

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Juliana Hayden

**Distribuição de assembleias fitoplanctônicas (Atlântico Sudoeste 27°S): correlação com parâmetros biogeoquímicos e meteorológicos no entorno de floração ocasional de *Trichodesmium erythraeum* (Cyanobacteria) sobre plataforma continental.**

Florianópolis

2021

Juliana Hayden

**Distribuição de assembleias fitoplanctônicas (Atlântico Sudoeste 27°S): correlação com parâmetros biogeoquímicos e meteorológicos no entorno de floração ocasional de *Trichodesmium erythraeum* (Cyanobacteria) sobre plataforma continental.**

Trabalho de Conclusão do 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 Bacharela em Oceanografia.

Orientador: Prof. Leonardo Rubi Rörig, Dr.

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup>.Alessandra Larissa D'Oliveira Fonseca, Dr.<sup>a</sup>.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Hayden, Juliana

Distribuição de assembleias fitoplanctônicas (Atlântico Sudoeste 27°S) : correlação com parâmetros biogeoquímicos e meteorológicos no entorno de floração ocasional de *Trichodesmium erythraeum* (Cyanobacteria) sobre plataforma continental. / Juliana Hayden ; orientador, Leonardo Rubi Rörig, coorientadora, Alessandra Larissa D'Oliveira Fonseca, 2021.

58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. *Trichodesmium*. 3. Água Subtropical de Plataforma. 4. Fertilização. 5. Fitoplâncton. I. Rubi Rörig, Leonardo. II. Larissa D'Oliveira Fonseca, Alessandra. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Oceanografia. IV. Título.

Juliana Hayden

**Distribuição de assembleias fitoplanctônicas (Atlântico Sudoeste 27°S): correlação com parâmetros biogeoquímicos e meteorológicos no entorno de floração ocasional de *Trichodesmium erythraeum* (Cyanobacteria) sobre plataforma continental.**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de bacharela e aprovado em sua forma final pelo Curso de Oceanografia.

Florianópolis, 17 de setembro de 2021.

---

Prof. Alessandra Larissa D'Oliveira Fonseca, Dra.  
Coordenador do Curso e coorientadora neste trabalho

**Banca Examinadora:**

---

Prof.: Leonardo Rubi Rörig, Dr.  
Orientador  
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.(a): Kalina Brauko, Dra.  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Alex Cabral dos Santos, doutorado em andamento.  
Avaliador  
University of Gothenburg

March 18th. — “We sailed from Bahia. A few days afterwards, when not far distant from the Abrolhos Islets, my attention was called to a reddish-brown appearance in the sea. The whole surface of the water, as it appeared under a weak lens, seemed as if covered by chopped bits of hay, with their ends jagged”.

Charles Darwin, *The Voyage of the Beagle* (1832)

Veja as coisas que o criador fez  
E o homem admira sem cessar  
Apesar de ele ser um grande artista  
É o céu é a terra, o verde mar  
A mulher que neste planeta habita  
Fez a flora no reino vegetal  
Os minérios no reino mineral  
Fez os seres no reino animal  
O progresso do homem na ciência  
Tudo isso obedece a providência  
A vontade do pai celestial

Tudo isso o homem admira  
São coisas que não pode fazer  
Louco é quem não quer reconhecer  
O poder que tem a sabedoria  
De fazer tudo com tanta harmonia  
Vou falar na alta filosofia  
Que nem um grande pensador profundo  
O que a mulher pensa num segundo  
Reunidos escritores do mundo  
Não é capaz de escrever em um só dia

“O criador” – Ary Lobo (Edgar Ferreira)

Este trabalho é dedicado à tripulação do Ciências do Mar I, no cruzeiro realizado entre os dias 10 e 12 de dezembro de 2018; aos meus colegas e professores que participaram comigo desta que foi a melhor experiência acadêmica que eu tive durante a graduação; e aos que me ajudaram até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não é só meu. São várias pessoas que estiveram comigo durante a graduação e que de algum modo me ajudaram a completar essa etapa da minha formação.

Primeiramente obrigada ao bando de louco que é a minha família. Vocês acompanharam tudo de pertinho, mesmo de longe. E deu certo! O sonho está quase lá, em breve vou ser oceanógrafa, formada na UFSC! Vocês fazem parte disso assim como fazem parte de quem eu sou. Amo vocês.

Ao André, meu companheiro nos dias de sol e de chuva, obrigada meu bem. ♥

Meu muito obrigada a todo o corpo docente da Oceanografia UFSC.

Ao meu orientador, Leonardo Rubi Rörig, obrigada por todo o suporte. Obrigada por aceitar me orientar, me ajudar desde a preparação para o embarque a bordo do Ciências do Mar, nas identificações do fitoplâncton, nas quantificações, nas dúvidas que surgiram no processo.

À coorientadora deste trabalho, Alessandra Larissa D'Oliveira Fonseca, muito obrigada! Você foi um alicerce durante todo o processo. Obrigada por ser uma mulher fazendo ciência no sul do mundo, com sorriso no rosto e a luta por igualdade sempre em mente, em universidade pública e de qualidade. Você é uma inspiração!

Às gurias: Hillary, Letícia, Diênifer, Luanna, Luana, Khauany, Nandara e Tamylla. Um obrigada do tamanho do eco do nosso grito de guerra: AH-ÁH!

À minha turma maravilhosa, a melhor, a imbatível turma de 2016.1, obrigada!!

Obrigada a todos que de alguma forma me auxiliaram durante a caminhada. A Oceanografia UFSC é um time lindo demais.

À minha banca avaliadora Alex Cabral dos Santos e Kalina Brauko, obrigada por aceitarem fazer parte deste processo. Andreia Santarosa Freire obrigada pelas correções durante as etapas anteriores em metodologia e TCCI.

## RESUMO

O presente trabalho analisou a composição e distribuição espacial do fitoplâncton em subsuperfície em uma área da plataforma continental de Santa Catarina com ocorrência de mancha neustônica da cianobactéria *Trichodesmium erythraeum*, buscando relacionar esses dados com parâmetros biogeoquímicos. Amostras de água coletadas com garrafas de Niskin foram usadas para determinar as variáveis abióticas: nutrientes inorgânicos dissolvidos (nitrato+nitrito, amônio, silicato e fosfato); gases dissolvidos (OD e CO<sub>2</sub>); pH e clorofila-a. Os parâmetros físicos temperatura (°C) e salinidade foram coletados na coluna d'água com o uso de um CTD (CastWay) e deram suporte à delimitação das massas de água presentes em dois transectos perpendiculares à costa de Santa Catarina na primavera de 2018. As mesmas amostras foram utilizadas para a quantificação do fitoplâncton. Adicionalmente, arrastos de rede de fitoplâncton de 20 µm geraram amostras qualitativas para identificação das espécies presentes. A mancha neustônica foi coletada com auxílio de um balde. A identificação do fitoplâncton foi feita até o menor nível taxonômico possível em microscópio óptico convencional. As quantificações foram feitas em microscópio invertido com câmera acoplada utilizando câmaras de sedimentação de Utermöhl. Os intervalos termohalinos indicaram a presença de três massas d'água distintas, sendo Água Subtropical de Plataforma (ASTP) em superfície, seguida de Água Tropical (AT) e Água Central do Atlântico Sul (ACAS) ocupando água de fundo em isóbatas mais afastadas da costa. O máximo para o amônio foi encontrado na região no entorno da floração, alcançando 8,3 µM. A estação ainda apresentou razão N:P = 35 e razão Si:N = 2, ambos valores acima da média considerando todas as estações. O máximo de OD e um baixo valor de CO<sub>2</sub> também foram identificados para o entorno da floração de *T. erythraeum*, além de um pico de clorofila (0,9 µM). Foram identificadas 127 espécies a partir das amostras de rede e 87 a partir das amostras de garrafa. A densidade de células do nêuston alcançou 3,1x10<sup>7</sup> tricomas.L<sup>-1</sup>, com *T. erythraeum* contribuindo com 99% da densidade total. A média para a densidade de células encontrada nas amostras de garrafa foi 1,6x10<sup>4</sup>cél.L<sup>-1</sup>, variando entre 1,2x10<sup>3</sup> e 3x10<sup>4</sup>cél.L<sup>-1</sup>. Na estação da floração, o valor foi 1,2x10<sup>4</sup> cél.L<sup>-1</sup>. Apenas dois pontos não tiveram diatomáceas compondo a maior parte da composição do microfitoplâncton, um deles na estação da floração, onde foi identificado um máximo para ciliados (46%) e uma baixa contribuição por diatomáceas (26%). As variáveis abióticas e os valores de velocidade do vento foram selecionados, a partir de uma Análise de Componentes Principais (PCA), como as variáveis que melhor explicam a variabilidade dos dados. Temperatura e salinidade foram suprimidas desta ordenação pois todas as amostragens em subsuperfície faziam parte da mesma massa de água (ASTP). No ponto onde ocorreu a floração, a PCA apresentou melhor correlação com as variáveis pH, silicato, OD e NH<sub>4</sub>. Variáveis bióticas (densidades) e as variáveis abióticas que melhor responderam à variabilidade dos dados na PCA foram usadas para plotar uma Análise de Correlação Canônica regularizada (CCA) a fim de analisar o acoplamento entre elas. Foram identificadas alteração nas assembleias e diminuição de densidades fitoplanctônicas associadas à floração de *T.erythraeum*. Essa configuração, concomitante à presença de *Macrosetella graciles* (copépoda) e elevada concentração de amônio, sugere que a coleta tenha sido realizada na fase inicial de agregação de tricomas. Além disso, a ausência de chuvas para o período indica que não houve influência de drenagem costeira no desencadeamento da floração.

**Palavras-chave:** *Trichodesmium*. ASTP. Fertilização. Microfitoplâncton. Santa Catarina

## ABSTRACT

This study analyzed the composition and spatial distribution of phytoplankton in subsurface, in an area of the continental shelf of Santa Catarina (Brazil), with the occurrence of neustonic spot of the cyanobacterium *Trichodesmium erythraeum*, looking to relate these data with biogeochemical parameters. Water samples collected with Niskin bottles were used to determine dissolved inorganic nutrients (nitrate+nitrite, ammonium, silicate and orthophosphate); dissolved gases (OD and CO<sub>2</sub>); pH and chlorophyll-a. The physical parameters temperature (°C) and salinity were collected in the water column using a CTD (CastWay) and supported the delimitation of the water masses present in two transects perpendicular to the coast of Santa Catarina in spring 2018. The same samples were used for the quantification of phytoplankton. Additionally, 20 µm phytoplankton net trawls generated qualitative samples to identify the species present. The *T. erythraeum* bloom was collected using a bucket. The identification of microphytoplankton was down to the lowest possible taxonomic level. Quantifications were performed using an inverted microscope with a coupled camera and Utermöhl sedimentation chambers. The thermohaline intervals indicated the presence of three distinct water masses: Subtropical Platform Water (STSW) on the surface, followed by Tropical Water (TW) and South Atlantic Central Water (SACW) occupying bottom water in isobaths further away from the coast. The maximum for silicate was found in the region around the bloom, reaching 13.5 µM. The station also presented N:P ratio = 35 and Si:N ratio = 2, both values above the average considering all stations. OD maximum and a low CO<sub>2</sub> value were also identified around the *T. erythraeum* bloom, in addition to a chlorophyll-a peak (0.9 µM). 127 species were identified from the net samples and 87 from the bottle samples. Neuston cell density reached 3.1x10<sup>7</sup> cel.L<sup>-1</sup>, with *T. erythraeum* contributing 99% of the total density. The average for cell density found in the bottle samples was 1.6x10<sup>4</sup> cel.L<sup>-1</sup>, ranging between 3x10<sup>4</sup> and 1.2x10<sup>3</sup> cells.L<sup>-1</sup>. In the bloom sample the value was 1.2x10<sup>4</sup> cel.L<sup>-1</sup>. Only two points did not have diatoms making up most of the microphytoplankton composition, one of them in the bloom area, where a maximum for ciliates was identified (46%) and a low contribution for diatoms (26%). Abiotic variables and wind speed values were selected, from a Principal Component Analysis (PCA), as the variables that best explain the variability of the data. Temperature and salinity were removed from this ordering as all subsurface samplings were part of the same water mass (STSW). The PCA showed a better correlation between the bloom point and the pH, silicate, OD and NH<sub>4</sub> variables. Biotic variables (densities) and the abiotic variables that best responded to data variability in PCA were used to plot a regularized Canonical Correlation Analysis (CCA) in order to analyze the relationship between them. Changes in assemblages and decrease in phytoplankton densities associated with flowering of *T.erythraeum* were identified. This configuration, together with the high presence of *Macrosetella graciles* (copépoda) and high ammonium concentration, suggests that the collection was carried out in the initial phase of trichome aggregation. Furthermore, the absence of rain for the period indicates that there was no influence of coastal drainage in triggering *Trichodesmium* bloom.

