *b* e *c*. A análise de componentes principais foi aplicada para ordenação temporal das amostras. A correlação de Spearman foi aplicada entre os valores de produtividade primária bruta (PPB) e líquida (PPL) e o biovolume algal e as diferenças entre os tratamentos foi avaliada pelo teste Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). A análise de componentes principais não evidenciou sazonalidade para o ambiente estudado. A comunidade fitoplanctônica foi composta por 43 táxons e cinco classes, sendo Cyanobacteria a de maior destaque (24 táxons), seguida por Chlorophyceae (15 táxons). Cyanobacteria apresentou maior densidade e biovolume, chegando, por vezes, a contribuir com 100% da densidade e biovolume totais. Os maiores valores médios de produtividade primária foram registrados na faixa de luz vermelha, tanto para a PPB quanto para a PPL, sendo estatisticamente superiores aos valores encontrados para as faixas de luz azul e verde. O aumento de produtividade primária na faixa do vermelho esteve positivamente correlacionado ao biovolume de Cyanobacteria. Nossos resultados apresentaram evidências de que a faixa de luz vermelha é a mais eficiente para o aumento de produtividade primária em comunidade dominada por Cyanobacteria.

Palavras chave: Comprimentos de onda, Radiação luminosa, Produção de oxigênio.

ABSTRACT

Knowledge about the primary productivity process is of fundamental importance for understanding the metabolism and energy dynamics in natural ecosystems. Thus, the present study aimed to analyze the effects of three wavelength bands (blue, green and red), on the primary productivity of the phytoplankton community in the UFES lagoon, at Goiabeiras *campus*, Vitória (ES). The experiment was performed in triplicate (n=3), using the light and dark flasks method, with the light filters being applied to the light flasks. Transparent filter and control treatment (without filter application) were also used. The sampling frequency was monthly, in an annual cycle, in the central area of the lagoon. The primary productivity was assessed by the Winkler method and the data were expressed in $\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. The phytoplankton community was evaluated in relation to richness, density, biovolume, frequency of occurrence, abundant and dominant taxa and biomass was evaluated based on chlorophyll *a*, *b* and *c* concentrations. The principal component analysis was applied for temporal ordering of the. The Spearman correlation was applied between the values of gross (GPP) and net (NPP) primary productivity and the algal biovolume and the differences among treatments was evaluated by the Kruskal-Wallis test ($p < 0.05$). The principal component analysis did not show seasonality for the studied environment. The phytoplankton community was composed of 43 taxa and five classes, with Cyanobacteria being the most prominent (24 taxa), followed by Chlorophyceae (15 taxa). Cyanobacteria showed higher density and biovolume, sometimes reaching 100% of the total density and biovolume. The highest average values of primary productivity were recorded in the red light range, for both GPP and NPP, being statistically higher than the values recorded for the blue and green light range. The increase in primary productivity in the red range was positively correlated with the Cyanobacteria biovolume. Our results showed evidence that red light range is the most efficient for increasing primary productivity in a community dominated by Cyanobacteria.

Keywords: Wavelengths; Light radiation, Oxygen production.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	13
2	HIPÓTESE	17
3	OBJETIVOS	17
3.1	OBJETIVO GERAL.....	17
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4	METODOLOGIA	17
4.1	ÁREA DE ESTUDO	17
4.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	18
4.3	VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS E LIMNOLÓGICAS	21
4.4	ESTRUTURA E DINÂMICA DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA	21
4.5	PIGMENTOS FOTOSSINTE TIZANTES	23
4.6	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	24
5	REFERÊNCIAS	25
6	ARTIGO	30
7	CONCLUSÕES GERAIS	58
8	PERSPECTIVAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da lagoa do campus universitário da UFES (Vitória, ES) (Fonte: adaptado de Martins, 2006).	18
Figura 2: A) Frasco escuro (esquerdo) e frasco claro (direito) onde foram aplicados os filtros; B) Esquema de incubação de amostras para produtividade primária; C) Estrutura utilizada para a fixação dos frascos e incubação das amostras.....	19
Figura 3: Transmitância de luz de cada filtro utilizado em diferentes comprimentos de ondas.	21
Figura 4: Biplot da análise de componentes principais (ACP) baseada na correlação das variáveis ambientais (setas) com cada eixo e ordenação das amostras coletadas na lagoa, no período de setembro de 2018 a agosto de 2019. Zeu – zona eufótica; Tag – Temperatura da água; Cond. – Condutividade elétrica; OD – oxigênio dissolvido; Sal. – salinidade; Turb. – turbidez; Rad. – radiação solar; Tar – temperatura do ar; Prec. – precipitação; Chla – clorofila <i>a</i>	50
Figura 5: Variação temporal na densidade e biovolume totais da comunidade fitoplanctônica. A – variação temporal da densidade total e biovolume total; B – Contribuição relativa de cada classe para o biovolume total; C – Variação temporal das concentrações de clorofilas <i>a</i> , <i>b</i> e <i>c</i>	54
Figura 6: Variação temporal da respiração e produtividade primária bruta (PPB) da comunidade fitoplanctônica e médias dos tratamentos aplicados. A – variação temporal da respiração e PPB controle e transparente; B – variação temporal da PPB para os tratamentos (azul, verde e vermelho); C – boxplots para as médias de PPB.	55
Figura 7: Variação temporal da respiração e produtividade primária líquida (PPL) da comunidade fitoplanctônica e médias dos tratamentos aplicados. A – variação temporal da respiração e PPL controle e transparente; B – variação temporal da PPL para os tratamentos	56

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Estatística descritiva (mínimo, máximo, média e desvio padrão) das principais variáveis analisadas na lagoa da UFES, no período de setembro de 2018 a agosto de 2019. 49
- Tabela 2: Lista dos táxons e frequência de ocorrência nos meses de coleta. (BACI: Bacillariophyceae; CHLO: Chlorophyceae; CYAN: Cyanobacteria; DINO: Dinophyceae e TREB: Trebouxiophyceae). x: Presença do táxon, A: Táxon abundante, D: Táxon dominante. 51
- Tabela 3: Correlação de Spearman entre os valores de produtividade primária bruta (PPB) e líquida (PPL) e biovolume das principais classes registradas. Re = respiração; c = controle; t = transparente; a = azul; v = verde; ve = vermelho; Treb = Trebouxiophyceae; Chlo = Chlorophyceae; Dino = Dinophyceae; Cyano = Cyanobacteria. Coeficientes representados em negrito representam correlação significativa. 57

1 INTRODUÇÃO GERAL

O conhecimento sobre a produtividade primária é de fundamental importância para o entendimento do metabolismo e dinâmica de ecossistemas, tanto aquáticos quanto terrestres. Devido ao fato de se tratar da base energética das teias tróficas locais, é considerado o principal processo biológico de entrada e fluxo de energia em ecossistemas terrestre e aquático (VERMA E SRIVASTAVA, 2016). Tal processo é caracterizado pela fixação do gás carbônico (CO₂) em moléculas orgânicas altamente energéticas, por meio de processos quimiossintéticos (NISHIHARA *et al.*, 2018), a partir da redução de compostos químicos ou por meio da fotossíntese, quando energia luminosa proveniente da radiação solar é utilizada como fonte principal de energia (CHANDARAVITHOON *et al.*, 2018). O processo fotossintético possui como subproduto moléculas de Oxigênio (O₂), provenientes da fotólise da molécula de água, em quantidades proporcionais as de CO₂ fixadas, podendo, este subproduto, ser utilizado como indicador de quantidade de matéria orgânica produzida (TAIZ *et al.* 2017).

Assim como qualquer outro processo metabólico, a fotossíntese é afetada diretamente por fatores que podem se tornar limitantes de acordo com suas variações extremas, destacando-se as concentrações de CO₂, nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo), temperatura e radiação luminosa (KRAGH E SAND-JENSEN, 2018, MARAÑÓN *et al.*, 2018). Sendo assim, variações extremas na radiação luminosa, tanto em relação à intensidade (WAHIDIN *et al.* 2013) quanto em relação às faixas de comprimentos de onda subdivididas dentro do intervalo luminoso (MICHAEL *et al.* 2015, BLAIR *et al.* 2014, KIM *et al.* 2014, DAS *et al.* 2011), irão determinar as taxas de produtividade primária da comunidade, uma vez que este processo está intimamente ligado ao processo fotossintético.

A energia luminosa, comumente utilizada na fotossíntese, é uma somatória de diferentes picos de emissão de comprimentos de onda, compreendidos entre 400 e 700 nm, conhecido como radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (CHOI *et al.*, 2015). Este intervalo é subdividido em faixas que são percebidas, por humanos, onde os comprimentos de onda mais curtos, contidos na faixa do

violeta (400 nm) são mais energéticos que os comprimentos de onda mais longos contidos na faixa do vermelho (700 nm) (CHOI *et al.*, 2015).

Existe uma gama de pigmentos especializados na absorção da energia contida no espectro luminoso. As clorofilas, principais pigmentos fotossintetizantes, absorvem principalmente a energia contida nas faixas do azul (400 – 490 nm) e vermelha (680 – 700 nm), e refletem boa parte da energia contida na faixa intermediária (verde). Além das clorofilas, há também uma série de pigmentos acessórios, capazes de ampliar a faixa de absorção da energia luminosa, fazendo com que o aproveitamento não esteja restrito apenas as bandas do azul e do vermelho (HSIEH-LO *et al.*, 2019).

Até a década de 1990, acreditava-se que a fotossíntese estivesse restrita apenas até o limite do vermelho (em 700 nm). Entretanto, com a descoberta de duas novas formas de clorofila, clorofila *d* e *f* (MIYASHITA *et al.* 1996, CHEN *et al.* 2010), ambas presentes em espécies de Cyanobacteria, foi evidenciada a possibilidade de absorção de energia luminosa contida além do limite do vermelho, ampliando o espectro de radiação fotossinteticamente ativa para comprimentos de onda até 750 nm (NÜRNBERG *et al.*, 2018, ALLAKHVERDIEV *et al.* 2016) o que possibilita estes organismos colonizarem ecossistemas ricos em energia eletromagnética além do limite do vermelho (AVERINA *et al.*, 2018). Estas formas de clorofilas são caracteristicamente pigmentos acessórios, que juntamente com outros pigmentos como as ficobiliproteínas e carotenoides, apresentam picos de absorção em regiões de baixa absorção de energia pela molécula de clorofila *a*, que possui seus picos de absorção mais acentuados nos comprimentos de ondas do azul (próximos à 450 nm) e do vermelho (próximos à 660 nm) (HSIEH-LO *et al.*, 2019, ALLAKHVERDIEV *et al.*, 2016, NÜRNBERG *et al.*, 2018).

A literatura reporta diversos trabalhos que empregam diferentes qualidades de luz sobre cultivos de microalgas, visando respostas fisiológicas referentes ao aumento na produção de bio-compostos de interesse econômico. Entretanto, devido a diferentes fatores, como composição de pigmentos dos organismos, ou presença de diferentes citocromos fotorreceptores, que desencadeiam respostas celulares específicas para cada faixa de comprimentos de onda (PETROUTSOS *et al.*, 2016), foram evidenciadas as diferentes respostas, positivas ou negativas,

sobre a produtividade de grupos distintos de algas submetidas à faixas restritas de comprimentos de onda.

Baba *et al.* (2012), por exemplo, mostraram que para *Botryococcus braunii* faixas de luz vermelha foram mais eficazes para o aumento da produtividade, porém, este mesmo aumento foi observado em faixas de luz azul para *Chlorella vulgaris* e *Nannochloropsis* sp. (MICHAEL *et al.*, 2015, BLAIR *et al.*, 2014). Além disso, Kim *et al.* (2017) mostraram que para *Tetraselmis* sp. comprimentos de ondas vermelhos foram capazes de aumentar a produção de ácidos graxos em até 61% e Guo e Fung (2020) mostraram que a mistura de luz vermelha e azul foi capaz de aumentar os teores de proteína e lipídios totais em *Chlorella pyrenoidosa*. Estes trabalhos mostram que a utilização de filtros de luz apropriados pode ser uma boa estratégia para o aprimoramento de técnicas e aumento de biomassa e compostos de interesse para a produção de biocombustível a partir de algas.

No Brasil foram identificados dois estudos com essa abordagem experimental em cultivos de microalgas com a aplicação de filtros de luz, ambas trabalhando com espécies de Cyanobacteria. Duarte *et al.* (2019) mostraram que o uso de luz monocromática do tipo LED promoveu aumento na taxa de crescimento de *Synechococcus nidulans* em até 55% se comparado a luz fluorescente tradicionalmente usada. Além disso, o uso de luz vermelha promoveu aumento de 50% nas concentrações de ácidos graxos saturados na biomassa. Já Lima *et al.* (2018) mostraram que uma composição de luz de 70% vermelho e 30% azul aplicada no cultivo de *Arthrospira platensis* foi capaz de aumentar a biomassa algal, além da concentração de pigmentos de interesse (clorofila, carotenoides e ficocianina) nesta biomassa.