**Keywords:** *Trichodesmium*. STSW. Fertilization. Microphytoplankton. Santa Catarina.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Mapa de localização das estações amostrais. As marcações em círculo representam as estações oceanográficas ao longo dos transectos em dezembro de 2018 (27°S), no fim da primavera austral. O gradiente de cores representa as classes de batimetria (m). A linha tracejada em vermelho delimita a Reserva Biológica Marinha do Arvoredo (ReBio Arvoredo). Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade. ...22
- Figura 2 – Fotos da mancha de *Trichodesmium erythraeum* visível a olho nu na Plataforma Continental de Santa Catarina, estação AI60.....24
- Figura 3 – Velocidade e direção dos ventos – diagrama rosa dos ventos. Rosa dos ventos com os valores de velocidade do vento (m/s) para os 10 dias antes da floração de *T. erythraeum* (a) e para o dia em que a floração foi avistada (b). Dados horários disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação A806. ....25
- Figura 4 – Diagrama TxS: Diagrama TxS obtido a partir de dados do CTD (CastWay). O gradiente de cores indica as profundidades na coluna d'água e as curvas em preto representam isolinhas de densidade potencial. ....26
- Figura 5 – Temperatura (eixo z; [°C]), salinidade (isolinhas) e profundidade da zona fótica (símbolo estrela na imagem, [m]), amostragem com garrafa (pontos em preto), ao largo da Ilha de Santa Catarina; as datas das amostragens estão no quadro à esquerda. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.....27
- Figura 6 – Gases dissolvidos e pH: distribuição dos gases dissolvidos na camada superficial (ASTP): a) oxigênio dissolvido (OD - mg.L<sup>-1</sup>); b) gás carbônico (CO<sub>2</sub> - μmol/kgSW); c) distribuição do potencial hidrogeniônico. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade. ....28
- Figura 7 – Nutrientes e razões elementares: nutrientes inorgânicos dissolvidos em subsuperfície: a) silicato (μM); b) fosfato (μM); c) nitrito+nitrato (μM); d) amônio (μM); e) razão N:P; e f) razão Si:N. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.....29
- Figura 8 – Distribuições subsuperficiais de clorofila-a (μg.L<sup>-1</sup>) para as amostragens na primavera tardia de 2018. ....30

Figura 9 – a) Riqueza de espécies; b) densidade total do fitoplâncton (cél.L<sup>-1</sup>); e c) índice de diversidade de Shannon-Wiener. .... 36

Figura 10 – Análise de Componentes Principais: oxigênio dissolvido (DO); nitrito+nitrato (NO<sub>x</sub>); potencial hidrogeniônico (pH); silicato; amônio (NH<sub>4</sub>); fosfato (PID); gás carbônico (CO<sub>2</sub>); clorofila-a; e velocidade do vento (v.Vento). O gradiente de cores (cos<sup>2</sup>) representa a qualidade da representação das variáveis no espaço 2D, quanto menor seu valor menor a distorção. Os triângulos representam as estações amostrais. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade. .... 40

Figura 11 – Análise de Correlação Canônica regularizada. As variáveis bióticas estão representadas em vermelho: cocolitorofídeo (C1), *Pseudo Nitzschia* (P1), *Mesodinium rubrum* (M1), *Thalassiosira punctigera* (T1), *Ceratium furca* (C1), *Thalassionema nitzschioides* (T2), *Navicula* sp. (N1), *Thalassiosira rotula* (T3), *Laudera anulata* (L1), *Paralia sulcata* (P2), *Trichodesmium erythraeum* (TRICHO). As variáveis abióticas estão representadas em azul: oxigênio dissolvido (DO); nitrito+nitrato (NO<sub>x</sub>); potencial hidrogeniônico (pH); silicato; amônio (NH<sub>4</sub>); fosfato (PID); gás carbônico (CO<sub>2</sub>); clorofila-a; e velocidade do vento (v.Vento). Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade. .... 42

Figura 12 – Diagrama conceitual representando os estágios de uma floração de *Trichodesmium*. a) Condição anterior à floração; b) Início da agregação de tricomas de *T.erythraeum*. Este foi provavelmente o estágio em que a floração se encontrava no momento da coleta; c) Senescência da floração e disponibilidade de nutrientes para outras espécies do fitoplâncton. .... 49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos .....	20
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>24</b>
3.2	CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS.....	24
3.3	DELIMITAÇÃO DAS MASSAS DE ÁGUA.....	25
3.4	PROFUNDIDADE DA ZONA EUFÓTICA.....	26
3.5	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DA ASTP .....	27
3.6	COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA: DA BIOMASSA (CLOROFILA-A) À DIVERSIDADE .....	30
3.7	ANÁLISE DE DADOS .....	40
3.7.1	Análise de Componentes Principais.....	40
3.7.2	Análise de Correlação Canônica regularizada.....	41
<b>4</b>	<b>Discussão.....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>
	<b>ANEXO A – Fotos (Microscópio OLYMPUS BX53) de diferentes táxons encontrados nas amostras de subsuperfície. a) <i>Climacodium fraunfeldianum</i>; b) <i>Undella claparideii</i>; c) <i>Eutintinnus</i> sp.; d) <i>Asteromphalus</i> sp. e <i>Hemiaulus membranaceus</i>; e) <i>Dictyosysta</i> sp.; f) <i>Ceratium furca</i>; g) <i>Rhabdonellopsis apophysata</i> e h) <i>Gonyaulax</i> sp. ....</b>	<b>55</b>
	<b>ANEXO B – Fotos (Microscópio OLYMPUS BX53) de diferentes táxons encontrados nas amostras de subsuperfície. <i>Trichodesmium erythraeum</i>; a) colônia fusiforme; b); c) tricomas livres; d) Colônia fusiforme evidenciando mucilagem; e); f); g) e h) copepoda <i>Macrosetella Gracilis</i> em conhecida associação com a floração de <i>Trichodesmium erythraeum</i>. ....</b>	<b>56</b>

**ANEXO C – Fotos (Microscópio OLYMPUS BX53) de diferentes táxons encontrados nas amostras de subsuperfície. a) 1- *Asteromphalus* sp. e 2- *Dinophysis* sp.; b) *Dinophysis acuminata*; c) *Ceratium tripos*; d) *Dinophysis caudata*; e) *Rhizosolenia* sp; f) *Ceratium trichoceros*; g) *Hemidiscus cuneiformes* e h) associação entre a diatomácea *Chaetoceros coarctatus* e o ciliado *Vorticella oceanica*.....57**

**ANEXO D – Fotos (Microscópio OLYMPUS BX53) de diferentes táxons encontrados nas amostras de subsuperfície. a) *Coscinodiscus* sp.; b) *Bacteriastrum delicatulum*; c) *Hemiaulus membranaceus*; d) *Diplopelta* sp.; e) *Coscinodiscus* sp. 1; f) *Podolampas bipes*; g) *Corethron* sp.; h) *Pseudo-Nitzschia* sp.....58**



## 1 INTRODUÇÃO

Cerca de metade da produtividade primária líquida da Terra ocorre nos oceanos, principalmente em áreas próximas à costa onde há aporte contínuo de nutrientes (FIELD et al., 1998). Os principais responsáveis por taxas tão notáveis, embora representem apenas 1% da biomassa vegetal terrestre, são pequenas células autotróficas ou mixotróficas (MITRA et al., 2016; RODRIGUES et al., 2014), distribuídas por toda extensão do oceano global, que compõem o conjunto polifilético chamado fitoplâncton (BEHRENFELD, 2014). Esse grupo consiste no primeiro elo das cadeias alimentares aquáticas e suporta a existência de formas de vida em níveis tróficos superiores, pois sustenta a maior parte do carbono orgânico disponível nos ecossistemas pelágicos (CAVICCHIOLI et al., 2019; MENEZES; DE MACEDO-SOARES; FREIRE, 2019). A produção primária e a estrutura dessas comunidades são governadas essencialmente pela disponibilidade de luz, concentração de macronutrientes e disponibilidade de nutrientes limitantes para síntese da matéria orgânica (BEHRENFELD, 2014; MARINOV; DONEY; LIMA, 2010; RODRIGUES et al., 2014).

Regiões afastadas da costa e, portanto, longe do escoamento continental – onde a entrada de nutrientes depende de processos físicos de mesoescala, como nos giros tropicais, por exemplo – são conhecidas como desertos oceânicos por possuírem produção primária relativamente baixa, baixa densidade de organismos fitoplânctônicos e baixa microbiota associada devido à limitação por nitrogênio (CAPONE et al., 1997). Em regiões como estas, ou em condições similares, organismos capazes de suprir suas demandas por nitrogênio por vias não convencionais poderiam vencer a disputa por recursos e proliferar-se. É o que acontece com o complexo de cianobactérias do gênero *Trichodesmium* spp., diazotróficos (fixadores de N<sub>2</sub>) potencialmente tóxicos que habitam águas oligotróficas tropicais e subtropicais (CAPONE et al., 1997). Sua capacidade de fixação tanto do CO<sub>2</sub> como do N<sub>2</sub> atmosférico (disponível em grande quantidade), a presença de vesículas de gás e o seu fotossistema adaptado a níveis elevados de irradiância lhe conferem sucesso em habitar tais regiões com carência de nutrientes.

Estes organismos diazotróficos são considerados membros-chave nessas regiões quentes, estratificadas e oligotróficas. Nestes ambientes, grandes florações de *Trichodesmium* spp. incrementam a coluna d'água com formas nitrogenadas bioassimiláveis por outros organismos fitoplanctônicos. Portanto, são responsáveis por alimentar a produção primária e consequentemente a bomba biológica nestas regiões.

Combinações de fosfato e ferro limitam o crescimento do gênero. Em cultura, quando estão em alta concentração, estimulam uma maior taxa de fixação de N<sub>2</sub> de *Trichodesmium* spp.

(MILLS et al., 2004). Fosfato inorgânico dissolvido é conhecidamente baixo em áreas oligotróficas e frequentemente associado a superfícies quentes onde são encontradas florações de *Trichodesmium* spp. Alguns autores (VAN MOOY et al., 2012) atribuem ao gênero a capacidade de adquirir fosfato por meio da expressão de fosfatases alcalinas para síntese da matéria orgânica como resposta fisiológica à depleção de fosfato. Ou seja, o gênero pode modular a demanda intracelular de fosfato.

Resposta fisiológica à baixa disponibilidade de ferro, outro nutriente conhecidamente limitante no oceano, é mais uma capacidade adaptativa descrita para *Trichodesmium* spp. O gênero é capaz de adquirir ferro a partir de sedimentos aderidos ao centro das colônias, graças à associação mutualística com bactérias capazes de promover a dissolução da poeira e disponibilizar moléculas complexantes de Fe (BASU et al., 2019; BIF; YUNES, 2016; TZUBARI et al., 2018). Alguns autores sugerem que o aumento da temperatura superficial do oceano, devido a interferências antrópicas globais e associado à baixa disponibilidade de fósforo, poderá impulsionar esse tipo de florações (QU et al., 2019). Uma das consequências do aumento da temperatura e da variabilidade térmica seria a redução no fornecimento de nutrientes devido à maior estratificação da coluna d'água (BEHRENFELD et al., 2006; QU et al., 2019).