Já em ecossistemas, a aplicação de filtros de luz pode implicar em possíveis seleções de grupos de espécies de acordo com sua composição de pigmentos. Tonetto *et al.* (2012) por exemplo, mostraram que espécies de Cyanobacteria e Rhodophyceae apresentaram vantagens competitivas sobre táxons de algas verdes quando submetidos a luz vermelha. Segundo os autores, esta vantagem se deu devido a presença de ficocianina nos dois primeiros grupos, o que propicia maior absorção de energia em faixas de luz compreendidas no vermelho. Essas fotoadaptações são de grande relevância por conta da concentração de material orgânico dissolvido cromóforo (MODC) capaz de

absorver diversas faixas de comprimentos de luz incidentes modificando, assim, a incidência de cada comprimento de luz em função da profundidade, sendo comprimentos de luz azul mais comuns próximos à superfície e mais raros conforme aumenta a profundidade (LAWRENZ *et al.*, 2010). As concentrações de MODC influenciam diretamente na quantidade e qualidade da luz em relação a profundidade de ecossistemas aquáticos, o que possibilita o desenvolvimento de grupos distintos de algas de acordo com a faixa de luz de maior incidência (LAWRENZ *et al.*, 2010).

Apesar da capacidade dos pigmentos acessórios abranger em todas as faixas do espectro luminoso, a produtividade primária de organismos fotossintetizantes possui seus maiores picos nas faixas azul e/ou vermelha, sendo poucas respostas registradas na faixa intermediária, próxima ao verde (SCHULZE *et al.*, 2014). Esse fato sugere que, a aplicação de filtros que permitem passagem apenas de luz verde pode ser capaz de controlar determinadas espécies em floração, diminuindo sua produção de compostos orgânicos e, conseqüentemente, sua dominância numérica.

Tendo em vista a importância de se conhecer os efeitos de cada faixa de comprimento de onda, não apenas em cultivo de uma ou poucas espécies em laboratório, mas também em comunidades naturais devido à heterogeneidade ambiental, além das possíveis complicações causadas por florações de algas nocivas, o presente estudo objetivou avaliar os efeitos de diferentes faixas de comprimentos de onda (azul, verde e vermelho) do espectro luminoso sobre a produtividade primária da comunidade fitoplanctônica em uma lagoa artificial urbana e aprimorar o entendimento destas faixas sobre as taxas de produtividade primária. Estudos como este podem fornecer base para uma série de trabalhos aplicados.

Esta pesquisa poderá subsidiar trabalhos aplicadas à possíveis controles de florações e, conseqüentemente, produção de metabólitos secundários nocivos em águas utilizadas para abastecimento e/ou irrigação de culturas com base na variação das taxas de produtividade primária da comunidade fitoplanctônica em cada tratamento aplicado, além da possibilidade de identificação de grupos de espécies mais bem adaptados a determinada faixa de luz em trabalhos futuros.

2 HIPÓTESE

O espectro luminoso da faixa do azul (mais energético) é o principal responsável pela produtividade primária da comunidade fitoplanctônica, uma vez que é a faixa do espectro luminoso com maior pico de absorção pela clorofila *a*, pigmento comum à todos os organismos fotossintetizantes.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos de diferentes faixas de comprimentos de onda do espectro luminoso (azul, verde e vermelho) sobre a produtividade primária da comunidade fitoplanctônica.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar a variação temporal da produtividade primária da comunidade fitoplanctônica no decorrer de um ciclo anual;
2. Avaliar os efeitos de filtros de luz sobre a produtividade primária da comunidade fitoplanctônica;
3. Analisar a estrutura da comunidade fitoplanctônica no ciclo anual.
4. Correlacionar a estrutura da comunidade e a produtividade primária em cada faixa do espectro luminoso selecionada.

4 METODOLOGIA

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi realizado na lagoa da UFES, um ecossistema costeiro, artificial e raso localizado no *campus* da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Goiabeiras, Vitória – ES (20°16'41" S e 40°18'10" W) (Figura 1). Este

ambiente é caracterizado por grandes variações em suas características físicas, químicas, físico-químicas e biológicas, devido ao histórico de entrada intermitente de água salobra proveniente do Canal da Passagem (que liga a praia de Camburi à Baía de Vitória), além do aporte de nutrientes via efluentes produzidos em edificações no próprio *campus* (MARTINS, 2006).

A lagoa foi inicialmente criada para fins paisagísticos para harmonia do *campus* e possui área de 1,4 ha, um volume de aproximadamente $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ e profundidade média de 1,2 m (variando de 0,8 a 1,8 m), seu leito é predominantemente plano, havendo aumento de profundidade na região central (PEREIRA E LOUREIRO-FERNANDES, 1999).

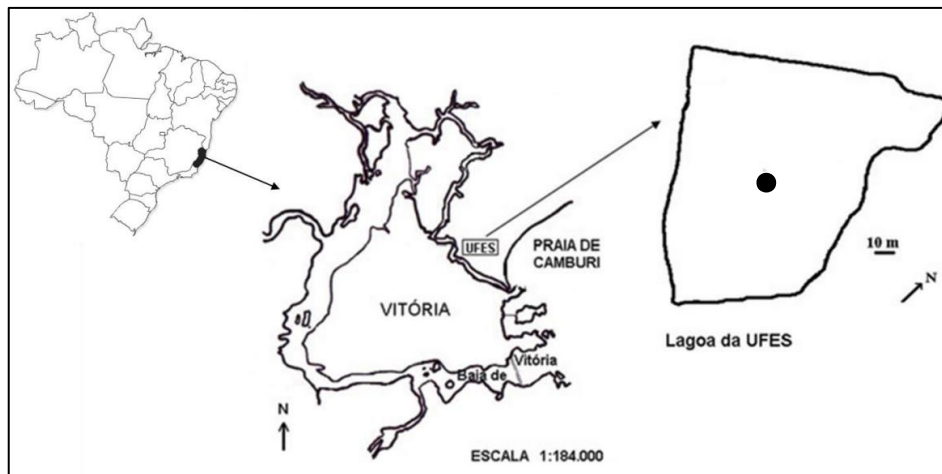


Figura 1: Localização da lagoa do campus universitário da UFES (Vitória, ES) (Fonte: adaptado de Martins, 2006).

4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizadas amostragens mensais para a estimativa da produtividade primária, e em triplicata ($n=3$), e avaliação da estrutura e dinâmica da comunidade fitoplanctônica em um ciclo anual, de setembro de 2018 a agosto de 2019, em um ponto central da lagoa.

A produtividade primária foi estimada por meio da quantificação do oxigênio dissolvido (OD) a partir de amostras coletadas de frascos claros e escuro (Figura 2A). A quantificação da concentração de OD se deu pelo método de titulação Winkler (WINKLER, 1888), modificado por Golterman (1978) (Equação 1).

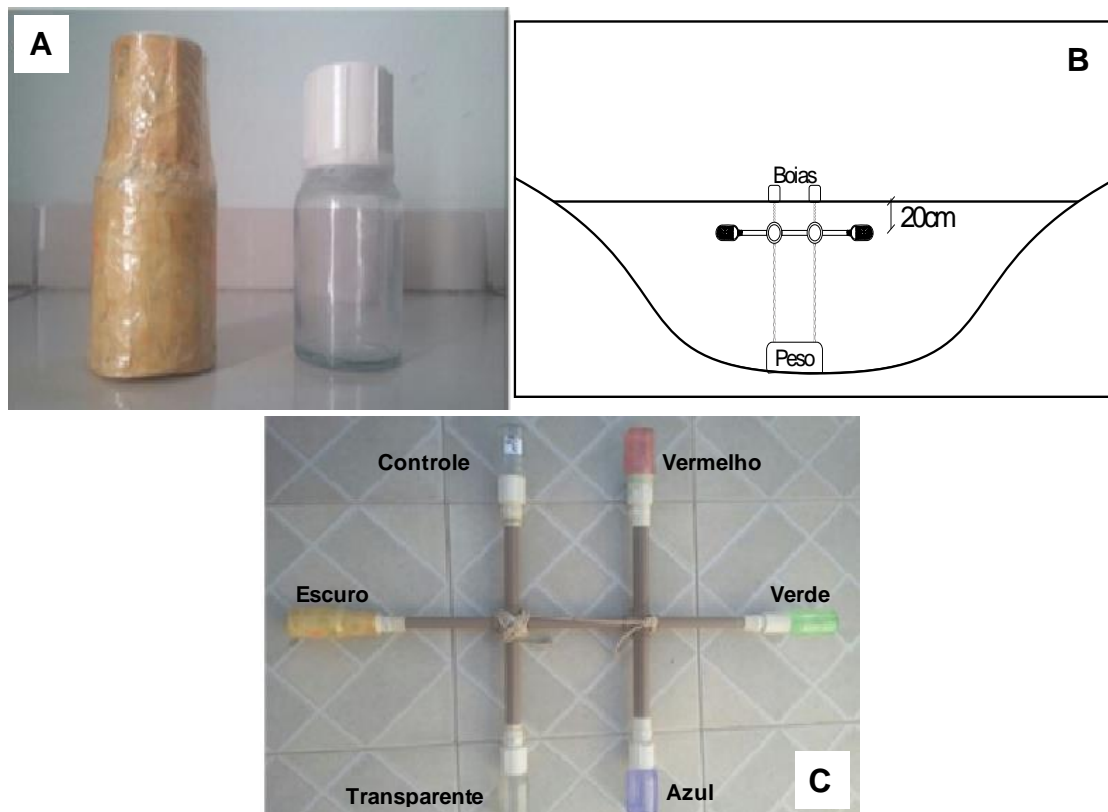


Figura 2: A) Frasco escuro (esquerdo) e frasco claro (direito) onde foram aplicados os filtros; B) Esquema de incubação de amostras para produtividade primária; C) Estrutura utilizada para a fixação dos frascos e incubação das amostras.

$$\text{Equação 1: } \text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1} = (V_1 \times N \times 8000) / (V_2 \times (V_3 - V_4) / V_3)$$

Onde:

V₁: volume de tiosulfato (mL);

N: normalidade do tiosulfato (N);

V₂: volume da alíquota usada na titulação (mL);

V₃: volume total do frasco (mL);

V₄: volume de reagentes utilizado (mL).

O experimento consistiu na incubação de amostras de água da própria lagoa em frascos na subsuperfície (0,20 m de profundidade) (Figura 2B), por período de duas horas, sempre no momento de maior incidência luminosa no ciclo diário (entre 12 e 14 horas). Foram utilizados frascos de vidro claros de 150 mL de capacidade, que possibilitam a passagem de luz e, conseqüentemente, a ocorrência tanto da fotossíntese quanto da respiração, e frascos de vidro escuros de 150 mL de capacidade, que bloqueiam a passagem de luz, ocorrendo apenas

a respiração da comunidade. Além da coleta de amostra para adicionar nos frascos dos tratamentos, também foram coletadas amostras para a determinação da concentração de OD no ambiente, exatamente no momento da incubação (frascos iniciais).

A partir da comparação dos valores de O₂ dissolvido contidos nos frascos iniciais, claros (com e sem filtro) e escuros, foram obtidas medidas de produtividade primária líquida (PPL) (Equação 2), respiração da comunidade (Re) (Equação 3) e produtividade primária bruta (PPB) (Equação 4) (WETZEL E LIKENS, 2000). Os dados foram expressos em mgO₂.L⁻¹.h⁻¹.

$$\text{Equação 2: PPL} = \text{frasco claro} - \text{frasco inicial}$$

$$\text{Equação 3: Re} = \text{frasco inicial} - \text{frasco escuro}$$

$$\text{Equação 4: PPB} = (\text{PPL}) + (\text{Re})$$

Os frascos foram fixados a uma estrutura apropriada (Figura 2C), desenvolvida e criada pelo próprio autor deste estudo, e para cada amostra contida em frasco claro foi aplicado um tratamento com plástico translúcido de cores azul, verde, vermelha e transparente, que funcionaram como filtros de luz, permitindo a passagem seletiva de faixas de comprimentos de onda do espectro luminoso (Figura 3). Cada faixa de comprimentos de onda foi determinada com base nos diferentes espectros de absorção da clorofila *a*. Também foram utilizados frascos controle, isentos de filtro e frascos escuros, para a determinação da respiração da comunidade. Os filtros foram confeccionados utilizando plástico translúcido e a porcentagem de transmitância da luz de cada filtro foi avaliada em espectrofotômetro UV/Vis Aquamate Plus, em 40 comprimentos de ondas diferentes entre 350 e 740 nm (Figura 3). Este teste possibilitou verificar as faixas mais representadas em cada filtro, além de mostrar semelhança na porcentagem de luz transmitida por cada um deles.