Considerando cenários futuros, as respostas da cianobactéria a diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> e a limitação ou disponibilidade de ferro e fosfato mostraram que culturas com colimitação para ambos os nutrientes sob pH mais ácido não apresentaram maior taxa de crescimento (WALWORTH et al., 2016). No entanto, os autores afirmam que, em culturas com limitação apenas de ferro ou apenas de fosfato, a alteração na concentração do CO<sub>2</sub> mostrou-se significativa, aumentando a taxa de crescimento da diazotrófica com a acidificação. Este ponto é relevante pois a literatura aponta que, no Atlântico, *Trichodesmium* spp. tende a ser limitado por concentrações baixas de fosfato, enquanto que no Oceano Pacífico Norte o ferro seria o controlador da biomassa para o gênero (DETONI et al., 2016).

*Trichodesmium* spp. contribui com cerca de 50% da fixação biológica de nitrogênio marinho, desempenhando um papel fundamental nos ciclos do carbono e nitrogênio (BERGMAN et al., 2013; CAPONE et al., 1997, 2005). Grandes florescimentos são sustentados pela capacidade do organismo em utilizar simultaneamente tanto N<sub>2</sub> quanto fontes adicionais de nitrogênio, como, por exemplo, amônio gerado por herbívoros (MULHOLLAND, 2007; SCANLAN; POST, 2008). Os autores atribuem ao *Trichodesmium* spp. a capacidade de diferenciar a produção primária regenerada do sistema (advinda do processo de entrada *bottom*

up de  $\text{NO}_3^-$ ) em produção primária nova, oriunda da entrada *top down* de formas nitrogenadas assimiláveis para outros gêneros de microalgas incapazes de fixar  $\text{N}_2$ . Conseqüentemente, este processo acarreta um microambiente distinto em termos de propriedades físico-químicas e composição filogenética em ambientes com presença da *Trichodesmium* spp. Como resultado, as colônias servem como micro-habitat para diversos epibiontes em águas limitadas por nitrogênio. Klawonn et al. (2020), em estudos com incubação de *Trichodesmium*, encontraram concentrações de amônio enriquecidas em quase seis vezes no centro de colônias devido à liberação de amônio oriundo do processo de fixação de  $\text{N}_2$ . Nitrogênio orgânico dissolvido (aminoácidos, por exemplo) também é liberado no processo.

Trabalhos anteriores relatam ocorrência de *Trichodesmium* spp. amplamente distribuídos no Pacífico tropical e subtropical, Oceano Índico e Atlântico Norte (CAPONE et al., 1997; QU et al., 2019; SOHM; WEBB; CAPONE, 2011). Os eventos de floração não ocorrem apenas em regiões muito afastadas da costa. Para o Atlântico Sudoeste, Detoni et al. (2016) e Rörig et al. (2018) relatam a ocorrência de florações na quebra de plataforma sob a influência de frentes geradas pelo deslocamento da Corrente do Brasil, sugerindo que a dinâmica da região pode favorecer o acúmulo e crescimento de *Trichodesmium* spp. Apesar do aumento da fixação de  $\text{CO}_2$  em regiões com déficit nutricional e de sua posterior transferência para ecossistemas marinhos por afundamento e herbivoria soar como um feedback na contramão das mudanças climáticas, essas florações, quando advectadas para perto de zonas costeiras, podem causar danos à biota e à saúde humana, caso apresentem níveis altos de toxicidade (RÖRIG et al., 2018).

Há, ainda, uma discussão a respeito de associações ecológicas entre florações de *Trichodesmium* spp. e alguns outros organismos, como, por exemplo, a herbivoria entre *Macrosetella gracilis* (copépoda) e a cianobactéria, já que usualmente é encontrada em amostras de florações de *Trichodesmium* spp. (BIF et al., 2019; EBERL; CARPENTER, 2007; O'NEIL; METZLER; GLIBERT, 1996). A presença significativa de bactérias epibiontes vivendo em consórcio com *Trichodesmium* spp. também já foi estudada (BASU et al., 2019; SHERIDAN; STEINBERG; KLING, 2002). Em Bif et al. (2019), foram descritos gêneros de microalgas que ocorreram em regiões no entorno de florações de *Trichodesmium* spp. Na quebra de plataforma (Atlântico Sudoeste), o estudo aponta que, na maioria das estações onde o diazotrófico não dominava, outros grupos, como diatomáceas e dinoflagelados, estavam presentes. Os autores ainda sugerem que a produção de saxitoxinas em florações deste gênero ocorre durante as agregações dos tricomas, já que houve uma relação inversa entre abundância

de tricomas e concentrações de saxitoxinas. Além disso, o estudo aponta que estas toxinas podem inibir o crescimento de outros organismos do microfitoplâncton e minimizar os efeitos da herbivoria.

Outro ponto importante apresentado em trabalhos com *Trichodesmium* spp. é a relação positiva deste tipo de evento de floração com temperaturas altas, baixas velocidades do vento e profundidade da zona de mistura relativamente rasa (DETONI et al., 2016).

Já é bem documentado que na costa brasileira, especialmente na plataforma continental de Santa Catarina, o regime de ventos configura uma área de alta variabilidade oceanográfica, com sazonalidade de massas de água (PIOLA et al., 2018). No verão e na primavera há estratificação da coluna e as massas de água que predominam são: Água Tropical de Plataforma (AT), oligotrófica (MÖLLER et al., 2008; PIOLA et al., 2018), quente  $T \geq 18.5$  e salina  $S \geq 36$ ; Água Central do Atlântico Sul (ACAS), intermediária e eutrófica (BORDIN et al., 2019), que sofre intrusão em profundidades mais rasas induzida pelos ventos nordeste, condição meteorológica típica durante o verão; e Água Subtropical de Plataforma (ASTP), mesotrófica (BORDIN et al., 2019), que é uma mistura de águas costeiras influenciadas pela drenagem continental. Durante o outono e o inverno, a coluna torna-se mais homogênea; a persistência de ventos do quadrante sul direciona águas da Pluma do Prata e da Lagoa dos Patos até latitudes perto dos 28°S e a influência da drenagem continental é acentuada em virtude do aumento da pluviosidade, destacando-se a influência do Rio Itajaí e a drenagem estuarina da Baía da Babitonga na porção mais ao norte do estado (BECKER; EIRAS GARCIA; FREIRE, 2018; CARVALHO; SCHETTINI; RIBAS, 2010; PIOLA et al., 2018; SCHETTINI et al., 2005).

A literatura aponta que na plataforma continental de Santa Catarina, sob a influência de águas costeiras e dinâmica de frentes de plataforma, as diatomáceas (variando a dominância entre cêntricas e penadas) compõem o táxon dominante em superfície, com grande diversidade de espécies, e em seguida os dinoflagelados de tamanho nano e micro (BRANDINI, 2018; PEREIRA BRANDINI et al., 2014a). Especificamente para *T. erythraeum*, além da sua identificação em florações sob a forma de colônia (fusiformes ou esféricas), tricomas isolados frequentemente são encontrados compondo a comunidade fitoplanctônica, em especial na costa do estado de Santa Catarina, com florações sazonais do início da primavera até o final do verão (PEREIRA BRANDINI et al., 2014a; RÖRIG et al., 2018; SIQUEIRA; KOLM; BRANDINI, 2006). No Brasil, o gênero é documentado e identificado em trabalhos anteriores formando florações na quebra da plataforma, próximo às águas quentes e oligotróficas da Corrente do Brasil, e por vezes alcançando águas mais costeiras devido à deriva horizontal ocasionada pelo

vento (BIF et al., 2019; CARVALHO; GIANESELLA; SALDANHA-CORRÊA, 2008; DETONI et al., 2016; GUIMARÃES; RÖRIG, 1997; PROENÇA; TAMANAHA; FONSECA, 2009; RÖRIG et al., 1998).

Partindo do ponto em que as propriedades físicas e químicas da coluna d'água iluminada pelo sol, que são altamente variáveis tanto em escala espacial quanto temporal, afetam a distribuição do fitoplâncton (BEHRENFELD, 2014), buscou-se, neste trabalho, avaliar a composição e a densidade do fitoplâncton em subsuperfície, bem como parâmetros físicos (vento e profundidade da zona fótica) e biogeoquímicos (nutrientes e gases dissolvidos), a fim de caracterizar o ambiente no entorno das estações de coleta. Em uma das sete estações, realizadas na primavera de 2018, foi identificado um processo de floração de *Trichodesmium erythraeum* visível a olho nu.

Para a distribuição fitoplanctônica, foram comparadas as densidades de células.L<sup>-1</sup> e as riquezas de espécies em cada estação, bem como a composição dos grandes grupos em cada uma delas. As espécies que representaram 70% da frequência relativa acumulada foram apresentadas comparativamente. O trabalho ainda lista a ocorrência de táxons por ponto amostral e apresenta registros fotográficos de algumas espécies que apareceram nas quantificações. O índice de Shannon-Wiener foi calculado para cada estação a fim de caracterizar a diversidade em cada uma das amostras.

A variabilidade dos dados abióticos foi plotada em uma Análise de Componentes Principais com o objetivo de avaliar se havia algum traço de incremento de nitrogênio na região da floração, ou seja, um incremento *top down* de nitrogênio. Uma Análise de Correlação Canônica foi realizada a fim de identificar os principais padrões de variabilidade das espécies de microplâncton no que diz respeito às variáveis abióticas.

## 1.1 OBJETIVOS

Abaixo são descritos os objetivos geral e específicos deste trabalho.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Caracterizar as massas de água de acordo com suas características biogeoquímicas e a comunidade fitoplanctônica em um período de ocorrência de floração de *Trichodesmium erythraeum*.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- 1) Caracterizar massas de água em termos de salinidade, temperatura, nutrientes e gases dissolvidos da coluna d'água;
- 2) Caracterizar qualitativa e quantitativamente o fitoplâncton;
- 3) Avaliar quais parâmetros biogeoquímicos respondem melhor ao desencadeamento da floração de *T. erythraeum* e, também, se há indício de incremento de nitrogênio como uma consequência da floração.
- 4) Avaliar se houve algum padrão para a distribuição das assembleias fitoplanctônicas na plataforma que possa ter sido alterado devido à presença de *T. erythraeum*.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As sete amostragens (Fig. 1) – plataforma continental rasa de Santa Catarina, Atlântico Sudoeste (27°S) – foram realizadas entre os dias 10 e 12 de dezembro de 2018, fim da primavera austral, a bordo do navio Ciências do Mar I - MEC. O mapa (Fig. 1) foi realizado no software QGIS 3.4.5 (QGIS ASSOCIATION, 2021). Em cada estação amostral, as assembleias fitoplanctônicas foram coletadas com rede cilindro cônica de malha 20 µm em subsuperfície e deram suporte à elaboração de uma lista qualitativa (presença/ausência) dos táxons fitoplanctônicos. Adicionalmente, na estação onde houve a floração, foi realizada uma coleta com balde. Amostras realizadas com garrafa Niskin em subsuperfície deram suporte às quantificações do fitoplâncton e às análises de nutrientes e gases dissolvidos. Todas as amostras das assembleias fitoplanctônicas foram armazenadas em formol 4%. Dados de temperatura e salinidade em profundidade (CTD - YSI CastAway) foram coletados para cada estação amostral. Os dados horários para velocidade e direção do vento, bem como as temperaturas do ar para o período de coleta, foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação A860. Os gráficos para as condições meteorológicas foram realizados em Python usando a IDE Spyder.

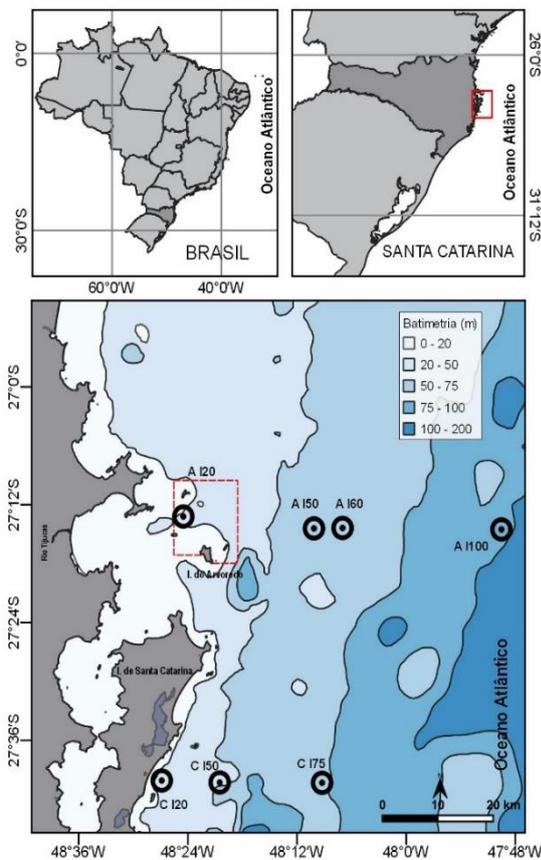
A identificação de massas d'água seguiu os critérios estabelecidos por Möller et al. (2008) a partir dos dados coletados com o CTD. A profundidade da zona fótica (Fig. 4) foi mensurada a partir do desaparecimento do disco de Secchi na coluna, multiplicando o valor da profundidade de desaparecimento do disco por 2,709 (BORDIN et al., 2019). A Fig. 4 foi elaborada no software Ocean Data View (SCHLITZER, 2018).

A partir das amostragens com garrafa Niskin foram estimados valores de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) pela alcalinidade (método da titulação de Gran et al. (1981)); e de oxigênio dissolvido (OD) pelo método de Winkler, com calibração em laboratório (LABASQUE, 2004). As amostras foram filtradas em microfiltro de fibra de vidro GF/F e acondicionadas em freezer para posterior análise de nutrientes e clorofila-a pelo método espectrofotométrico (GRASSHOFF et al., 1999).

Os táxons que compuseram a comunidade fitoplanctônica foram identificados através de microscopia óptica (OLYMPUS – 40x, 20x e 10x) utilizando chaves de identificação baseadas em características morfológicas dos organismos (TENENBAUM, 2006; TOMAS, 1997), chegando ao menor nível taxonômico possível. A quantificação do microfitoplâncton seguiu o método descrito por Utermöhl (UTERMOHL, 1958), com câmaras de sedimentação

de volume conhecido, utilizando-se microscópio invertido com câmera acoplada (OLYMPUS-BX53).

Figura 1 – Mapa de localização das estações amostrais. As marcações em círculo representam as estações oceanográficas ao longo dos transectos em dezembro de 2018 (27°S), no fim da primavera austral. O gradiente de cores representa as classes de batimetria (m). A linha tracejada em vermelho delimita a Reserva Biológica Marinha do Arvoredo (ReBio Arvoredo). Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.



Fonte: a autora (2020)

A amostra neustônica da floração foi coletada com auxílio de um balde e quantificada com câmara de contagem de Sedgewick-Rafter. Nesta quantificação, foram contabilizados tanto o número de tricomas isolados quanto o número de colônias fusiformes ou esféricas presentes na amostra. O número de colônias foi transformado em número de tricomas de *T. erythraeum* segundo conversão descrita por Carpenter (1983), que considera uma média de 200 tricomas por colônia.

As representações gráficas para riqueza, densidade de células, concentração de nutrientes e gases dissolvidos foram elaboradas em linguagem Python utilizando a IDE Spyder

4.1.4 (RAYBAUT, 2009). Também em Python, foi calculado o índice de diversidade de Shannon-Wiener ( $H'$ ) para cada estação, a partir da seguinte equação:

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \cdot \ln p_i$$

Onde:

$S = \text{riqueza de espécies}$

$p_i = \text{abundância relativa de cada espécie}$

As representações gráficas para as frequências relativas e grandes grupos fitoplanctônicos foram elaboradas no editor de planilhas Excel, desenvolvido pela Microsoft. O diagrama conceitual apresentado na seção das conclusões foi elaborado no software Adobe Illustrator CS.

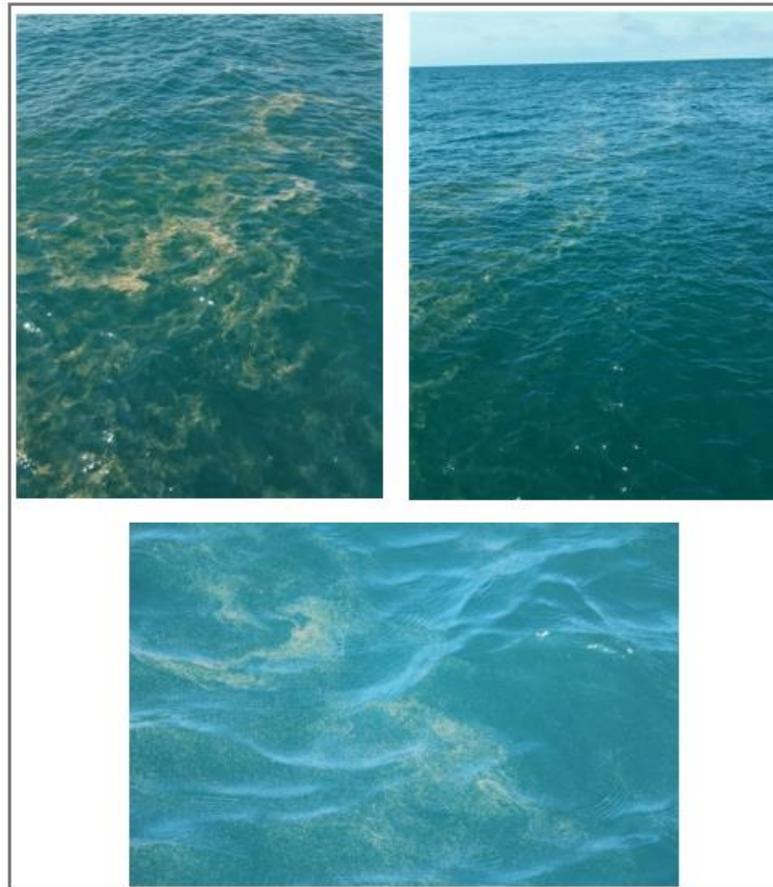
Foram realizadas duas análises multivariadas de ordenação, ambas geradas por pacotes estatísticos em linguagem R (R CORE TEAM, 2021). A primeira, Análise de Componentes Principais (PCA), foi utilizada para identificar – a partir dos dados abióticos – os principais descritores ambientais. Esta análise foi feita usando o pacote factextra (KASSAMBARA; MUNDT, 2020). Nutrientes, gases e velocidades do vento foram selecionados a partir desta PCA como as variáveis mais representativas na variabilidade dos dados e, portanto, compuseram também a Análise de Correlação Canônica (CCA), feita com o pacote CCA (GONZÁLEZ; DÉJEAN, 2021), também em R. Este pacote conta com uma opção para versão regularizada da CCA, que busca correlações entre duas matrizes de dados quando o número de variáveis excede o número de observações, como é o caso neste trabalho. Na CCA, além das variáveis abióticas, foram plotados dados de densidade para as dez espécies dominantes e densidade de *T. erythraeum* a fim de investigar a intensidade da associação entre estes dois conjuntos de variáveis, bióticas e abióticas.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 PROCESSO DE FLORAÇÃO

O processo de floração da cianobactéria *T. erythraeum* (Fig. 2) foi identificado na isóbata de 60m do transecto Arvoredo (AI60), formando manchas neustônicas orientadas pelo vento (circulação de Langmuir).

Figura 2 – Fotos da mancha de *Trichodesmium erythraeum* visível a olho nu na Plataforma Continental de Santa Catarina, estação AI60.



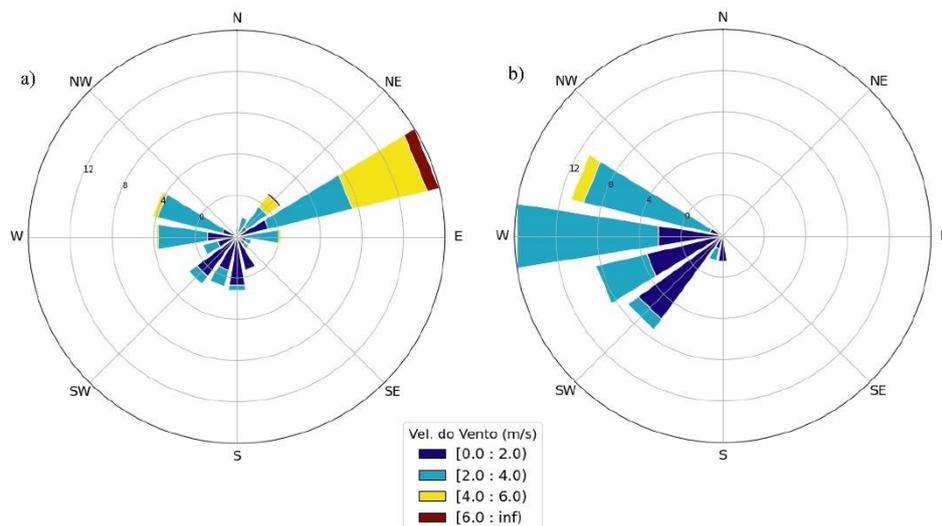
Fonte: Leonardo Rubi Rörig e Paola Albuquerque (2018).

#### 3.2 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Segundo os dados meteorológicos disponibilizados pelo INMET, para o período de dez dias antes das datas de coleta (inclusive o dia da coleta), não houve chuvas significativas para a região. Considerando o mesmo período, a temperatura do ar variou entre 14,0 e 31,9 °C com média 22,6 °C. Para os três dias que antecederam o evento de floração, a média da temperatura do ar aumentou para 25,1°, com mínima de 20,6 e máxima de 31,9°C.

Os dados de velocidade (m/s) e direção (°) do vento indicaram que, considerando os dez dias anteriores ao evento da floração (Fig. 3a), predominaram na região ventos Nordeste, que, devido ao efeito de Ekman, transportam águas para fora da costa, configurando condição favorável a ressurgências da ACAS sobre a plataforma. Considerando o dia em que o evento foi registrado (Fig. 3b) a predominância de ventos foi da direção Oeste e Noroeste.

Figura 3 – Velocidade e direção dos ventos – diagrama rosa dos ventos. Rosa dos ventos com os valores de velocidade do vento (m/s) para os 10 dias antes da floração de *T. erythraeum* (a) e para o dia em que a floração foi avistada (b). Dados horários disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação A806.