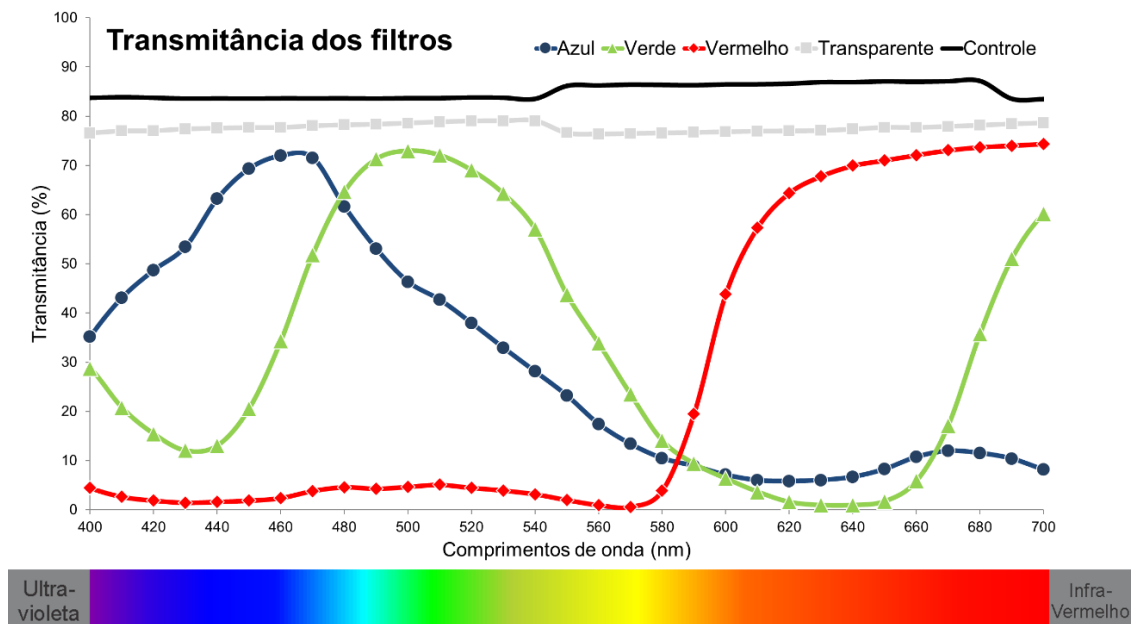


Figura 3: Transmitância de luz de cada filtro utilizado em diferentes comprimentos de ondas.

4.3 VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS E LIMNOLÓGICAS

Os valores médios, para o período de incubação do experimento, de radiação solar (Rad.) e temperatura do ar (Tar) foram obtidos em base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na estação A612, localizada no próprio campus de Goiabeiras da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

A caracterização da lagoa, quanto às variáveis limnológicas, foi feita *in situ* com a determinação dos valores de temperatura da água ($T_{ág}$), oxigênio dissolvido (OD), salinidade (Sal), condutividade elétrica (Cond) e pH, utilizando medidor multiparametros Sanxin SX751. A turbidez (Turb.) foi analisada em laboratório, imediatamente após a coleta, utilizando turbidímetro digital Plus ALFAKIT. A transparência da água e a estimativa da zona eufótica foram determinadas pelo disco de Secchi e fórmula proposta por Cole (1994), respectivamente.

4.4 ESTRUTURA E DINÂMICA DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA

A estrutura da comunidade fitoplanctônica ao longo do tempo foi determinada pelos seus principais atributos: riqueza, densidade, biovolume, frequência de

ocorrência e espécies abundantes e dominantes. A biomassa foi avaliada pela concentração de clorofilas *a*, *b* e *c*.

A riqueza foi determinada pelo número de táxons presente em amostras quali-quantitativas. Para a coleta qualitativa do fitoplâncton, foi utilizada rede de plâncton (20 µm) e as amostras fixadas com formol a 4%. Estas amostras foram analisadas em microscópio óptico e os indivíduos foram identificados sempre ao menor nível taxonômico possível, utilizando bibliografia especializada (BICUDO E MENEZES, 2017, SANT'ANNA *et al.*, 2007, KOMÁREK E ANAGNOSTIDIS, 1998, KOMÁREK E FOTT, 1983, entre outros).

As análises quantitativas foram realizadas através de amostras de subsuperfície, coletadas manualmente em frascos e imediatamente fixadas com solução de lugol acético 5%. Estas amostras foram quantificadas seguindo metodologia de sedimentação em câmaras (UTERMÖHL, 1958) e contagem de campos aleatórios (UEHLINGER, 1964). Foram contados campos suficientes para a quantificação de, no mínimo, 150 indivíduos da espécie mais abundante na amostra (LUND *et al.*, 1958), além de cinco campos sem o registro de novos táxons (BICUDO, 1990). Os indivíduos de cada táxon presente foram identificados e registrados e a densidade foi expressa em indivíduos por mililitro (ind.mL^{-1}) (Equação 5) de acordo com Weber (1973).

$$\text{Equação 5: } \text{Ind.mL}^{-1} = (n/sc)(1/h)(F)$$

Sendo:

n = número de indivíduos contados;

s = área do campo no aumento de 40X;

c = número de campos contados;

h = altura da câmara de sedimentação em mm;

F = fator de correção para mililitro ($10^3 \text{ mm}^3/\text{mL}$).

A frequência de ocorrência (*F*) consistiu na quantidade de vezes em que um determinado táxon ocorreu na amostra ao longo tempo. Para os cálculos da frequência de ocorrência foi adotada a classificação de Lobo e Leighton (1986) (Equação 6).

$$\text{Equação 6: } F = P \times 100 / p$$

Sendo:

P: número de amostras em que o táxon esteve presente;

p: número total de amostras.

Ainda segundo Lobo e Leighton (1986), foram avaliadas as espécies abundantes e dominantes da comunidade, onde cada táxon foi avaliado em densidade numérica, sendo classificado como abundante o táxon cuja densidade foi superior à média da densidade da amostra e dominante, aquele cuja densidade ultrapassou 50% da densidade total da amostra.

O biovolume específico (μm^3) foi determinado a partir da multiplicação do número médio de células por indivíduo (quando colonial ou filamentosa) pelo volume celular médio. O volume celular médio foi obtido através das dimensões e formas geométricas das células de cada táxon identificado, de acordo com a metodologia proposta por Hillebrand *et al.* (1999) e Sun e Liu (2003). O biovolume de cada táxon na comunidade foi obtido com a multiplicação de seu biovolume específico por sua densidade numérica (ind.mL^{-1}) de acordo com Edler (1979). O biovolume de cada classe se deu pela somatória dos biovolumes de cada táxon da classe em questão.

4.5 PIGMENTOS FOTOSSINTETIZANTES

As concentrações de clorofilas *a*, *b* e *c* (Equação 7, 11 e 12) foram obtidas a partir de alíquotas de 50mL, filtradas em filtros de fibra de vidro GF-1. A extração foi feita em acetona 90% e a leitura em espectrofotômetro em comprimentos de onda de 360, 647, 663 e 750 nm (LORENZEN, 1967). Os cálculos para a concentração das clorofilas *a*, *b* e *c* seguiram o método tricromático proposto por Jeffrey e Humphrey (1975) e expressos em $\mu\text{g.L}^{-1}$.

$$\text{Equação 7: } \text{Chl}a = [11,85(A_{663}-A_{750})-1,54(A_{647}-A_{750})-0,08(A_{630}-A_{750})] \times V_e / (V_f \times L)$$

$$\text{Equação 8: } \text{Chl}b = [-5,43(A_{664}-A_{750})+21,03(A_{647}-A_{750})-2,66(A_{630}-A_{750})] \times V_e / (V_f \times L)$$

$$\text{Equação 9: } \text{Chl}c = [-1,67(A_{664}-A_{750})-7,60(A_{647}-A_{750})+24,52(A_{630}-A_{750})] \times V_e / (V_f \times L)$$

Sendo:

V_e = volume de acetona (mL);

A_{630} = absorvância em 630 nm;

A_{647} = absorvância em 647 nm;

A_{663} = absorvância em 663 nm;

A_{750} = absorvância em 750 nm;

V_f = volume filtrado (L);

L = largura da cubeta (cm).

4.6 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Os dados foram submetidos à estatística descritiva utilizando valores mínimo, máximo, média e desvio padrão. Foi realizada análise multivariada (análise de componentes principais – ACP) para avaliar a distribuição temporal das amostras em relação as variáveis climatológicas e limnológicas. Os dados foram transformados utilizando base logarítmica ($\text{Log}_2(x+1)$). Com a finalidade de verificar a influência de cada classe algal sobre a produtividade primária da comunidade, foi feita correlação de Spearman utilizando os dados de biovolume das principais classes registradas e a produtividade primária em cada tratamento aplicado. As diferenças entre os tratamentos aplicados para a produtividade primária foram avaliadas através do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis a 5% de significância. As análises foram feitas no software Rstudio, versão 1.2.5019 (RSTUDIO TEAM, 2019), utilizando o pacote FactoMineR (JOSSE *et al.*, 2016).

5 REFERÊNCIAS

ALLAKHVERDIEV, S.I. *et al.* Chlorophylls d and f and Their Role in Primary Photosynthetic Processes of Cyanobacteria. **Biochemistry (Moscow)**, v.81, n.03, p.201-212, 2016.

AVERINA, S. *et al.* Far-red light photoadaptations in aquatic Cyanobacteria. **Hydrobiologia**. v.813, p.1-17, 2018.

BABA, M. *et al.* Wavelength specificity of growth, photosynthesis, and hydrocarbon production in the oil-producing green alga *Botryococcus braunii*. **Bioresource Technology**, v.109, p.266-270, 2012.

BICUDO, C.E.M. e MENEZES, M. Gênero de Algas de Águas Continentais do Brasil (chave para identificação e descrições). São Carlos: Rima, 2017.

BICUDO, D. C. Considerações sobre metodologias de contagem de algas do perifíton. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v.3, p.459-475, 1990.

BLAIR, M.F. *et al.* Light and growth medium effect on *Chlorella vulgaris* biomass production. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.2, p.665-674, 2014.

CHANDARAVITHOON, P. *et al.* Oxygenic and anoxygenic photosynthesis in a sewage pond. **Journal of Applied Phycology**. v.30, p. 3089–3102, 2018.

CHEN, M. *et al.* A Red-Shifted Chlorophyll. **Science**. v.329, p.1318-1319, 2010.

CHOI, Y.K. *et al.* LED light stress induced biomass and fatty acid production in microalgal biosystem, *Acutodesmus obliquus*. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. v.145, p.245-253, 2015.

COLE, G. **Textbook of Limnology**. 2^a ed. Saint Louis: The C. V. Mosby, 1994. 283p.

DAS, P. *et al.* Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light. **Bioresource Technology**. v.102, p.3883-3887, 2011.

DUARTE, J.H. *et al.* Light emitting diodes applied in *Synechococcus nidulans* cultures: Effect on growth, pigments production and lipid profiles. **Bioresource Technology**. v.280, p.511-514, 2019.

EDLER, L. **Recommendations for marine biological studies in the Baltic Sea. Phytoplankton and chlorophyll**. (UNESCO, Working Group 11, Baltic Marine Biologists), 38 pp., 1979.

GOLTERMAN, H.L., CLYMO, R.S., OHNSTAD, M.A.M. **Methods for physical and chemical analysis of freshwater**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 213p., 1978.

GUO, H. e Fang, Z. Effect of light quality on the cultivation of *Chlorella pyrenoidosa*. **E3S Web of Conferences**. v.143, p.1-6, 2020.

HILLEBRAND, H. *et al.* Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. **Journal of Phycology**, v.35, p.403-424, 1999.

HSIEH-LO, M. *et al.* Phycocyanin and phycoerythrin: Strategies to improve production yield and chemical stability. **Algal Research**. v.42, p.1-11, 2019.

JOSSE, J. E HUSSON, F. missMDA a package to handle missing values in principal component methods. *Journal of Statistical Software*, 70(1), 2016. <http://factominer.free.fr>.

JEFFREY, S.W. e HUMPHREY, G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae, and natural phytoplankton. **Biochemie und Physiologie der Pflanzen**. v.167, n.2, p.191-194, 1975.

KIM, D.G. *et al.* Manipulation of light wavelength at appropriate growth stage to enhance biomass productivity and fatty acid methyl ester yield using *Chlorella vulgaris*. **Bioresource Technology**. v.159, p.240-248, 2014.

KIM, Z.H. *et al.* Enhancing Biomass and Fatty Acid Productivity of *Tetraselmis* sp. in Bubble Column Photobioreactors by Modifying Light Quality using Light Filters. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**. v.22, p.397-404, 2017.

KOMÁREK, J. e ANAGNOSTIDIS, K. Cyanoprokaryota, 1: Chroococcales. *In: Süßwasserflora von Mitteleuropa* (H. Ettl, G. Gärtner, H. Heynig & D. Möllenhauer, eds.). Gustav Fischer, Stuttgart, v.19, p.1-548, 1998.

KOMÁREK, J. e FOTT, B. Chlorophyceae (Grünalgen), Ordiniung: Chlorococcales. *In: G. Huber-Pestalozzi, H. Heynig & D. Mollenhauer (eds.). Das Phytoplankton des Süßwasser: systematik und biologie.* E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchlandlung, Stuttgart, pp. 1-1044, 1983.

KRAGH, T. e SAND-JENSEN, K. Carbon limitation of lake productivity. **Proceedings of Royal Society B.** v.285, p.1-9, 2018.

LAWRENZ, E. *et al.* Spectral Irradiance and Phytoplankton Community Composition in a Blackwater-Dominated Estuary, Winyah Bay, South Carolina, USA. **Estuaries and Coasts.** v.33, p.1186-1201, 2010.

LIMA, G.M. *et al.* Influence of spectral light quality on the pigment concentrations and biomass productivity of *Arthrospira platensis*. **Algal Research.** v.31, p.157-166, 2018.