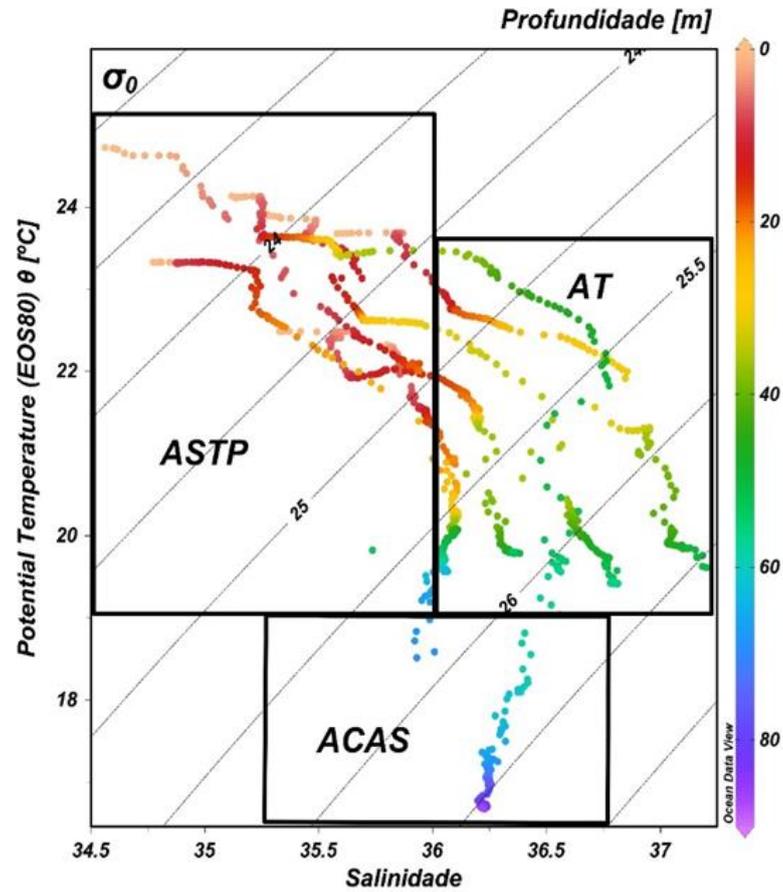


Fonte: a autora (2021)

### 3.3 DELIMITAÇÃO DAS MASSAS DE ÁGUA

As amostragens indicaram a presença de três massas d'água distintas que são típicas na região durante a primavera e o verão austral. O diagrama temperatura x salinidade (Fig. 3) mostra que em águas superficiais predomina a ASTP e em águas mais profundas, abaixo de 60m, identifica-se a presença da ACAS. A massa d'água que ocupa o meio da coluna é a AT, trazida pela corrente do Brasil, que em regiões próximas da costa sofre processos de mistura com águas continentais, formando as águas de plataforma, como a ASTP. Na ASTP, massa a ser descrita neste trabalho, foi identificada a floração de *T. erythraeum*.

Figura 4 – Diagrama TxS: Diagrama TxS obtido a partir de dados do CTD (CastWay). O gradiente de cores indica as profundidades na coluna d'água e as curvas em preto representam isolinhas de densidade potencial.

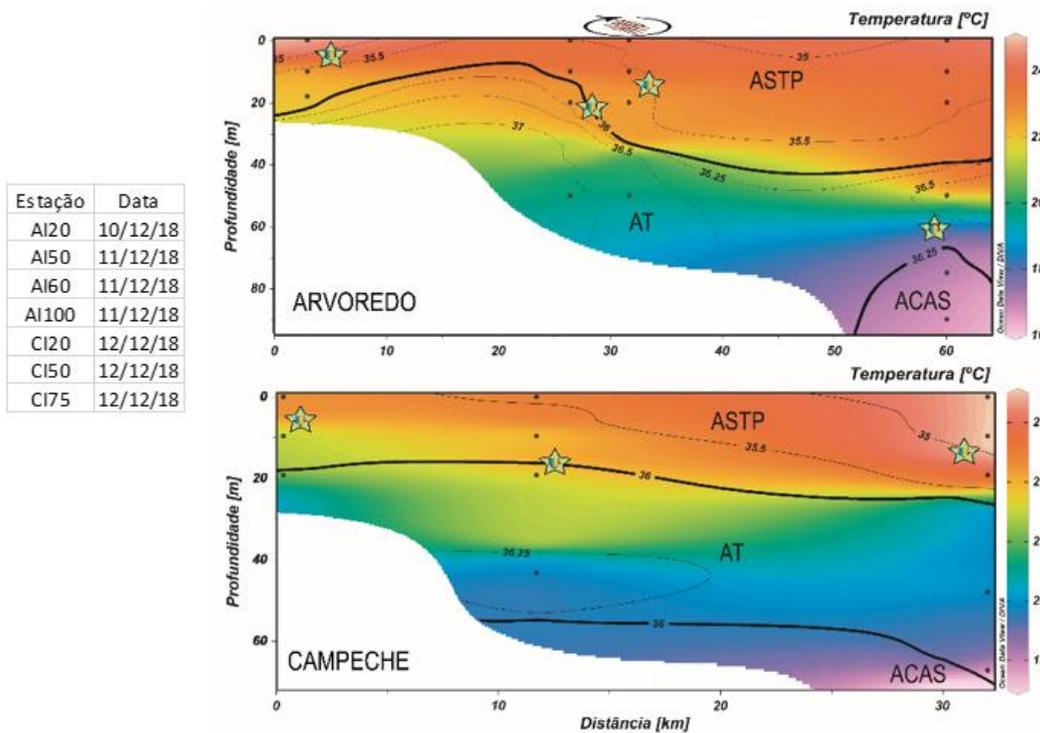


Fonte: a autora (2021)

### 3.4 PROFUNDIDADE DA ZONA EUFÓTICA

A profundidade da zona eufótica variou de 7 a 60m e na estação da floração alcançou 14m (Fig. 4). A maior profundidade para o parâmetro foi encontrada em AI100, estação em que a ACAS foi identificada compondo a base da coluna de água.

Figura 5 – Temperatura (eixo z; [°C]), salinidade (isolinhas) e profundidade da zona fótica (símbolo estrela na imagem, [m]), amostragem com garrafa (pontos em preto), ao largo da Ilha de Santa Catarina; as datas das amostragens estão no quadro à esquerda. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbara e sua respectiva profundidade.



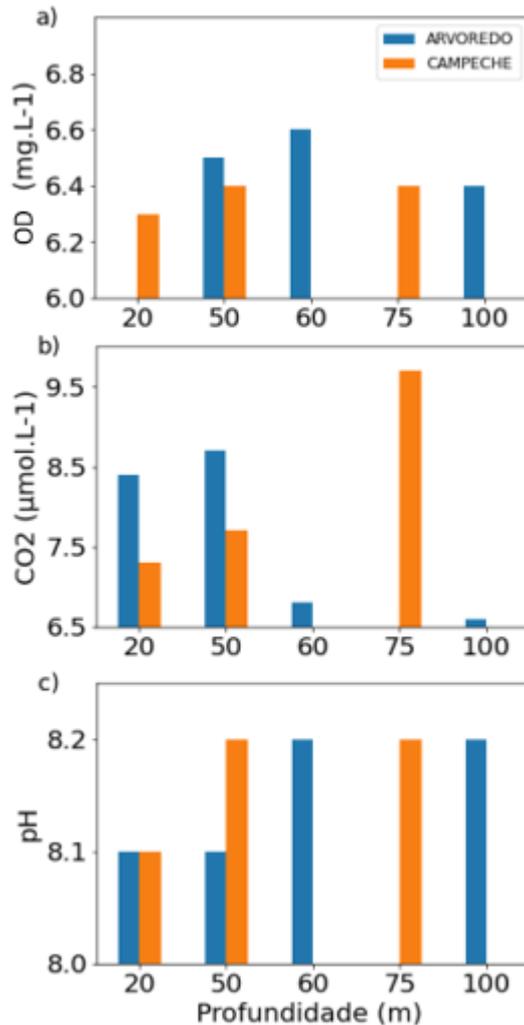
Fonte: a autora (2021)

### 3.5 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DA ASTP

A distribuição dos gases dissolvidos na camada superficial da coluna da água (Fig. 6) associada à Água Subtropical de Plataforma (ASTP) apresentou um máximo na concentração de oxigênio dissolvido ( $6,6 \text{ mg.L}^{-1}$ ) na estação AI60, onde ocorreu a floração. No gradiente costa-oceano, o oxigênio dissolvido ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) variou entre 6,0 e  $6,6 \text{ mg.L}^{-1}$ , sendo que nas duas estações mais rasas ( $\leq 20\text{m}$ ) foram encontrados os menores valores.

No ponto AI60, também coincidiu uma menor concentração de  $\text{CO}_2$ , no valor de  $6,8 \mu\text{mol.L}^{-1}$ , se comparado com a média e o desvio  $7,9 \pm 1,0 \text{ mg.L}^{-1}$  para o gás (Fig. 6-b). O valor máximo para o gás carbônico ( $9,7 \text{ mg.L}^{-1}$ ) foi encontrado na estação CI75, onde também ocorreram as menores densidades de células fitoplanctônicas. Os valores para o pH foram semelhantes em todas as estações, variando entre 8,1 e 8,2 (Fig. 6-c). O valor mais baixo foi encontrado nas estações mais rasas ( $\leq 20\text{m}$ ) e 8,2 em AI60, AI100, CI50 e CI75.

Figura 6 – Gases dissolvidos e pH: distribuição dos gases dissolvidos na camada superficial (ASTP): a) oxigênio dissolvido (OD -  $\text{mg.L}^{-1}$ ); b) gás carbônico ( $\text{CO}_2$  -  $\mu\text{mol/kgSW}$ ); c) distribuição do potencial hidrogeniônico. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.

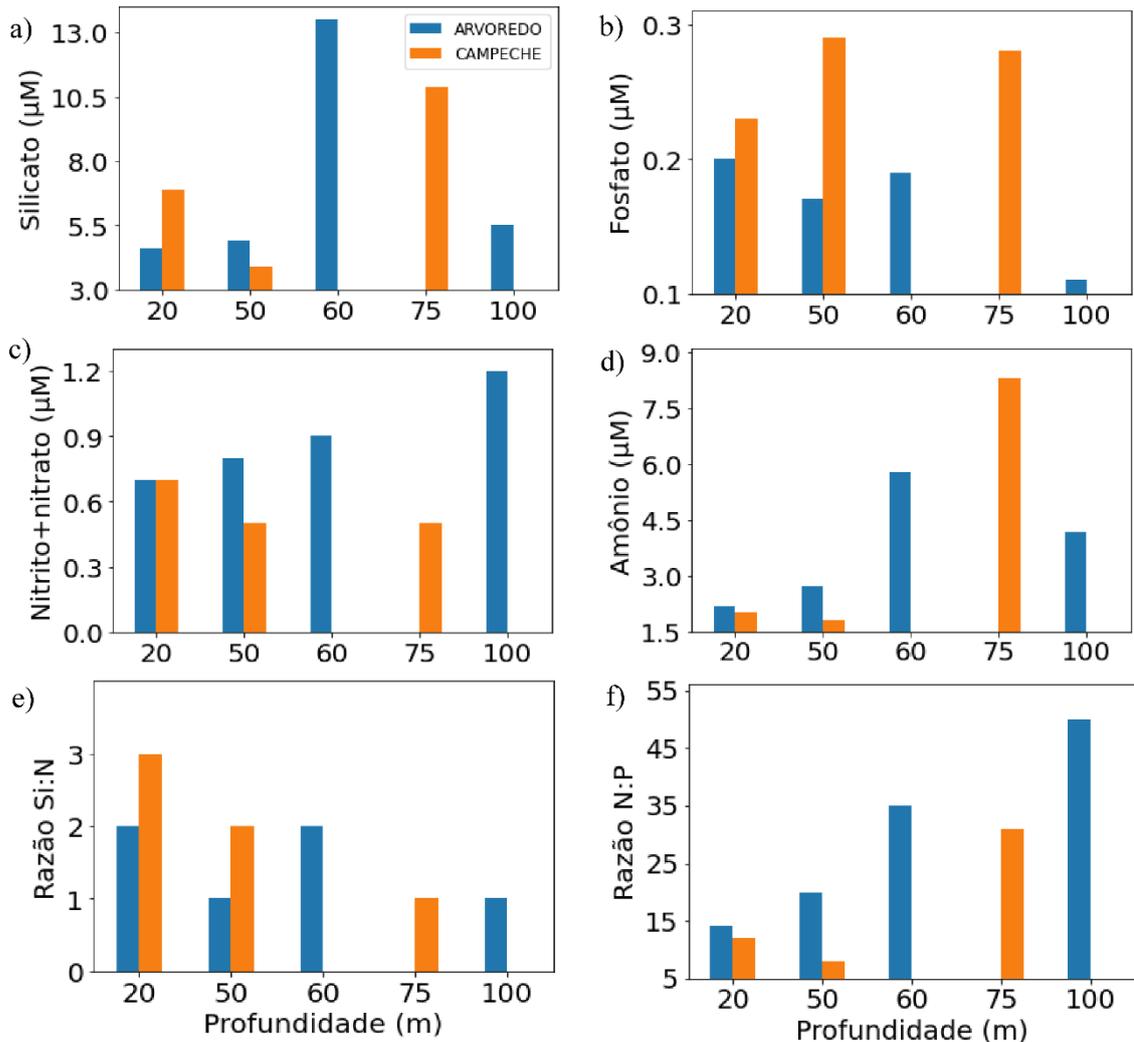


Fonte: a autora (2021)