LOBO, E. e LEIGHTON, G. Estructuras comunitárias de las fitocenosis planctónicas de los sistemas de desembocaduras de ríos y esteros de la zona central de Chile. **Revista de Biología,** v. 22, n.1, p.1-29, 1986.

LORENZEN, C.J. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. **Limnology and Oceanography.** v.12, p.343-346, 1967.

LUND J.W.G. *et al.* The inverted microscope method of estimating algae number and statistical basis of estimating by counting. **Hydrobiologia,** v.11, p.143- 170, 1958.

MARAÑÓN, E. *et al.* Nutrient limitation suppresses the temperature dependence of phytoplankton metabolic rates. **ISME.** v.12, p.1836-1845, 2018.

MARTINS, F.C.O. e FERNANDES, V.O. Fitoplâncton da lagoa do *campus* universitário da UFES (Vitória, ES): estrutur da comunidade e condições ecológicas. **Naotropical Biology and Conservation.** v.1, n.2, p.101-109, 2006.

MICHAEL, C. *et al.* Use of wavelength-selective optical light filters for enhanced microalgal growth in different algal cultivation systems. **Bioresource Technology**, v.179, p.47-482, 2015.

MIYASHITA, H. *et al.* Chlorophyll *d* as a major pigment. **Nature**. v.383, p.402, 1996.

NISHIHARA, A. *et al.* Nitrogen Fixation in Thermophilic Chemosynthetic Microbial Communities Depending on Hydrogen, Sulfate, and Carbon Dioxide. **Microbes Environ.** v,33, n.1, p.10-18, 2018.

NÜRNBERG, D.J. *et al.* Photochemistry beyond the red limit in chlorophyll *f*-containing photosystems. **Science**, v.360, p.1210–1213, 2018.

PEREIRA, J.B. e LOUREIRO-FERNANDES, L. Variação temporal do zooplâncton da lagoa da UFES, Vitória, Espírito Santo. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v.11, n.2, p.79-88, 1999.

PETROUTSOS, D. *et al.* A blue-light photoreceptor mediates the feedback regulation of photosynthesis. **Nature**. v.000, p.1-5, 2016.

RSTUDIO TEAM. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA, 2019. URL <http://www.rstudio.com/>.

SANT'ANNA, C.L. *et al.* Planktic Cyanobacteria from upper Tietê basin reservoirs, SP, **Brazil. Revista Brasileira de Botânica**. v.30, p.1-15, 2007.

SCHULZE, P.S.C. *et al.* Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production. **Trends in Biotechnology**. v.32, n.8, p.422-430, 2014.

SUN, J. e LIU, D. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. **Journal of Plankton Research**, v.25, p.1331-1346, 2003.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TONETTO, A.F. *et al.* Effects of irradiance and spectral composition on the establishment of macroalgae in streams in southern Brazil. **Annales de Limnologie - International Journal of Limnology**, v.48, p.363-370, 2012.

UEHLINGER, V. Étude statistique des méthodes de dénombrement planctonique. **Arch. Sci.**, v.17, n.2, p.121-123, 1964.

UTERMÖHL, H. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. **Mitt. Int. Verein. Theor. Angew. Limnology**. 9:1-38, 1958.

VERMA, B.S. e SRIVASTAVA, S.K. Study of Factors Affecting Phytoplankton Primary Productivity in a Pond of Patna, Bihar, India. **Nature Environment and Pollution Technology**. v.15, n.1, p.291-296, 2016.

WAHIDIN, S. *et al.* The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis* sp. **Bioresource Technology**. v.129, p:7–11, 2013.

WEBER, C.I. Plankton. *In*: **National Environmental Research Center Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati** (Ed.) Biological field and laboratory methods for measuring the quality surface water and effluents. U. S. A. p.1-17. 1973.

WETZEL, R.G. e LIKENS, G.E. **Limnological analyses**. 3^aed. New York. Springer-Verlag, 2000.

WINKLER, L.W. Die Bestimmung des in Wasser gelösten Sauerstoffes. **Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft**. V.21, p.2843–2855, 1888.

6 ARTIGO

A organização da presente dissertação se deu sob a forma de um artigo, englobando todos os resultados obtidos e priorizando a formulação de um trabalho de alta qualidade, contendo toda a explicação dos resultados em um único trabalho a ser submetido em revista de alta visibilidade.

Os resultados foram apresentados sob a forma do artigo intitulado: “PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA FITOPLANCTÔNICA SUBMETIDA A DIFERENTES QUALIDADES ESPECTRAIS DA LUZ”.

Autores: Fabrício Bronzoni de Oliveira, Stefano Zorzal-Almeida, Valéria de Oliveira Fernandes.

Revista: Freshwater Biology (A1 ciências agrárias – Qualis (2013-2016))

<https://onlinelibrary.wiley.com/page/journal/13652427/homepage/forauthors.html> – (Anexo 1).

PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA FITOPLANCTÔNICA SUBMETICA A DIFERENTES QUALIDADES ESPECTRAIS DA LUZ

Fabício Bronzoni de Oliveira^{1,2}; Stéfano Zorzal-Almeida¹ e Valéria de Oliveira
Fernandes¹

Palavras chave: Comprimentos de onda, Radiação luminosa, Produção de
oxigênio.

¹ Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal (PPGBV), Centro de
Ciências Humanas e Naturais (CCHN), Universidade Federal do Espírito Santo
(UFES), Campus Universitário Almor Queiroz de Araújo, Av. Fernando Ferrari,
s/n, CEP 29060-973, Goiabeiras, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

² Correspondência do autor: fabriciobronzoni@gmail.com

RESUMO

1. Compreender o processo de produtividade primária é de fundamental importância para o entendimento do metabolismo e dinâmica energética em ecossistemas naturais. O presente estudo teve como objetivo descrever os efeitos de três faixas de comprimentos de onda, na produtividade primária fitoplanctônica da lagoa da UFES, Vitória (ES).
2. O experimento seguiu o método de frascos claros e escuros, sendo os filtros de luz aplicados aos frascos claros. A produtividade primária foi avaliada pelo método Winkler e os dados foram expressos em $\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. Também foram utilizados filtro transparente e frasco controle (isento de filtro). A comunidade foi avaliada em seus principais atributos: riqueza, densidade, biovolume, frequência de ocorrência, espécies abundantes e dominantes e a biomassa foi determinada através das concentrações clorofila *a*, *b* e *c*.
3. A ACP foi aplicada para ordenação temporal das amostras e o teste Mann-Whitney ($p < 0,05$) foi aplicado para verificar sazonalidade. A correlação de Spearman foi aplicada entre os valores de produtividade primária e o biovolume algal e as diferenças entre os tratamentos foi avaliada pelo teste Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).
4. A ACP e o teste Mann-Whitney não evidenciaram sazonalidade evidente para o ambiente estudado. A comunidade foi composta por 43 táxons e cinco classes, sendo Cyanobacteria foi a mais bem representada (24 táxons). Cyanobacteria foi dominante, em densidade e biovolume, chegando a contribuir com 100% da densidade e biovolume, por vezes.
5. Os maiores valores médios anuais de produtividade primária foram registrados na faixa de luz vermelha sendo estatisticamente superiores aos valores registrados nas faixas de luz azul e verde. O aumento de produtividade primária no vermelho esteve correlacionado ao biovolume de Cyanobacteria. Nossos resultados mostram que a faixa de luz vermelha é a mais eficiente para o aumento de produtividade primária em comunidade dominada por Cyanobacteria e apontaram que este aumento está possivelmente relacionado ao tipo de pigmento típico deste grupo.

INTRODUÇÃO

Por se tratar da base energética das teias tróficas locais, a produtividade primária é considerada o principal processo biológico de entrada e fluxo energético no ecossistema, sendo então seu conhecimento de fundamental importância para o entendimento do metabolismo e dinâmica em ecossistemas aquáticos e terrestres (Verma & Srivastava, 2016). Este processo se dá pela fixação de CO₂, por meio de conversão de energia química (Nishihara *et al.*, 2018) ou luminosa (Chandaravithoon *et al.*, 2018) em moléculas orgânicas de alto valor energético.

Em ecossistemas aquáticos, além das características físicas e químicas da coluna d'água, a luz é um importante fator controlador da produtividade primária (Kragh & Sand-Jensen, 2018, Marañón *et al.*, 2018), tanto em sua intensidade quanto em relação às faixas de comprimentos de onda de maior incidência (Michael *et al.*, 2015, Wahidin *et al.*, 2013). Essa energia luminosa é dividida em faixas de comprimentos de onda mais curtos e mais energéticos, contidos na faixa do violeta (400 nm) até faixas de comprimentos de ondas mais longos e menos energéticos contidos na faixa do vermelho (700 nm) (Choi *et al.*, 2015).

Para organismos fotossintetizantes, existe uma gama de pigmentos especializados à absorção de energia luminosa em cada faixa (Hsieh-lo *et al.*, 2019). As clorofilas são os principais pigmentos fotossintetizantes, porém possuem picos de absorção mais acentuados em faixas de luz azul e vermelha e refletem boa parte da energia contida em faixas intermediárias (verde). Sendo assim, são necessários pigmentos acessórios, como carotenoides e ficobiliproteínas, para que haja maior abrangência de absorção de energia no espectro eletromagnético que compreende a radiação fotossinteticamente ativa (Hsieh-lo *et al.*, 2019).

As diferentes composições de pigmentos em organismos promovem ocupações de nichos com diferentes faixas de comprimentos de onda incidentes. De fato, a literatura mostra que a qualidade da luz é um importante fator para a seleção de nichos pelas espécies. Tonetto *et al.* (2012) evidenciaram a separação de nicho entre espécies de Cyanobacteria e Rhodophyceae, mais bem adaptadas à faixa de luz vermelha, e Chlorophyta, mais bem adaptada à faixas de luz azul. Rivkin (1989) observou diferenças nas taxas de produtividade para o fitoplâncton marinho, mostrando taxas mais elevadas em luz azul, mais próximos à

superfície, quando comparada a luz vermelha de maior incidência em maiores profundidades e evidenciou os reflexos da atenuação da qualidade de luz com o aumento da profundidade sobre a comunidade fitoplanctônica marinha. Os autores atribuíram essa separação de nichos à composição de pigmentos presente em cada grupo de algas e a atenuação das faixas de comprimentos de ondas. Sendo assim, trabalhos com a aplicação de faixas específicas de comprimentos de onda, em comunidades fitoplanctônicas, é fundamental para o entendimento das respostas ecofisiológicas da comunidade em relação a variação do espectro luminoso.

O presente trabalho objetivou, avaliar os efeitos de diferentes faixas de comprimentos de onda do espectro luminoso (azul, verde e vermelho) na produtividade primária da comunidade fitoplanctônica, além de correlacionar a estrutura da comunidade com os valores de produtividade primária em cada faixa. Hipotetizamos que a faixa do azul é a principal faixa responsável pela produtividade primária da comunidade fitoplanctônica, uma vez que é a faixa do espectro luminoso com maior pico de absorção pela clorofila *a*, pigmento comum à todos os organismos fotossintetizantes, podendo assim aumentar as taxas de produtividade primária com a aplicação desta faixa restrita do espectro luminoso sobre a comunidade fitoplanctônica.

METODOLOGIA

Área de Estudo

O experimento foi realizado em uma lagoa costeira, artificial e rasa, localizada no *campus* da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Goiabeiras, Vitória – ES (20°16'41" S e 40°18'10" W). Este ambiente é caracterizado por grandes variações em suas características físicas, químicas, físico-químicas e biológicas, devido ao histórico de entrada intermitente de água proveniente da Baía de Vitória, além do aporte de nutrientes via efluentes produzidos em edificações no próprio *campus* (Martins, 2006). A lagoa, que inicialmente foi planejada para fins paisagísticos, possui área de 1,4 ha, volume de aproximadamente $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ e profundidade média de 1,2 m (variando de 0,8

a 1,8 m), seu leito é predominantemente plano, havendo aumento de profundidade na região central (Pereira & Loureiro-Fernandes, 1999).

Delineamento Experimental

Foram realizadas amostragens mensais para a estimativa da produtividade primária, e em triplicata ($n=3$), e avaliação da estrutura e dinâmica da comunidade fitoplanctônica em um ciclo anual, de setembro de 2018 a agosto de 2019, em um ponto central da lagoa.

A produtividade primária foi estimada por meio da quantificação do oxigênio dissolvido (OD), em $\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, a partir de amostras coletadas de frascos claros e escuro. A quantificação da concentração de OD se deu pelo método de titulação Winkler, modificado por Golterman (1978). A partir da comparação dos valores de OD em frascos iniciais, escuros e claros, foram obtidas medidas de produtividade primária bruta (PPB), produtividade primária líquida (PPL) e respiração (Re) da comunidade (Wetzel & Likens, 2000).

O experimento consistiu na incubação, em estrutura apropriada, de amostras de água da própria lagoa em frascos de vidro claros e escuros de 150 mL de capacidade, à 0,2 m de profundidade, por período de duas horas, sempre no momento de maior incidência luminosa no ciclo diário. Foram aplicados, nos frascos claros, filtros de luz, confeccionados utilizando plástico translúcido, nas cores azul (420 a 480 nm), verde (500 a 550 nm), vermelha (620 a 700 nm) e transparente (400 a 700 nm), além de frasco controle, isento de filtro.

Variáveis Climatológicas e Limnológicas

Os valores médios, para o período de incubação das amostras, de radiação solar (Rad.) e temperatura do ar (T_{ar}) foram obtidos na base de dados da estação A612 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Foram avaliados em campo: temperatura da água ($T_{ág}$), Oxigênio dissolvido (OD), salinidade (Sal), condutividade elétrica (Cond) e pH (multiparametros Sanxin SX751), turbidez (Turb.) utilizando turbidímetro digital Plus ALFAKIT,

transparência da água (Disco de Secchi) e estimativa da zona eufótica (Cole, 1994).

Estrutura da Comunidade Fitoplanctônica e Pigmentos Fotossintetizantes

A estrutura da comunidade fitoplanctônica foi avaliada a partir da riqueza, densidade, biovolume, frequência de ocorrência e espécies abundantes e dominantes. A biomassa foi avaliada pela concentração de pigmentos fotossintetizantes.

A riqueza foi determinada pelo número de táxons presente em amostras quali-quantitativas. Para a coleta do fitoplâncton foi utilizada rede de plâncton com 20 μ m, sendo as amostras imediatamente fixadas com solução de formolina 4%.

A densidade foi avaliada a partir de amostras de subsuperfície fixadas com solução de lugol acético 5%, seguindo metodologia proposta por Utermöhl (1958) e Uehlinger (1964). Os valores foram expressos em ind.mL⁻¹, segundo Weber (1973). A partir dos dados de densidade, foram identificados os táxons abundantes e dominantes (Lobo & Leighton, 1986). A frequência de ocorrência de cada táxon seguiu classificação proposta por Lobo & Leighton (1986).

O biovolume específico (μ m³) foi determinado a partir multiplicação do número médio de células por indivíduo e o volume celular médio, obtido através das dimensões e formas geométricas das células (Hillebrand *et al.*, 1999, Sun e Liu, 2003). O biovolume da comunidade foi obtido com a multiplicação do biovolume específico pela densidade (Edler, 1979).

As concentrações de clorofilas *a*, *b* e *c* foram obtidas a partir da extração foi feita em acetona 90% (Lorenzen, 1967) e os teores calculados segundo Jeffrey & Humphrey (1975), expressos em μ g.L⁻¹.

Tratamento Estatístico

Os dados foram submetidos à estatística descritiva utilizando valores mínimo, máximo, média e desvio padrão. Foi realizada análise multivariada (análise de componentes principais - ACP) para avaliar a distribuição temporal das amostras em relação as variáveis climatológicas e limnológicas. Os dados foram

transformados utilizando base logarítmica ($\text{Log}_2(x+1)$). Com a finalidade de verificar a influência de cada classe sobre a produtividade primária, foi feita correlação de Spearman utilizando os dados de biovolume das principais classes registradas e a produtividade primária em cada tratamento aplicado. As diferenças entre os tratamentos aplicados para a produtividade primária foram avaliadas através do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis a 5% de significância. As análises foram feitas no software Rstudio, versão 1.2.5019 (Rstudio Team, 2019), utilizando o pacote FactoMineR (Josse *et al.*, 2016).

RESULTADOS

Caracterização climatológica e limnológica

De acordo com a distribuição das amostras no biplot da análise de componentes principais, as variáveis climatológicas e limnológicas apresentaram padrão homogêneo ao longo do tempo (Figura 4). Entretanto, os valores de temperatura do ar e radiação solar apresentaram leve tendência aos padrões de inverno e verão (períodos seco e chuvoso, respectivamente), apresentando os menores valores em julho de 2019 ($18,9^\circ \text{C}$ e $3,84 \times 10^5 \text{ KJ/m}^2$) e o maior em fevereiro ($30,8^\circ \text{C}$) de 2019 e dezembro de 2018 ($26,42 \times 10^5 \text{ KJ/m}^2$), respectivamente (Tabela 1).

A análise de componentes principais para as variáveis climatológicas e limnológicas resumiu nos dois primeiros eixos 68,6% da variabilidade dos dados registrados para a lagoa, sendo o primeiro eixo responsável por 39% e o segundo eixo 29,6% (Figura 4).

O primeiro eixo esteve relacionado principalmente as variáveis Rad. ($r = 0,84$), Tar. ($r = 0,78$), T_{ág} ($r = 0,52$), Turb. ($r = 0,48$), Sal. ($r = 0,39$). e o segundo, principalmente ao OD ($r = 0,62$), pH ($r = 0,59$), Zeu ($r = 0,44$). A distribuição das amostras ao longo dos dois primeiros eixos da PCA não evidenciou sazonalidade bem definida. Entretanto, foi possível identificar um grupo entre as amostras de fevereiro, março e abril de 2019, aos quais apresentaram elevados valores de OD e pH mais baixo. As amostras de novembro e dezembro de 2018 encontram-se deslocadas à direita do eixo 1, devido aos maiores valores de radiação, salinidade e temperatura do ar. Já a amostra de julho de 2019 encontra-se à

extrema esquerda do eixo 1, devido a maior turbidez e menor radiação solar registrados.

Estrutura da comunidade fitoplanctônica

A comunidade fitoplanctônica foi composta por 43 táxons, distribuídos em 5 classes, sendo Cyanobacteria a classe mais bem representada (24 táxons), seguido de Chlorophyceae (15 táxons), Trebouxiophyceae (2 táxons), Bacillariophyceae e Dinophyceae (1 táxon cada) (Tabela 2).

Grande parte dos táxons de Cyanobacteria ocorreram em mais de 40% das amostras e dentre eles, foram registrados quatro táxons abundantes e dois dominantes. Já Chlorophyceae apresentou frequência mais baixa se comparada a Cyanobacteria, entretanto, *Scenedesmus bijugus* apresentou dominância em julho de 2019 (Tabela 2). A classe Trebouxiophyceae também apresentou dominância numérica na comunidade ao longo do estudo, porém seu biovolume não foi tão representativo quanto de outros táxons registrados (Tabela 1).

Embora a densidade total tenha alcançado o valor de $51,58 \times 10^4$ ind.mL⁻¹ em setembro de 2018 (Figura 5A), o fato da comunidade ter sido dominada por *Chlorella vulgaris*, que representou 99% da densidade total nesta amostra, não foi suficiente para aumentar o biovolume total, assim como em julho de 2019 (Figura 5A), quando o aumento na densidade de táxons, como Dinophyceae¹ e *Microcystis aeruginosa*, elevou os valores de biovolume.

Durante todo o período estudado, a comunidade foi dominada, em termos de biovolume, por Cyanobacteria (Figura 5B), representando 100% do biovolume total em dezembro de 2018 e 99% nos meses seguintes (janeiro, fevereiro e março de 2019). O biovolume de Cyanobacteria foi abaixo de 50% do total apenas nos meses em que houve alteração no grupo dominante (Figura 5B).

Houve tendência de aumento de Chl_a com o aumento no biovolume de Dinophyceae¹ em maio, junho e julho de 2019 e diminuição nas concentrações deste pigmento com o aumento no biovolume de Cyanobacteria (Figura 5C). Esta tendência também foi observada, porém em menor proporção, em setembro de 2018, quando houve dominância de Trebouxiophyceae (Figura 5B e C).

Produtividade Primária Fitoplanctônica

A produtividade primária bruta com o filtro transparente (PPBt) não apresentou diferença estatística em relação ao controle (PPBc) (Figura 6A), apresentando, assim, variação semelhante ao longo do tempo, juntamente com a produtividade primária bruta na faixa do vermelho (PPBve) (Figura 6B), mesmo havendo perda de intensidade luminosa por conta da aplicação do filtro.

As taxas de produtividade primária bruta na faixa do azul (PPBa) e verde (PPBv) se mantiveram inferiores a $4,5 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ao longo dos 12 meses. Quando comparados os três tratamentos aplicados, os valores registrados para a produtividade primária bruta nas faixas de luz azul (PPBa) e verde (PPBv) se mostraram estatisticamente menores que os valores registrados para o filtro vermelho (PPBve) ($p < 0,05$) (Figura 6C). Embora a utilização do filtro de cor promova o bloqueio de faixas específicas de comprimentos de onda, os valores médios de PPBve foram maiores do que aqueles registrados para a PPBt, ($3,7$ e $3,1 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente).

As taxas de produtividade primária líquida (PPL) seguiram um padrão semelhante ao da produtividade primária bruta, entretanto, houve amostras em que a produtividade primária líquida no controle (PPLc) e com o filtro transparente (PPLt) foram menores que as taxas de respiração da comunidade (Re) (Figura 7A). Esta queda na PPL, abaixo das taxas respiratórias, também foi observada para todos os tratamentos aplicados, em dezembro de 2018 e março e abril de 2019 (Figura 7B). Em outras amostragens, como em outubro e novembro de 2018 e em julho de 2019, apenas a produtividade primária líquida nas faixas de luz azul (PPLa) e verde (PPLv) se mostraram abaixo das taxas respiratórias. O teste Kruskal-Wallis evidenciou aumento significativo na produtividade primária líquida para a luz vermelha (PPLve) em relação apenas a PPLa, assemelhando-se aos demais tratamentos. Já a PPLv, diferentemente do padrão observado para a PPBv, que não se assemelhou ao tratamento controle, esta apresentou semelhança estatística à todos os tratamentos aplicados (Figura 7C).

A correlação de Spearman, aplicada para os valores de produtividade primária bruta e o biovolume das principais classes algais registradas, mostrou correlação positiva apenas entre a produtividade primária bruta na faixa de luz vermelha (PPBve) e o biovolume da classe Cyanobacteria ($r = 0,664$) (Tabela 3). Já para as taxas de produtividade primária líquida, houve correlação positiva entre o biovolume de Trebouxiophyceae e PPLt ($r = 0,577$) e PPLa ($r = 0,577$) (Tabela 3).

DISCUSSÃO

O aumento na produtividade primária foi evidenciado em faixas de luz vermelha, composta por comprimentos de onda mais longos e de menor valor energético, contradizendo a hipótese inicial sobre o aumento de produtividade em faixas de luz azul, devido ao seu maior valor energético e presença de clorofila *a* na comunidade. Foi evidenciado também que este aumento na produtividade primária em faixas de luz vermelha esteve diretamente relacionado ao biovolume da classe Cyanobacteria, classe dominante durante o período estudado, e pode ser explicado, provavelmente, à composição de pigmentos deste grupo.

Raeisossadati *et al.* (2019), Lima *et al.* (2018) e Walter *et al.* (2011) observaram aumento de biomassa e produção de ficocianina em *Arthrospira platensis* e *Spirulina platensis*. Duarte *et al.* (2019) apontaram aumento de 50% na produção de ácidos graxos na biomassa de *Synechococcus nidulans* quando cultivada em luz vermelha. Estes trabalhos, embora realizados em cultivos monoalgais, corroboram nossos resultados e apontam que a incidência de faixas de luz vermelha promove aumento de biomassa e diversos compostos produzidos por Cyanobacteria. Evidentemente, os autores apontam produtividade em toda a faixa do espectro luminoso (luz branca) e destacam a complementariedade dos diferentes tipos de pigmentos presentes em algas, porém, apontam também uma fotoadaptação, em Cyanobacteria, à luz vermelha devido a presença de ficocianina, típica deste grupo (Hohmann-Marriott & Blankenship, 2011).

Há ainda pesquisas mostrando que a qualidade da luz incidente também pode influenciar nas taxas de absorção de nutrientes, evidenciando resposta positiva à faixa de luz vermelha. Yan *et al.* (2013) mostraram que o comprimento de luz

vermelha foi capaz de aumentar as taxas metabólicas de *Chlorella vulgaris*, promovendo aumento nas taxas de absorção de nutrientes. Embora *C. vulgaris* tenha sido registrada em todas as amostras analisadas para o ambiente estudado, e por vezes em abundância, seu biovolume total não foi suficiente para promover resposta significativa na produtividade primária da comunidade fitoplanctônica, provavelmente devido ao seu tamanho reduzido que, quando comparada a outros táxons, apresenta conteúdo celular em menor proporção. A baixa representatividade por algas verdes, no biovolume total do presente estudo, pode ter sido o fator primordial para que a produtividade primária bruta não tenha sido substancialmente maior na faixa do azul, assim como foi observado pelo trabalho de Tonetto *et al.* (2012), onde algas verdes se mostraram melhores adaptadas à luz azul. Entretanto, a representatividade de algas verdes da Classe Trebouxiophyceae foi suficiente pra evidenciar sua correlação com a produtividade primária líquida no azul (PPLa).

O aumento da produtividade primaria na faixa de luz vermelha que, por vezes, foi maior ou equivalente ao controle e/ou tratamento com filtro transparente, provavelmente tem sua explicação na composição de pigmentos encontrados nos organismos pertencentes a classe Cyanobacteria, grupo de maior influência no biovolume da comunidade ao longo do estudo, assim como registrado por Tonetto *et al.* (2012). Além da clorofila *a*, este grupo de algas possuem, em sua composição de pigmentos, grandes concentrações de ficocianina, que é o pigmento responsável pela absorção, principalmente, de luz nas faixas do amarelo ao vermelho (Schulze *et al.*, 2014, Hohmann-Marriott & Blankenship, 2011), com máximo de absorção em 620 nm (Hsieh-lo *et al.*, 2019).