A média para os valores de silicato foi similar entre os dois transectos, de  $7,12 \pm 4,26\mu\text{M}$  para Arvoredo e de  $7,23 \pm 3,51 \mu\text{M}$  para Campeche. O máximo para o silicato foi encontrado em AI60 (Fig. 7), alcançando a concentração de  $13,5 \mu\text{M}$  no ponto da floração. Para o ortofostato, o menor valor ( $0,11 \mu\text{M}$ ) foi encontrado em AI100, estação mais afastada da costa; e os maiores valores (média de  $0,26 \pm 0,03\mu\text{M}$ ) foram encontrados no transecto do Campeche. Para nitrito+nitrato em subsuperfície, os menores valores foram encontrados no transecto Campeche (média de  $0,56 \pm 0,11\mu\text{M}$ ). Para Arvoredo, o máximo de nitrito+nitrato ( $1,2 \mu\text{M}$ ) foi encontrado em AI100 e a média para todas as estações foi de  $0,9 \pm 0,21\mu\text{M}$ . A concentração de amônio apresentou média de  $2,1 \pm 0,38\mu\text{M}$  em estações  $\leq 50\text{m}$  e de  $6,1 \pm$

2,06 $\mu$ M em estações  $\geq 60$ m. A concentração máxima de amônio (8,3 $\mu$ M) ocorreu na AI60. Amônio também apresentou o máximo em AI60 (8,3 $\mu$ M).

Figura 7 – Nutrientes e razões elementares: nutrientes inorgânicos dissolvidos em subsuperfície: a) silicato ( $\mu$ M); b) fosfato ( $\mu$ M); c) nitrito+nitrato ( $\mu$ M); d) amônio ( $\mu$ M); e) razão N:P; e f) razão Si:N. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.



Fonte: a autora (2021)

No gradiente costa-oceano, razões N:P entre 10 e 20 são consideradas ideais para o fitoplâncton, condição observada nas águas superficiais das estações mais costeiras ( $\leq 50$ m). Valores abaixo de 10 indicam potencial limitação de nitrogênio para a produção primária do fitoplâncton, o que foi observado na CI50. Quando a proporção é maior que 20, o fósforo é o

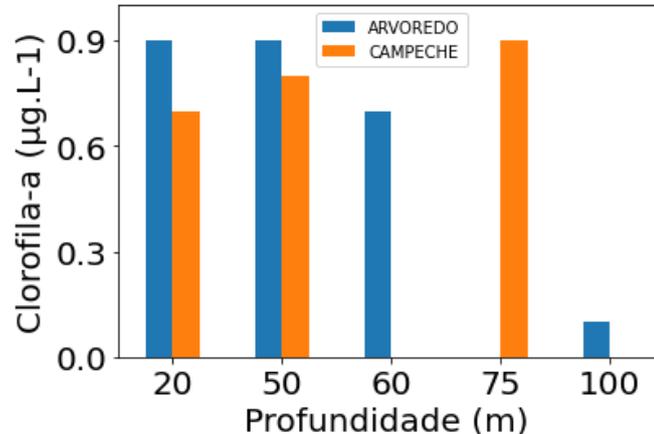
nutriente limitante, evidenciando um *input* de formas nitrogenadas. A estação AI100 apresentou a maior razão N:P (50), seguido de AI60 (35).

A razão Si:N variou entre 1 e 3, ou seja, em nenhuma das estações foram encontrados valores menores de 1 que indicassem limitação de silicato para diatomáceas. A maior disponibilidade de silicato, com razão Si:N (3), foi encontrada em CI20. Para AI60, o valor da razão foi 2.

### 3.6 COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA: DA BIOMASSA (CLOROFILA-A) À DIVERSIDADE

A Fig.8 mostra a distribuição de clorofila-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) em subsuperfície. Estações  $\geq 60\text{m}$  tiveram média 0,5 ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) e estações mais rasas apresentaram média 0,8 ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). Em AI100 foi encontrado a menor concentração de clorofila-a ( $0,1 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Para AI60, assim como para CI20, o valor para a biomassa fitoplanctônica foi  $0,7 \mu\text{g.L}^{-1}$ .

Figura 8 – Distribuições subsuperficiais de clorofila-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) para as amostragens na primavera tardia de 2018.



Fonte: a autora (2021)

A Tabela 1 mostra a lista, presença e ausência, por estação amostral de todas as espécies encontradas a partir das amostras qualitativas de rede em subsuperfície, na qual foram identificados 127 táxons. Nem todos os táxons observados nestas amostras foram encontrados nas amostras quantitativas, e a recíproca é verdadeira. A Tabela 2 apresenta a lista de espécies e suas respectivas densidades ( $\text{células.L}^{-1}$ ) a partir das amostras quantitativas. Para esta contagem, o total de táxons foi 87, considerando todas as estações. O Anexo A apresenta fotos de algumas espécies que apareceram nas análises fitoplanctônicas em microscópio invertido OLYMPUS BX53 com câmera acoplada.

Tabela 1 – Lista de espécies, presença e ausência, a partir das amostras de rede em subsuperfície. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.

<b>Bacillariophyceae</b>	AI20	AI50	AI60	AI100	CI20	CI50	CI75
<i>Actinoptychus senarius</i>					X	X	X
<i>Asteromphalus cleveanus</i>		X					
<i>Asteromphalus heptactis</i>				X		X	X
<i>Asteromphalus</i> sp.	X	X					
<i>Asterionellopsis glacialis</i>	X						
<i>Bacteriastrium delicatulum</i>	X					X	
<i>Bacteriastrium</i> sp.						X	
<i>Campylodiscus neofastuosus</i>		X					
<i>Chaetoceros affinis</i>					X		
<i>Chaetoceros atlanticus</i>	X						
<i>Chaetoceros</i> sp.	X						
<i>Chaetoceros decipiens</i>	X						
<i>Chaetoceros peruvianus</i>	X						
<i>Climacodium frauenfeldianum</i>	X	X		X	X	X	X
<i>Corethron</i> sp.	X						
<i>Coscinodiscus granii</i>		X				X	
<i>Coscinodiscus concinnus</i>						X	
<i>Coscinodiscus</i> sp. 1		X				X	
<i>Coscinodiscus</i> sp. 2	X						
<i>Cyclotella</i> sp.							X
<i>Diploneis</i> sp.							X
<i>Guinardia delicatula</i>	X						
<i>Guinardia striata</i>					X		X
<i>Haslea</i> sp.		X					
<i>Hemiaulus hauckii</i>	X				X	X	X
<i>Hemiaulus membranaceus</i>	X	X		X	X	X	X
<i>Hemiaulus sinensis</i>	X			X	X	X	X
<i>Hemidiscus cuneiformis</i>		X					
<i>Lauderia annulata</i>					X		
<i>Lioloma pacificum</i>	X					X	X
<i>Luticola</i> sp.					X		
<i>Melosira arctica</i>							X
<i>Mediopyxis helysia</i>						X	
<i>Navicula directa</i>					X	X	X
<i>Navicula</i> sp. 1	X					X	X
<i>Navicula</i> sp. 2					X		
<i>Navicula transitans</i>						X	
<i>Nitzschia</i> sp.						X	X
<i>Nitzschia constricta</i>		X					
<i>Odontella</i> sp.	X						X
<i>Paralia sulcata</i>	X	X			X	X	X
<i>Pleurosigma normanii</i>		X			X	X	
<i>Pleurosigma</i> sp.	X	X			X		X
<i>Proboscia alata</i>	X						
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	X						
<i>Skeletonema costatum</i>	X		X				X
<i>Rhizosolenia hebetata</i>		X	X				X
<i>Surirella brebissonii</i>					X		
<i>Surirella fastuosa</i>					X		X
<i>Surirella</i> sp.					X	X	
<i>Thalassionema nitzschioides</i>		X			X	X	X
<i>Thalassiosira delicatula</i>							X
<i>Thalassiosira rotula</i>						X	X
<i>Thalassiosira punctigera</i>	X						
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	X				X	X	
<i>Thalassiothrix</i> sp.		X					
<i>Trachyneis</i> sp.		X					
<b>Dinophyceae</b>							
<i>Alexandrium</i> sp.							X
<i>Amphisolenia</i> sp.							X
<i>Ceratium candelabrum</i>						X	X
<i>Ceratium carriense</i>							X
<i>Ceratium furca</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>Ceratium fusus</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>Ceratium gibberium</i>					X		
<i>Ceratium horridum</i>					X		
<i>Ceratium lineatum</i>					X		

Fonte: a autora (2019)

Tabela 1 (continuação) – Lista de espécies, presença e ausência, a partir das amostras de rede em subsuperfície. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.

<b>Dinophyceae</b>	<b>AI20</b>	<b>AI50</b>	<b>AI60</b>	<b>AI100</b>	<b>CI20</b>	<b>CI50</b>	<b>CI75</b>
<i>Ceratium lunula</i>		X					X
<i>Ceratium hexacanthum</i>	X	X				X	X
<i>Ceratium paradoxides</i>						X	
<i>Ceratium pentagonum</i>						X	
<i>Ceratium macroceros</i>					X		
<i>Ceratium teres</i>					X		
<i>Ceratium trichoceros</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>Ceratium tripos</i>	X	X				X	X
<i>Dinophysis acuminata</i>		X			X	X	X
<i>Dinophysis caudata</i>		X					
<i>Dinophysis hastata</i>							X
<i>Dinophysis tripos</i>						X	
<i>Dinophysis</i> sp.		X					
<i>Diplopetta</i> sp.		X			X	X	X
<i>Fragilariopsis</i> sp.	X						
<i>Ornithocercus</i> sp.							X
<i>Phalacroma favus</i>						X	
<i>Phalacroma rotundatum</i>		X		X		X	
<i>Phalacroma</i> sp.							
<i>Podolampas bipes</i>	X					X	X
<i>Podolampas palmipes</i>	X	X				X	
<i>Podolampas spinifera</i>				X			
<i>Prorocentrum balticum</i>					X		X
<i>Prorocentrum compressum</i>					X	X	X
<i>Prorocentrum gracile</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>Prorocentrum lima</i>					X	X	X
<i>Prorocentrum mexicanum</i>		X					
<i>Prorocentrum micans</i>	X	X			X		X
<i>Prorocentrum rostratum</i>	X						X
<i>Protoperidinium divergens</i>	X	X	X		X	X	X
<i>Protoperidinium</i> sp.		X			X		
<i>Protoperidinium pellucidum</i>					X	X	
<i>Protoperidinium simulum</i>	X	X					
<i>Protoperidinium steinii</i>	X	X	X	X	X	X	X
<i>Pyrocystis fusiformis</i>					X		
<i>Pyrocystis lunula</i>							X
<i>Gonyaulax</i> sp.					X		
<i>Scrippsiella trochoidea</i>						X	
<b>Ciliophora</b>							
<i>Amphorellopsis</i> sp.	X						
<i>Codonellopsis schabi</i>					X	X	X
<i>Dictyocysta</i> sp.				X			
<i>Eutintinnus fraknoii</i>				X	X	X	X
<i>Eutintinnus macilentus</i>		X				X	X
<i>Eutintinnus</i> sp.		X		X			
<i>Mesodinium rubrum</i>					X		X
<i>Rhabdonellopsis apophysata</i>				X			
<i>Rhabdonella spiralis</i>				X			
<i>Strombidium</i> sp.					X		X
<i>Tintinnopsis campanula</i>	X				X	X	X
<i>Tintinnopsis rotundata</i>	X					X	X
<i>Tintinnopsis tocantinensis</i>						X	
<i>Tintinnopsis tubulosa</i>			X			X	
<i>Tontonia</i> sp.							X
<i>Vorticella oceanica</i>		X					
<i>Undella claparidei</i>				X			
<i>Undella</i> sp.							X
<b>Cyanophyceae</b>							
<i>Trichodesmium erytraeum</i>	X	X	X	X	X	X	X
<b>Dictyochophyceae</b>							
<i>Dictyocha</i> sp.	X			X			X
<b>Thecofilosea</b>							
<i>Ebria tripartita</i>		X					
<b>Prymnesiophyceae</b>							
<i>Coccolitoforideo</i>		X					
<b>Chlorophyceae</b>							
<i>Kirchneriella lunaris</i>		X					

Fonte: a autora (2019)

Tabela 2 – Lista das espécies e suas respectivas densidades (células.L<sup>-1</sup>) em cada estação, identificadas a partir das amostras quantitativas. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.