A dominância por Cyanobacteria na lagoa tem relação direta com o histórico de aporte de nutrientes via bombeamento de água do canal da passagem e/ou lançamento clandestino de efluentes do próprio *campus* na lagoa, o qual, aliado à baixa profundidade, pH e temperaturas elevadas, configura um ambiente propício a florações constantes deste grupo (Brasil *et al.*, 2016). Essas características foram relatadas por Bohnenberger *et al.* (2018) e Aragão-Tavares (2017) que estudando lagoas da região sul e nordeste brasileiras, respectivamente, também sugeriram a predominância de cianobactérias em ambientes com histórico de eutrofização por ação antrópica. Este padrão de

dominância por Cyanobacteria é sustentado pelo trabalho de O'Neil *et al.* (2012), que mostraram o potencial de florações de cianobactérias em ambientes eutrofizados, e as implicações das características limnológicas locais no metabolismo dessas espécies.

Vale ressaltar que, os resultados apresentados neste estudo não mostraram aumentos significativos na PPB da comunidade quando submetida a luz verde, assim como mostrado na revisão de Schulze *et al.* (2014). Este resultado se relaciona ao fato que o espectro de absorção de energia das clorofilas possui picos de absorção nas faixas de luz azul e vermelha e apresentar baixa taxa de absorção da energia contida na faixa do verde (Allakhverdiev *et al.*, 2016). De fato, ao compararmos os espectros de absorção das clorofilas e ficopiliproteínas apresentados por Hsieh-lo *et al.* (2019), nota-se que ambas apresentam baixas taxas de absorção em comprimentos de ondas contidos na faixa de luz verde, corroborando nossos dados.

Quanto aos valores de PPBa, observa-se leve tendência de aumento junto ao aumento no biovolume das classes Trebouxiophyceae e Dinophyceae, ou seja, os valores de PPBa, assim como evidenciado por trabalhos de Atta *et al.* (2013), Baba *et al.* (2012) e Tonetto *et al.* (2012), estão diretamente relacionados a adaptação do espectro de absorção das clorofilas à luz azul. Este aumento na PPBa em relação à classe Trebouxiophyceae fica evidente quando analisada a produtividade primária líquida, uma vez que o biovolume desta classe esteve diretamente correlacionado aos valores PPLa.

Contudo, a redução da PPBa e PPBv em comunidade dominada por Cyanobacteria, permite uma discussão acerca dos possíveis usos de técnicas com a aplicação de filtros de luz natural, em ecossistemas com registros de florações, como forma de controle deste tipo de evento, uma vez que a aplicação de filtros que bloqueiam a atividade fotossintética em seus picos de absorção de energia, poderá reduzir as taxas fotossintéticas e conseqüentemente a produção de compostos essenciais à manutenção da população algal dominante, podendo resultar em queda drástica de sua densidade numérica devido a redução da incidência de comprimentos de onda ótimos para o desenvolvimento do grupo em questão.

Essa redução de compostos foi observada em Lima *et al.* (2018), onde a aplicação de filtro azul promoveu queda na produção de biomassa e pigmentos em *Arthrospira platensis*. Além disso, os trabalhos apresentados por Tonetto *et al.* (2012), Lawrenz *et al.* (2010) e Rivkin (1989) evidenciam a pressão exercida por faixas de comprimentos de onda sobre seleção e composição de espécies da comunidade fitoplanctônica, e isso, aliado aos resultados apresentados no presente estudo, mostram a necessidade de trabalhos com enfoque ecofisiológico, sobre a pressão seletiva e principais adaptações às diferentes faixas do espectro luminoso em organismos fotossintetizantes.

Finalmente, concluímos que os comprimentos de ondas compreendidos na faixa do vermelho se mostraram mais eficientes no incremento da produtividade primária em comunidades dominadas por Cyanobacteria, sendo essa produtividade, bruta e líquida, semelhante ou superior ao tratamento utilizando filtro transparente. A predominância de cianobactérias, durante grande parte do período amostrado esteve diretamente relacionada ao aumento de produtividade no vermelho, provavelmente devido aos maiores valores de ficocianina encontrados neste grupo. Estudos contínuos e mais aprofundados, envolvendo a dinâmica de Cyanobacteria e suas concentrações de ficobiliproteínas e carotenoides, além das clorofilas, submetida a estes tratamentos se tornam necessários para o aprofundamento das conclusões encontrada deste estudo e confirmar a relação entre biovolume elevado de Cyanobacteria e concentração de ficocianina, com o aumento da produtividade primária encontrada neste estudo.

REFERÊNCIAS

- Allakhverdiev, S.I., Kreslavski, V.D., Zharmukhamedov, S.K., Voloshin, R.A., Korol'kova, D.V. Tomo, T. & Shen, J.-R. (2016). Chlorophylls d and f and Their Role in Primary Photosynthetic Processes of Cyanobacteria. *Biochemistry*, 81(3), 201-212.
- Aragão-Tavare, N.K.C., Moura, A.N. & Dantas, E.W. (2017). Persistence and stability of phytoplankton communities in eutrophic reservoirs of northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Botany*, 40(3), 1-11.

- Atta, M., Idris, A., Bukhari, A. & Wahidin, S. (2013). Intensity of blue LED light: A potential stimulus for biomass and lipid content in fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 148, 373-378.
- Baba, M., Kikuta, F., Suzuki, I., Watanabe, M.M. & Shiraiwa, Y. (2012). Wavelength specificity of growth, photosynthesis, and hydrocarbon production in the oil-producing green alga *Botryococcus braunii*. *Bioresource Technology*, 109, 266-270.
- Bohnenberger, J.E., Schneck, F., Crossetti, L.O., Lima, M.S. & Motta-Marques, A.D (2018). Taxonomic and functional nestedness patterns of phytoplankton communities among coastal shallow lakes in Southern Brazil. *Journal of Plankton Research.*, 40(5), 555–567. Doi:10.1093/plankt/fby032
- Brasil, J., Attayde, J.L., Vasconcelos, F.R., Dantas, D.D.F. & Huszar, V.L.M. (2016). Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. *Hydrobiologia*, 770, 145-164. DOI 10.1007/s10750-015-2578-5.
- Chandaravithoon, P., Nakphet, S. & Ritchie, R.J. (2018) Oxygenic and anoxygenic photosynthesis in a sewage pond. *Journal of Applied Phycology*, 30, 3089-3102. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1432-3>.
- Choi, Y.K., Kumaran, R.S., Jeon, H.J., Song, H.J., Yang, Y.H., Lee, S.H., Song, K.G., Kim, K.J., Singh, V. & Kim, H.J. (2015). LED light stress induced biomass and fatty acid production in microalgal biosystem, *Acutodesmus obliquus*. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 145, 245-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2015.03.035>.
- Cole, G. (1994). *Textbook of Limnology* (2th ed.). Saint Louis: The C. V. Mosby.
- Duarte, J.H., Souza, C.O., Druzian, J.I. & Costa, J.A.V. (2019). Light emitting diodes applied in *Synechococcus nidulans* cultures: Effect on growth, pigments production and lipid profiles. *Bioresource Technology*, 280, 511-514.
- Edler, L. (1979). Recommendations for marine biological studies in the Baltic Sea. Phytoplankton and chlorophyll. *Baltic Marine Biologists*, 5,1-39.

- Golterman, H.L., Clymo, R.S. & Ohnstad, M.A.M. (1978). *Methods for physical and chemical analysis of freshwater*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Hillebrand, H., Dürselen, E.D., Kirschtel, D., Pollinger, U. & Zohary, T. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 35, 403-424.
- Hohmann-Marriott, M.F. & BLANKENSHIP, R.E. (2011). Evolution of Photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 62, 515–548.
- Hsieh-Lo, M., Castillo, G., Ochoa-Becerra, M.A. & Mojica, L. (2019). Phycocyanin and phycoerythrin: Strategies to improve production yield and chemical stability. *Algal Research*, 42, 1-11.
- Josse, J. & Husson, F. (2016). missMDA a package to handle missing values in principal component methods. *Journal of Statistical Software*, 70(1). <http://factominer.free.fr>.
- Jeffrey, S.W. & Humphrey, G.F. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae, and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 167(2), 191-194.
- Kragh, T. & Sand-Jensen, K. (2018). Carbon limitation of lake productivity. *Proceedings of Royal Society B*, 285, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2018.1415>.
- Lawrenz, E., Pinckney, J.L., Ranhofer, M.L., MacIntyre, H.L. & Richardson, T.L. (2010). Spectral Irradiance and Phytoplankton Community Composition in a Blackwater-Dominated Estuary, Winyah Bay, South Carolina, USA. *Estuaries and Coasts*, 33, 1186-1201. DOI 10.1007/s12237-010-9310-5.
- Lima, G.M., Teixeira, P.C.N., Teixeira, C.M.L.L., Filócomo, D. & Lage, C.L.S. (2018). Influence of spectral light quality on the pigment concentrations and biomass productivity of *Arthrospira platensis*. *Algal Research*, 31, 157-166.
- Lobo, E. & Leighton, G. (1986). Estructuras comunitarias de las fitocenosis planctónicas de los sistemas de desembocaduras de ríos y esteros de la zona central de Chile. *Revista de Biología*, 22(1), 1-29.

- Lorenzen, C.J. (1967). Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*, 12, 343-346.
- Marañón, E., Lorenzo, M.P., Cermeño, P. & Mouriño-Carballido, B. (2018). Nutrient limitation suppresses the temperature dependence of phytoplankton metabolic rates. *The ISME Journal*, 12, 1836-1845. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0105-1>.
- Martins, F.C.O. & Fernandes, V.O. (2006). Fitoplâncton da lagoa do *campus* universitário da UFES (Vitória, ES): estrutura da comunidade e condições ecológicas. *Neotropical Biology and Conservation*, 1(2), 101-109.
- Michael, C., Ninno, M.D., Gross, M. & Wen, Z. (2015). Use of wavelength-selective optical light filters for enhanced microalgal growth in different algal cultivation systems. *Bioresource Technology*, 179, 473-482.
- Nishihara, A., Haruta, S., McGlynn, S.E., Thiel, T. & Matsuura, K. (2018). Nitrogen Fixation in Thermophilic Chemosynthetic Microbial Communities Depending on Hydrogen, Sulfate, and Carbon Dioxide. *Microbes and Environments*, 33(1), 10-18. Doi:10.1264/jsme2.ME17134.
- O'neil, J.M., Davis, T.W., Burford, M.A. & Gobler, C.J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*. v.14, p.313–334, 2012.
- Pereira, J.B. & Loureiro-Fernandes, L. (1999). Variação temporal do zooplâncton da lagoa da UFES, Vitória, Espírito Santo. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 11(2), 79-88.
- Raeisossadati, M., Moheimani, N.R. & Parlevliet, D. (2019). Red and blue luminescent solar concentrators for increasing *Arthrospira platensis* biomass and phycocyanin productivity in outdoor raceway ponds. *Bioresource Technology*, 291,1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121801>.
- Rivkin, R.B. (1989). Influence of irradiance and spectral quality on the carbon metabolism of phytoplankton. I. Photosynthesis, chemical composition and growth. *Marine Ecology Progress Series*, 55, 291-304.

- Rstudio Team. (2019). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA. URL <http://www.rstudio.com/>.
- Schulze, P.S.C, Barreira, L.A., Pereira, H.G.C., Perales, J.A. & Varela, J.C.S. (2014). Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production. *Trends in Biotechnology*, 32(8), 422-430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.06.001>.
- Sun, J. & Liu, D. (2003). Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 25, 1331-1346.
- Tonetto, A.F., Branco, C.C.Z. & Peres, C.K. (2012). Effects of irradiance and spectral composition on the establishment of macroalgae in streams in southern Brazil. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 48, 363-370. DOI: 10.1051/limn/2012027.
- Uehlinger, V. (1964). Étude statistique des méthodes de dénombrement planctonique. *Arch. Sci.*, 17(2), 121-123.
- Utermöhl, H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitt. Int. Verein. Theor. Angew. Limnologie*, 9, 1-38.
- Verma, B.S. & Srivastava, S.K. (2016). Study of Factors Affecting Phytoplankton Primary Productivity in a Pond of Patna, Bihar, India. *Nature Environment and Pollution Technology*, 15(1), 291-296.
- Walter, A., Carvalho, J.C., Soccol, V.T., Faria, A.B.B., Ghiggi, V. & Soccol, C.R. (2011). Study of Phycocyanin Production from *Spirulina platensis* Under Different Light Spectra. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 54(4), 675-682.
- Wahidin, S., Idris, A. & Shaleh, S.R.M. (2013). The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis* sp.. *Bioresource Technology*, 129, 7–11.
- Weber, C. I. (1973). Plankton. In National Environmental Research Center Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati (Ed.). *Biological Field and Laboratory Methods for Measuring the Quality Surface Water and Effluents*. U.S.A., pp.1-17.

Wetzel, R.G. & Likens, G.E. (2000). *Limnological Analyses* (3thed.). New York. Springer-Verlag.

Yan, C., Zhang, L., Luo, X. & Zheng, Z. (2013). Effects of various LED light wavelengths and intensities on the performance of purifying synthetic domestic sewage by microalgae at different influent C/N ratios. *Ecological Engineering*, 51, 24-32.

Tabela 1: Estatística descritiva (mínimo, máximo, média e desvio padrão) das principais variáveis analisadas na lagoa da UFES, no período de setembro de 2018 a agosto de 2019.

VARIÁVEL	MÍN.	MÁX.	MÉDIA	DP
Temperatura da água (°C)	25.0	33.7	29.6	2.8
Condutividade elétrica (mS/m ²)	2.2	6.7	3.5	1.3
pH	6.8	9.6	7.7	1.0
Oxigênio dissolvido (mg.L ⁻¹)	3.7	14.7	10.6	3.8
Salinidade	1.2	7.0	2.5	1.6
Turbidez (NTU)	42.9	222.0	95.7	53.0
Radiação solar (KJ/m ²) x 10 ⁵	3.8	26.4	16.9	7.6
Temperatura do ar (°C)	18.5	30.8	25.8	3.8
Riquena (n ^o táxons)	5.0	22.0	12.9	6.4
Densidade Cyanobacteria (Ind.mL ⁻¹) x 100	32.4	806.0	202.6	214.9
Densidade Trebouxiophyceae (Ind.mL ⁻¹) x 100	0.0	5158.3	666.8	1477.5
Densidade Chlorophyceae (Ind.mL ⁻¹) x 100	0.0	821.5	94.9	237.0
Densidade Dinophyceae (Ind.mL ⁻¹) x 100	0.0	47.9	7.0	14.6
Biovolume Cyanophyceae (µm ³ .mL ⁻¹) x 10 ⁵	11.4	2294.8	722.0	619.8
Biovolume Trebouxiophyceae (µm ³ .mL ⁻¹) x 10 ⁵	0.0	135.2	27.4	45.9
Biovolume Chlorophyceae (µm ³ .mL ⁻¹) x 10 ⁵	0.0	239.6	26.7	68.9
Biovolume Dinophyceae (µm ³ .mL ⁻¹) x 10 ⁵	0.0	594.6	86.9	181.0
Clorofila <i>a</i> (µg.L ⁻¹)	63.2	467.9	198.8	133.8
Clorofila <i>b</i> (µg.L ⁻¹)	0.0	89.0	28.1	30.1
Clorofila <i>c</i> (µg.L ⁻¹)	0.0	117.5	36.7	34.3
Produtividade primária bruta controle (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	1.7	6.7	3.7	1.8
Produtividade primária bruta transparente (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	1.6	7.1	3.1	1.6
Produtividade primária bruta azul (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	0.6	3.6	2.2	0.9
Produtividade primária bruta verde (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	0.7	4.4	2.1	1.0
Produtividade primária bruta vermelho (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	1.9	6.0	3.7	1.4
Produtividade primária líquida controle (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	-0.5	5.5	2.4	2.1
Produtividade primária líquida transparente (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	-1.0	5.9	1.7	2.1
Produtividade primária líquida azul (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	-1.4	2.5	0.8	1.2
Produtividade primária líquida verde (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	-2.1	3.2	0.7	1.4
Produtividade primária líquida vermelho (mgO ₂ .L ⁻¹ .h ⁻¹)	-0.1	4.8	2.3	1.6

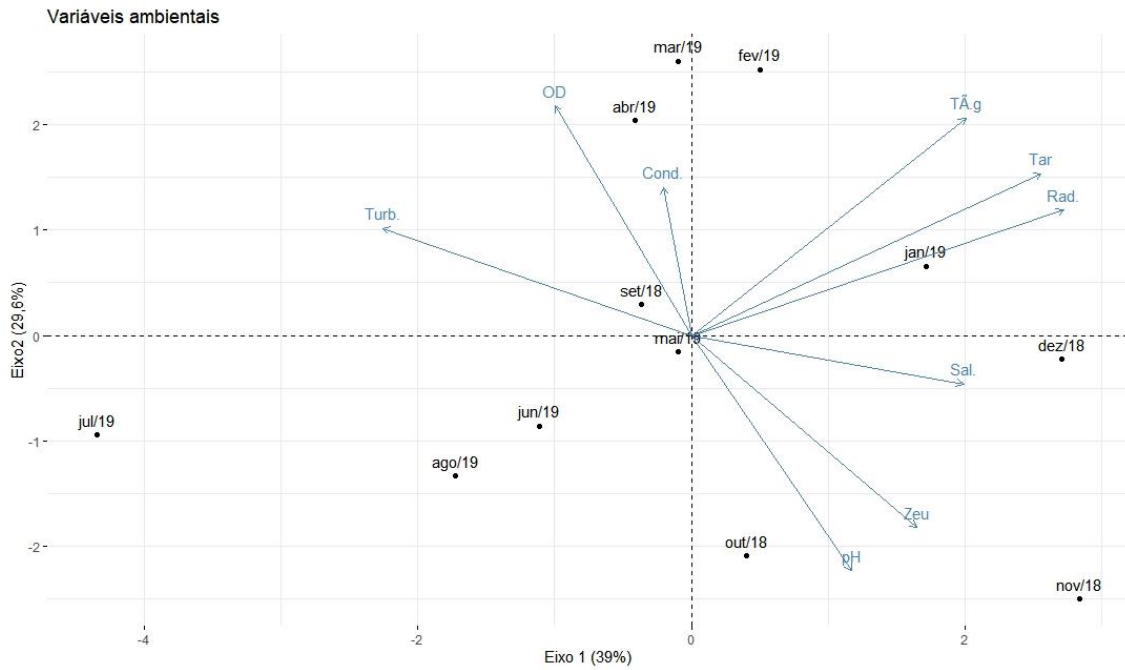


Figura 4: Biplot da análise de componentes principais (ACP) baseada na correlação das variáveis ambientais (setas) com cada eixo e ordenação das amostras coletadas na lagoa, no período de setembro de 2018 a agosto de 2019. Zeu – zona eufótica; Tag – Temperatura da água; Cond. – Condutividade elétrica; OD – oxigênio dissolvido; Sal. – salinidade; Turb. – turbidez; Rad. – radiação solar; Tar – temperatura do ar; Prec. – precipitação; Chla – clorofila a.

Tabela 2: Lista dos táxons e frequência de ocorrência nos meses de coleta. (BACI: Bacillariophyceae; CHLO: Chlorophyceae; CYAN: Cyanobacteria; DINO: Dinophyceae e TREB: Trebouxiophyceae). x: Presença do táxon, A: Táxon abundante, D: Táxon dominante.

TÁXON	Freq. (%)	Ocorrência											
		14	24	13	8	8	10	12	19	23	18	23	13
		set/18	out/18	nov/18	dez/18	jan/19	fev/19	mar/19	abr/19	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19
BACI <i>Navicula amphiceropsis</i> Lange-Bertalot & U.Rumrich	8								x				
CHLO <i>Coelastrum astroideum</i> De Notaris	42	x		x						x	x	x	
CHLO <i>Coelastrum indicum</i> W.B.Turner	8											x	
CHLO <i>Coelastrum microporum</i> Nägeli	67	x	x	x	x					x	x	x	x
CHLO <i>Coelastrum sphaericum</i> Nägeli	8									x			
CHLO <i>Desmodesmus armatus</i> (Chodat) E.H.Hegewald	17									x	x		
CHLO <i>Desmodesmus bicaudatus</i> (Dedusenko) P.M.Tsarenko	25									x	x	x	
CHLO <i>Desmodesmus quadricaudatus</i> (Turpin) Brébisson	8		x										
CHLO <i>Eutetramorus fottii</i> (Hindák) Komárek	8	x											
CHLO <i>Hariotina reticulata</i> P.A.Dangeard	17										x	x	
CHLO <i>Monoraphidium contortum</i> Komárková-Legnerová	8										x		
CHLO <i>Monoraphidium griffithii</i> (Berkeley) Komárková-Legnerová	42								x	x	x	x	A
CHLO <i>Pandorina morum</i> (O.F.Müller) Bory	17								x				x
CHLO <i>Pseudopediastrum boryanum</i> (Turpin) E.Hegewald	33		x								x	x	x
CHLO <i>Scenedesmus bijugus</i> (Turpin) Lagerheim	17											D	A
CHLO <i>Tetraedron minumum</i> (A.Braun) Hansgirg	50	x	x						x	x	x	x	
CYAN <i>Anabaenopsis elenkinii</i> V.V.Miller	42	x	A	A						x		x	

TÁXON		Freq. (%)	set/18	out/18	nov/18	dez/18	jan/19	feb/19	mar/19	abr/19	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19
CYAN	<i>Aphanocapsa elachista</i> West & G.S.West	100	x	x	x	x	A	A	x	A	x	x	x	x
CYAN	<i>Aphanocapsa holsatica</i> (Lemmermann) G.Cronberg & Komárek	50	x	x						x	x	x	x	
CYAN	<i>Aphanocapsa incerta</i> (Lemmermann) G.Cronberg & Komárek	67		x	x	A			x	x	x	x	x	
CYAN	<i>Aphanocapsa planctonica</i> (G.M.Smith) Komárek & Anagnostidis	25		x	x			x						
CYAN	<i>Aphanothece microscópica</i> Nägeli	17		x							x			
CYAN	<i>Borzia trilocularis</i> Cohn ex Gomont	50	x							x	x	x	x	x
CYAN	<i>Chroococcus minor</i> (Kützing) Nägeli	17		x							x			
CYAN	<i>Chroococcus turgidus</i> (Kützing) Nägeli	33					x		x	x	x			
CYAN	<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing	75		x			A	A	A	A	x	x	A	A
CYAN	<i>Microcystis flos-aquae</i> (Wittrock) Kirchner	42		x	x	x		x	x					
CYAN	<i>Microcystis natans</i> Lemmermann ex Skuja	25		x				x					x	
CYAN	<i>Microcystis protocystis</i> W.B.Crow	42				x			x	x		x	x	
CYAN	<i>Microcystis smithii</i> Komárek & Anagnostidis	83		x	x	D	D	D	D	D	x		x	x
CYAN	<i>Phormidium</i> sp. Kützing ex Gomont	42		x	x		x		x	x				
CYAN	<i>Planktolyngbya limnetica</i> (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg	25	x	x										x
CYAN	<i>Pseudanabaena galeata</i> Böcher	17		x	x									
CYAN	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (Lemmermann) Komárek	100	x	x	x	x	x	x	x	x	D	x	x	x
CYAN	<i>Snowella lacustres</i> (Chodat) Komárek & Hindák	8	x											
CYAN	<i>Spirulina</i> sp. Turpin ex Gomont	17		x									x	
CYAN	<i>Synechocystis aquatilis</i> Sauvageau	42		x						x	x	x	x	
CYAN	<i>Geitlerinema amphibium</i> (C.Agardh ex Gomont) Anagnostidis	8						x						

TÁXON		Freq. (%)	set/18	out/18	nov/18	dez/18	jan/19	fev/19	mar/19	abr/19	mai/19	jun/19	jul/19	ago/19
CYAN	<i>Leptolyngbya lagerheimii</i> (Gomont ex Gomont) Anagnostidis & Komárek	8								x				
DINO	Dinophyceae 1	50							x	x	A	x	x	x
TREB	<i>Chlorella vulgaris</i> Beyerinck [Beijerinck]	100	D	D	D	x	x	x	x	x	A	D	x	A
TREB	<i>Oocystis lacustres</i> Chodat	75	x	x	x		x	x	x	x	x			x