<b>Bacillariophyceae</b>	<b>AI20</b>	<b>AI50</b>	<b>AI60</b>	<b>AI100</b>	<b>CI20</b>	<b>CI50</b>	<b>CI75</b>
<i>Actinoptychus senarius</i>	371	0	93	0	0	278	0
<i>Asteromphalus heptactis</i>	0	371	0	278	0	0	0
<i>Asterionellopsis glacialis</i>	742	0	0	0	0	0	0
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	186	0	186	0	0	0	0
<i>Chaetoceros peruvianus</i>	0	0	0	464	0	0	0
<i>Climacodium frauenfeldianum</i>	371	557	371	835	0	186	60
<i>Coscinodiscus granii</i>	0	0	0	0	186	0	0
<i>Coscinodiscus concinnus</i>	186	0	0	0	0	0	0
<i>Coscinodiscus</i> sp. 1	186	186	186	0	186	278	20
<i>Coscinodiscus</i> sp. 2	0	0	93	0	557	649	70
<i>Cyclotella</i> sp.	1484	186	186	0	186	464	20
<i>Diploneis</i> sp.	371	0	93	0	1670	93	0
<i>Guinardia delicatula</i>	0	0	371	0	0	0	0
<i>Guinardia striata</i>	0	557	0	0	0	93	30
<i>Haslea</i> sp.	186	0	0	278	0	93	0
<i>Hemiaulus hauckii</i>	742	0	0	0	0	186	0
<i>Hemiaulus sinensis</i>	0	0	0	278	0	0	40
<i>Hemiaulus membranaceus</i>	557	0	0	1020	0	557	0
<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	0	0	0	0	0	93	0
<i>Lauderia annulata</i>	0	0	0	0	2783	0	0
<i>Lioloma pacificum</i>	186	186	93	0	0	0	10
<i>Luticola</i> sp.	0	0	0	0	186	0	0
<i>Navicula directa</i>	0	0	93	0	1484	186	10
<i>Navicula</i> sp. 1	186	557	186	278	928	649	50
<i>Navicula</i> sp. 2	0	0	93	0	0	0	0
<i>Navicula transitans</i>	186	0	0	371	0	0	0
<i>Nitzschia</i> sp.	186	0	186	93	0	0	70
<i>Nitzschia constricta</i>	186	0	0	0	0	0	0
<i>Paralia sulcata</i>	0	557	0	0	1670	464	0
<i>Pleurosigma normanii</i>	186	0	0	186	186	0	0
<i>Pleurosigma</i> sp.	557	0	0	278	0	0	20
<i>Proboscia alata</i>	186	0	0	649	0	0	0
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	9646	0	0	1762	0	0	0
<i>Skeletonema costatum</i>	1113	0	0	0	0	0	60
<i>Surirella fastuosa</i>	0	0	0	93	1113	93	0
<i>Surirella</i> sp.	0	0	0	0	186	0	0
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	1299	371	93	0	928	371	20
<i>Thalassiosira delicatula</i>	0	557	186	0	186	186	60
<i>Thalassiosira rotula</i>	928	0	557	0	557	742	0
<i>Thalassiosira punctigera</i>	1670	0	278	742	1299	557	50
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	0	0	93	0	0	0	0
<i>Thalassiothrix</i> sp.	0	186	0	0	371	0	0
<i>Trachyneis</i> sp.	186	0	0	0	0	0	0
<b>Dinophyceae</b>							
<i>Alexandrium</i> sp.	0	0	93	0	0	0	10
<i>Ceratium candelabrum</i>	0	0	0	0	0	0	30

Fonte: a autora (2019)

Tabela 2 (continuação) – Lista das espécies e suas respectivas densidades (células.L<sup>-1</sup>) em cada estação, identificadas a partir das amostras quantitativas. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.

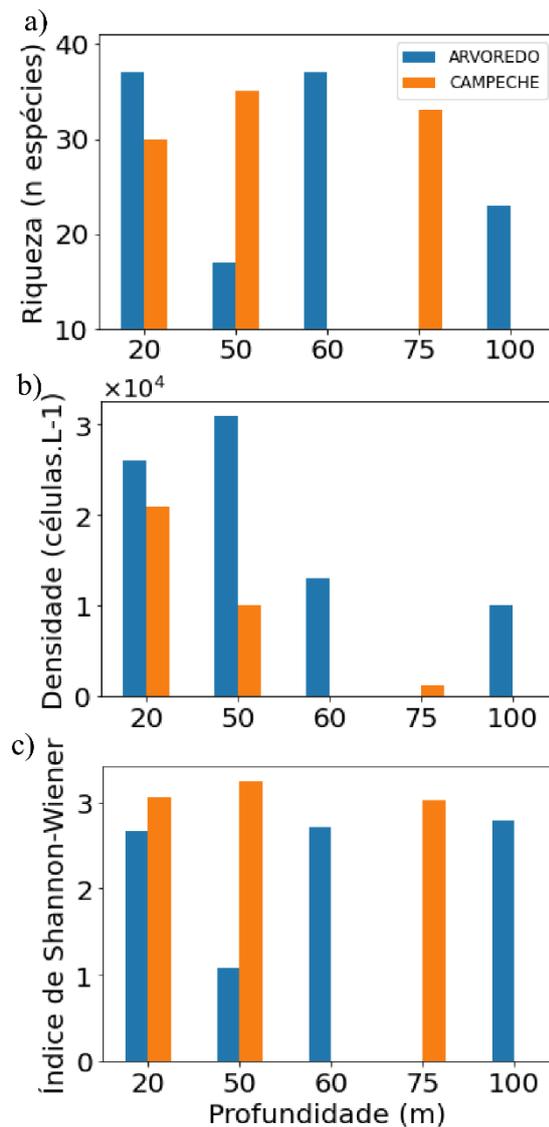
<b>Dinophyceae</b>	<b>AI20</b>	<b>AI50</b>	<b>AI60</b>	<b>AI100</b>	<b>CI20</b>	<b>CI50</b>	<b>CI75</b>
<i>Ceratium furca</i>	0	557	835	0	1299	1020	0
<i>Ceratium fusus</i>	0	186	0	0	0	93	10
<i>Ceratium hexacanthum</i>	0	0	93	0	0	0	10
<i>Ceratium trichoceros</i>	186	186	0	0	0	0	0
<i>Ceratium tripos</i>	0	0	0	0	0	93	0
<i>Dinophysis acuminata</i>	371	186	0	0	0	93	0
<i>Diplopelta</i> sp.	0	0	0	278	0	93	0
<i>Ornithocercus</i> sp.	0	0	0	0	0	0	10
<i>Phalacroma favus</i>	0	0	0	0	186	0	0
<i>Phalacroma rotundatum</i>	0	0	0	0	0	186	0
<i>Phalacroma</i> sp.	0	0	93	0	0	0	0
<i>Podolampas bipes</i>	0	0	93	0	0	0	10
<i>Podolampas palmipes</i>	0	0	0	0	0	186	0
<i>Prorocentrum balticum</i>	0	0	0	0	186	0	10
<i>Prorocentrum compressum</i>	0	0	186	0	0	0	40
<i>Prorocentrum gracile</i>	0	0	371	186	0	278	0
<i>Prorocentrum lima</i>	186	0	186	0	0	93	30
<i>Prorocentrum micans</i>	186	0	0	0	371	0	10
<i>Prorocentrum rostratum</i>	186	0	93	0	0	0	10
<i>Protoperidinium divergens</i>	0	0	0	93	0	93	0
<i>Protoperidinium pellucidum</i>	0	0	0	0	186	0	0
<i>Protoperidinium simulum</i>	186	0	0	0	928	0	0
<i>Protoperidinium steinii</i>	0	0	93	0	557	186	10
<i>Pyrocystis lunula</i>	0	0	0	0	0	0	10
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	186	0	93	464	186	93	0
<b>Ciliophora</b>							
<i>Amphorellopsis</i> sp.	186	0	0	0	0	0	0
<i>Codonellopsis schabi</i>	0	0	186	0	0	0	0
<i>Eutintinnus fraknoi</i>	186	0	0	371	0	0	0
<i>Eutintinnus macilentos</i>	0	0	93	0	0	0	0
<i>Mesodinium rubrum</i>	1484	1113	4823	1299	1113	928	240
<i>Strombidium</i> sp.	186	0	371	0	742	557	120
<i>Tintinnopsis campanula</i>	0	0	278	0	0	0	30
<i>Tintinnopsis rotundata</i>	371	0	278	0	371	0	0
<i>Tintinnopsis tocantinensis</i>	0	0	0	0	0	0	10
<i>Tintinnopsis tubulosa</i>	186	0	0	0	0	0	0
<i>Tontonia</i> sp.	0	0	0	0	186	0	10
<i>Undella</i> sp.	0	0	0	93	0	0	0
<b>Cyanophyceae</b>							
<i>Johannesbaptistia pellucida</i>	0	0	928	0	0	0	0
<i>Trichodesmium erytraeum</i>	0	0	371	0	0	93	0
<b>Dictyophyceae</b>							
<i>Dictyocha</i> sp.	0	0	0	93	0	0	0
<b>Thecofilosea</b>							
<i>Ebria tripartita</i>	0	0	0	0	0	93	0
<b>Prymnesiophyceae</b>							
<i>Cocolitoforídeo</i>	0	24672	0	0	0	0	0
<b>TOTAL - Cé/L</b>	26169	31171	12994	10482	20973	10396	1200
<b>RIQUEZA</b>	36	17	37	23	30	35	33

Para o cálculo de riqueza, densidade, índice de Shannon-Wiener, distribuição dos táxons e dos grandes grupos dominantes, não foram consideradas as coletas do nêuston (com balde) para a amostra AI60, já que nesta o *T. erythraeum* corresponde a 99% da composição fitoplanctônica. Nas amostras de garrafa, *T. erythraeum* não apresentou altas densidades de células, comparativamente às amostras de balde, uma vez que estas foram coletadas em subsuperfície e a capacidade de flutuabilidade das células de *Trichodesmium* spp. eleva as florações à zona mais superficial da coluna de água, na camada superficial, que separa a massa d'água da atmosfera. Portanto, estes parâmetros consideraram apenas as amostras quantitativas (amostradas com garrafa Niskin).

A riqueza de espécies variou entre 17 e 37, sendo o menor valor encontrado em AI50 (Fig. 9a), que coincidiu com a maior densidade de células ( $3,1 \times 10^4$  cél.L<sup>-1</sup>) (Fig. 9b). Especificamente para AI60, a riqueza foi 37, assim como para AI20. De modo geral, as estações mais rasas possuem maior densidade de células que as estações mais profundas (Fig. 9b). A menor densidade de células ( $1,2 \times 10^3$  cél.L<sup>-1</sup>) foi registrada em CI75, onde a riqueza (33) foi um pouco acima da média considerando todos os pontos (30).