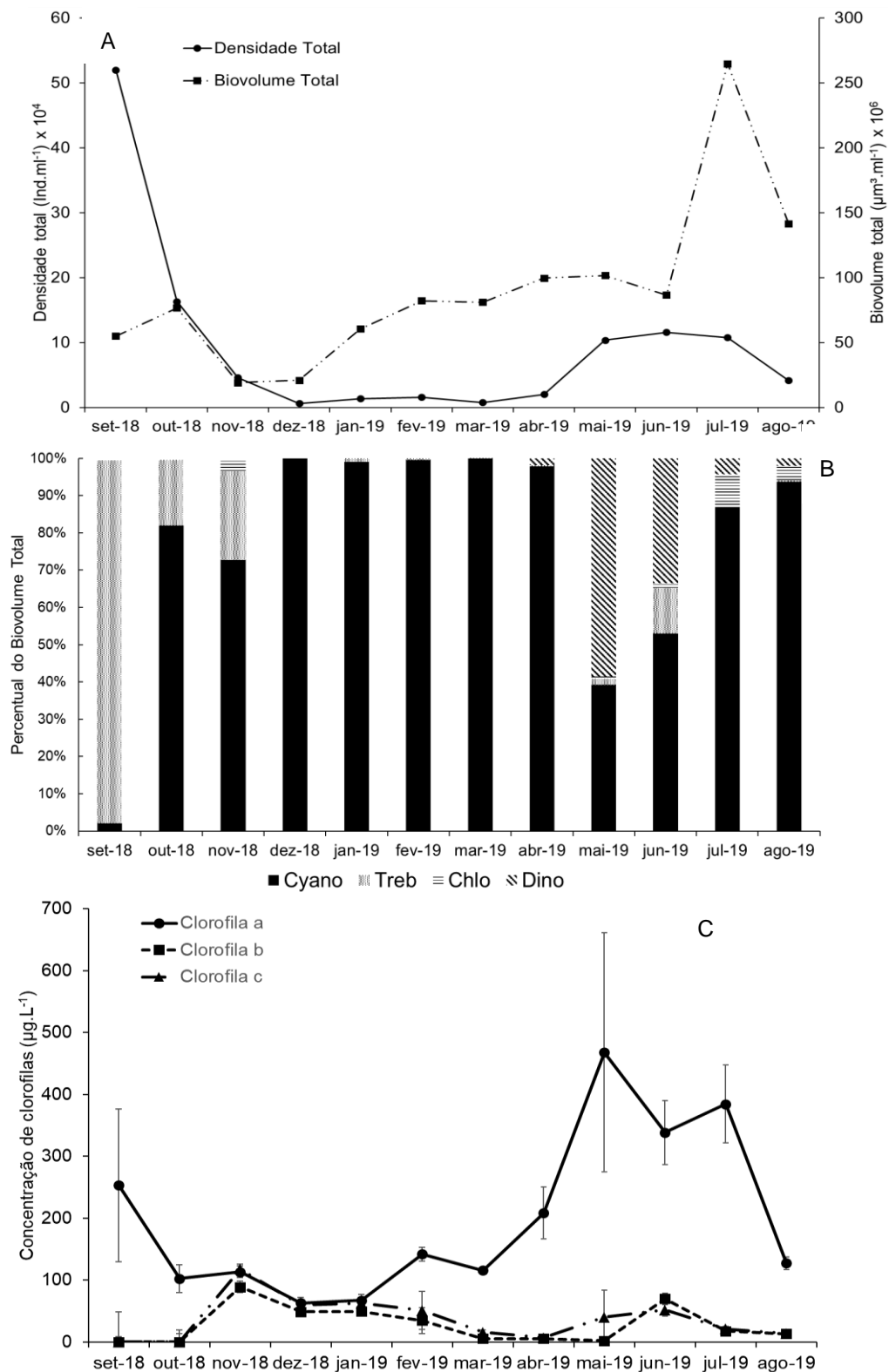


Figura 5: Variação temporal na densidade e biovolume totais da comunidade fitoplanctônica. A – variação temporal da densidade total e biovolume total; B – Contribuição relativa de cada classe para o biovolume total; C – Variação temporal das concentrações de clorofilas a, b e c.

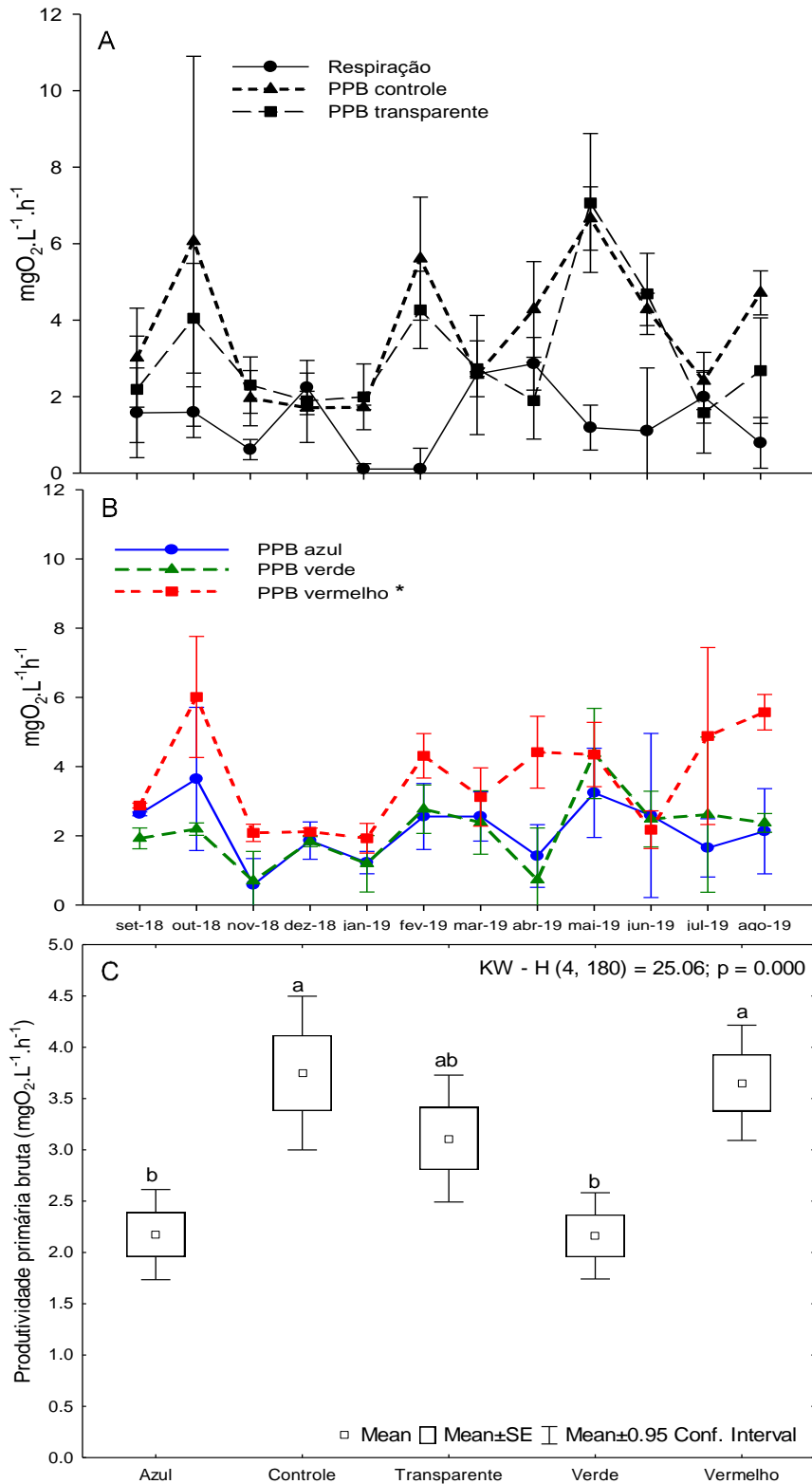


Figura 6: Variação temporal da respiração e produtividade primária bruta (PPB) da comunidade fitoplanctônica e médias dos tratamentos aplicados. A – variação temporal da respiração e PPB controle e transparente; B – variação temporal da PPB para os tratamentos (azul, verde e vermelho); C – boxplots para as médias de PPB.

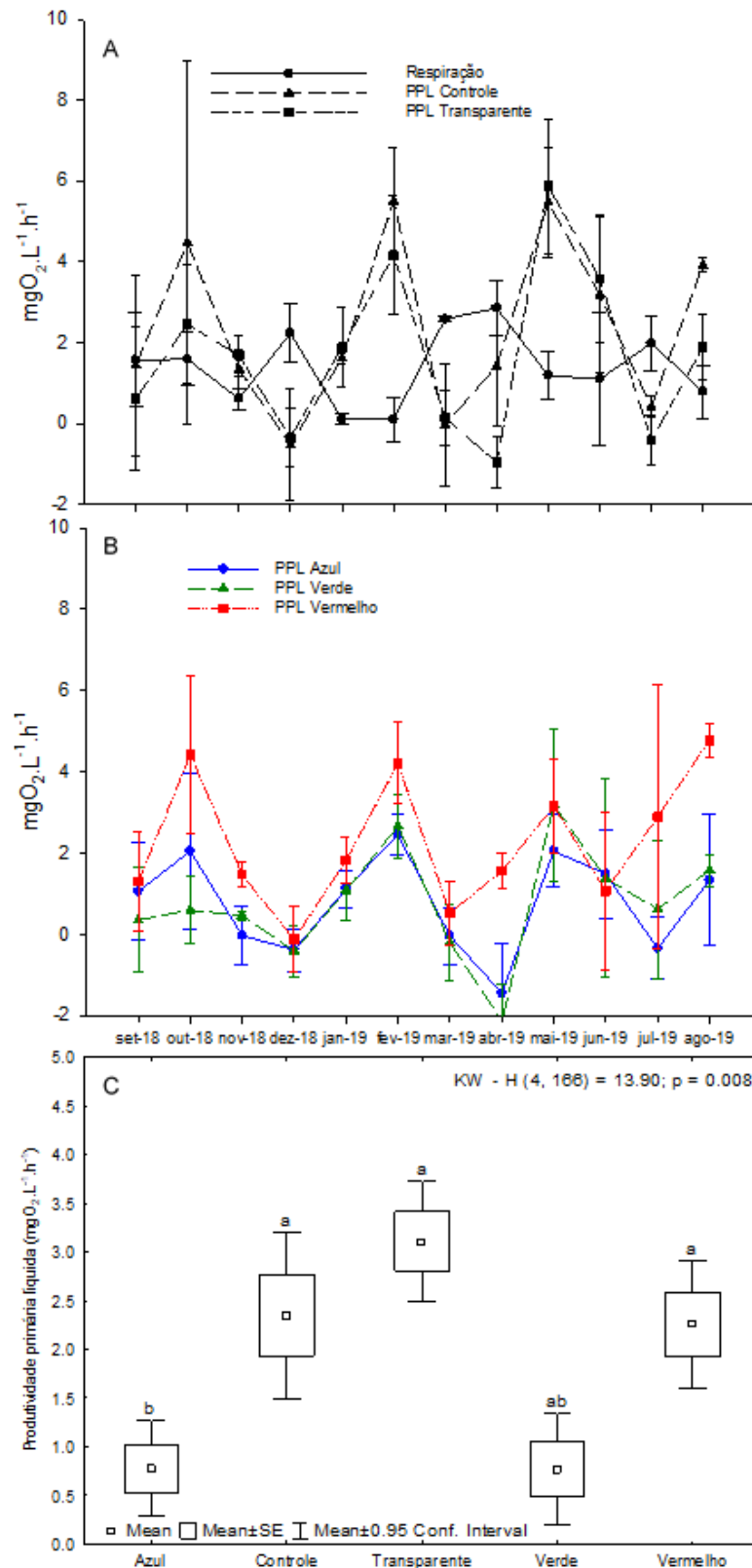


Figura 7: Variação temporal da respiração e produtividade primária líquida (PPL) da comunidade fitoplanctônica e médias dos tratamentos aplicados. A – variação temporal da respiração e PPL controle e transparente; B – variação temporal da PPL para os tratamentos

Tabela 3: Correlação de Spearman entre os valores de produtividade primária bruta (PPB) e líquida (PPL) e biovolume das principais classes registradas. Re = respiração; c = controle; t = transparente; a = azul; v = verde; ve = vermelho; Treb = Trebouxiophyceae; Chlo = Chlorophyceae; Dino = Dinophyceae; Cyano = Cyanobateria. Coeficientes representados em negrito representam correlação significativa.

	Re	PPBc	PPBt	PPBa	PPBv	PPBve	PPLc	PPLt	PPLa	PPLv	PPLve
Treb	-0.430824	0.409808	0.528897	0.472855	-0.077058	-0.108582	0.539405	0.577934	0.577934	0.276708	0.150613
Chlo	-0.152274	0.290046	0.159525	0.166776	0.377059	0.391561	0.188530	0.174027	0.217534	0.464073	0.369808
Dino	0.077980	0.421092	0.241738	0.171556	0.522466	0.374304	0.249536	0.171556	0.140364	0.467880	0.233940
Cyan	0.174825	0.223776	-0.146853	-0.167832	0.314685	0.664336	0.104895	-0.209790	-0.069930	0.153846	0.517483

7 CONCLUSÕES GERAIS

As faixas de luz contidas na faixa de luz vermelha se mostraram mais eficientes para o aumento das taxas de produtividade primária, bruta e líquida, da comunidade fitoplanctônica da lagoa da UFES. A dominância apresentada pela classe Cyanobacteria na maior parte do período estudado, foi o principal fator determinante para a elevação da produtividade primária no tratamento com filtro vermelho, o que faz com que nossa hipótese inicial fosse refutada, uma vez que dentre os tratamentos aplicados, o tratamento com maiores valores de produtividade primária foi aquele com menor valor energético, mostrando que a produtividade primária local teve maior relação, provavelmente, com as concentrações de ficocianina, típicas de Cyanobacteria, do que com as concentrações de clorofila *a*.

8 PERSPECTIVAS

Estudos contínuos e mais aprofundados, envolvendo a dinâmica de cianobactérias e suas concentrações de ficobiliproteínas e carotenoides, além das clorofilas, submetida à essas faixas restritas de qualidade da luz se tornam necessários para o aprofundamento das conclusões do presente estudo e confirmar a possível relação entre biovolume elevado e concentração de ficocianina, com o aumento da produtividade primária na faixa de luz vermelha.

A partir dos dados obtidos no presente estudo, poderão ser formuladas novas perguntas, tais quais:

- a) Aplicação de faixas restritas de comprimentos de onda podem selecionar espécies (ou grupos) diferentes dentro de uma comunidade fitoplanctônica?
- b) Diferentes faixas de comprimentos de onda são capazes de controlar florações de algas e produção de metabólitos secundários nocivos?