O índice de diversidade de Shannon-Wiener (Fig. 9c) variou entre 1,07 (AI50) e 3,25 (CI50), com média de 2,65. O valor para a estação da floração foi 2,71, um pouco acima da média para todas as amostras. Portanto, CI50 foi a estação que apresentou maior índice de diversidade, permitindo a coexistência das espécies. Em contrapartida, AI50 foi a estação que apresentou o menor valor. Em AI50, a dominância foi de uma espécie de cocolitoforídeos. O índice de diversidade de Shannon-Wiener para AI60 demonstra a dominância para uma espécie, no caso *Mesodinium rubrum*.

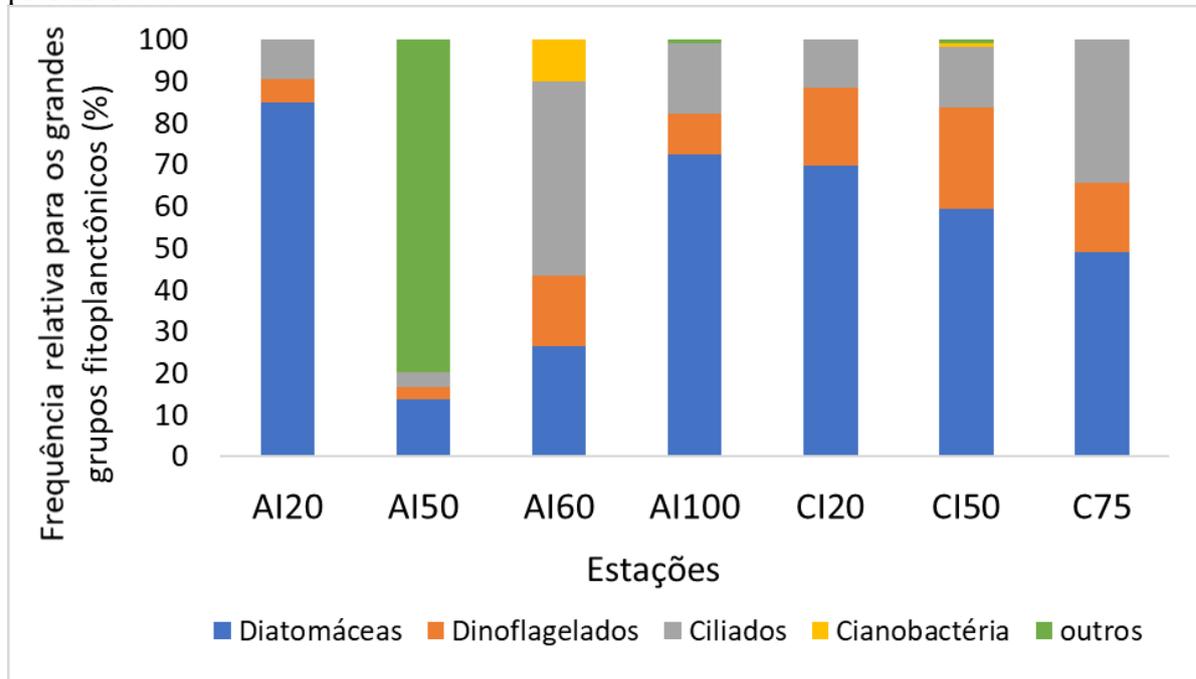
Figura 9 – a) Riqueza de espécies; b) densidade total do fitoplâncton (cél.L<sup>-1</sup>); e c) índice de diversidade de Shannon-Wiener.



Fonte: a autora (2021)

Os grandes grupos registrados nas quantificações foram: Bacillariophyceae, Dinophyceae, Ciliophora e Cyanophyceae (Fig. 10). A classificação “Outros” engloba Dictyochophyceae, Thecofilosea e Prymnesiophyceae, que representaram porcentagens de contribuição menores ou iguais a 1% para a comunidade fitoplanctônica; exceto em AI50, devido à presença dos cocolitofórideos (Prymnesiophyceae).

Figura 10 – Frequência relativa para os grandes grupos fitoplanctônicos determinada a partir das amostras quantitativas em dezembro de 2018. Frequência relativa para diatomáceas (azul); dinoflagelados (laranja); ciliados (cinza); cianobactérias (amarelo); e outros (Dictyochophyceae, Thecofilosea e Prymnesiophyceae). Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.



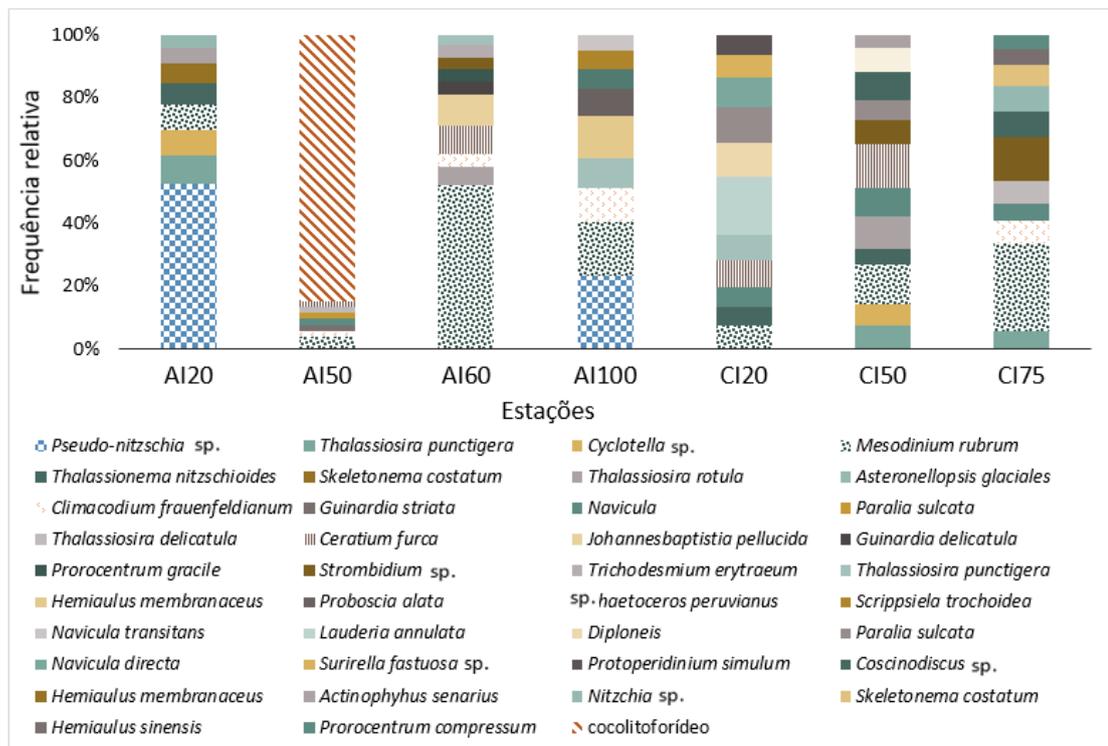
Fonte: a autora (2021)

De modo geral, o grupo das diatomáceas dominou a composição das assembleias fitoplanctônicas na camada superficial, alcançando um máximo de 85% em AI20. As exceções para este padrão ocorreram nas estações AI50 (13%) e AI60 (26%) (floração). Na estação onde ocorreu a floração, houve um máximo (46%) para o grupo dos ciliados. A maior frequência relativa para dinoflagelados foi encontrada nas estações do transecto do Campeche. Em AI60, os dinoflagelados corresponderam a 17% da frequência relativa, mais alta quando comparada a outros pontos do mesmo transecto, e as cianobactérias corresponderam a 10% da frequência para os grandes grupos. Aqui, além de *T. erythraeum*, a cianobactéria *Johannesbaptistia pellucida* também foi importante.

A Fig. 11 mostra a distribuição de frequências relativas de ocorrência dos principais táxons em cada um dos pontos amostrais para as espécies mais abundantes. O critério para definir as espécies mais abundantes foi selecionar as que representaram em torno de 70% da frequência acumulada para a composição fitoplanctônica por estação – exceto na estação AI50,

com aproximadamente 80% da composição atribuída a uma espécie de cocolitorofídeos, foram selecionadas as espécies que corresponderam a 92% do total.

Figura 11 – Frequências relativas de ocorrência dos principais táxons. Distribuição de clorofila-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). O critério para definir as espécies mais abundantes foi selecionar as que representaram a frequência acumulada em torno de 70% da composição fitoplanctônica por estação. Exceto para a estação AI50, com aproximadamente 80% da composição atribuída a uma espécie de cocolitorofídeos, na qual foram usadas as espécies que corresponderam a 92%. Em AI60, não foram consideradas as densidades de *T. erytraeum*. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.



Fonte: a autora (2021)

O grupo dos ciliados (Ciliophora) foi incluído nas quantificações do fitoplâncton, apesar de integrar o protozooplâncton, por representar um ciliado com algas endossimbiontes, o que funcionalmente o faz pertencer ao fitoplâncton. Organismos com capacidade tanto heterotrófica quanto autotrófica são denominados mixotróficos. Dois representantes em especial, *Mesodinium rubrum* e *Strombidium sp.*, foram relativamente importantes em algumas estações, como AI60 e CI75.

Considerando todos os transectos, o ciliado *Mesodinium rubrum* foi a espécie dominante. A espécie de cocolitorofídeos já mencionada, embora numericamente representativa, apareceu apenas na estação AI50. A diatomácea *Pseudo-Nitzschia sp.* foi

encontrada em AI20 e AI100 com densidades 9,6 e  $1,8 \times 10^3$  células.L<sup>-1</sup>, respectivamente, totalizando  $1,1 \times 10^4$  células.L<sup>-1</sup>. Todas as outras espécies apareceram em ordem de grandeza de  $10^3$  células.L<sup>-1</sup>, com especial importância para *Thalassiosira punctigera*, *Thalassionema nitzschioides*, *Navicula* sp. 1, *Cyclotella* sp. 1 e *Climacodium frauenfeldianum*, que estiveram presentes em ao menos seis dos sete pontos amostrais.

Em AI20, *Thalassiosira punctigera*, *Cyclotella* sp.1 e *Mesodinium rubrum* foram as espécies, respectivamente, com maiores densidades de células depois de *Pseudo-Nitzschia* sp. Já na isóbata de 100m do transecto Arvoredo, depois de *Pseudo-Nitzschia* sp e *Mesodinium rubrum*, com as maiores densidades, foram registradas maiores densidades de *Hemiaulus membranaceus* e *Climacodium Frauenfeldianum*. Em AI50, o cocoliforídeo nanoplânctônico de tamanho médio  $23,97 \pm 4,15$  (µm) dominou em subsuperfície, seguido de *Mesodinium rubrum*, *Ceratium furca* e *Navicula* sp.1. Na estação onde foi identificado o processo de floração (AI60), a amostra em subsuperfície mostrou uma dominância de *Mesodinium rubrum* (31%), a maior frequência relativa encontrada para a espécie, seguido de outra cianobactéria, *Johannesbaptistia pelúcida*, além de *Ceratium furca* e *Thalassiosira rotula*.

No transecto Campeche, na estação CI20, *Lauderia anulata* correspondeu a 13% das espécies amostradas, embora apenas uma cadeia longa desta espécie tenha sido registrada na amostra. Depois dela, outras espécies que mais apareceram nas contagens foram *Diploneis* sp.1, *Paralia sulcata* e *Navicula* sp.1. Neste ponto, *Mesodinium rubrum* foi a oitava espécie mais representativa, correspondendo a 5% do total. Em CI50, *Ceratium furca* e *Mesodinium rubrum* apresentaram as maiores proporções seguidas de *Thalassiosira rotula* e *Coscinodiscus* sp.2. No ponto CI75, *Mesodinium rubrum* volta a dominar em subsuperfície, seguido de outro ciliado, *Strombidium* sp. 1, e das diatomáceas *Coscinodiscus* sp. 2, *Nitzschia* sp. 1, *Climacodium frauenfeldianum* e *Skeletonema costatum*.

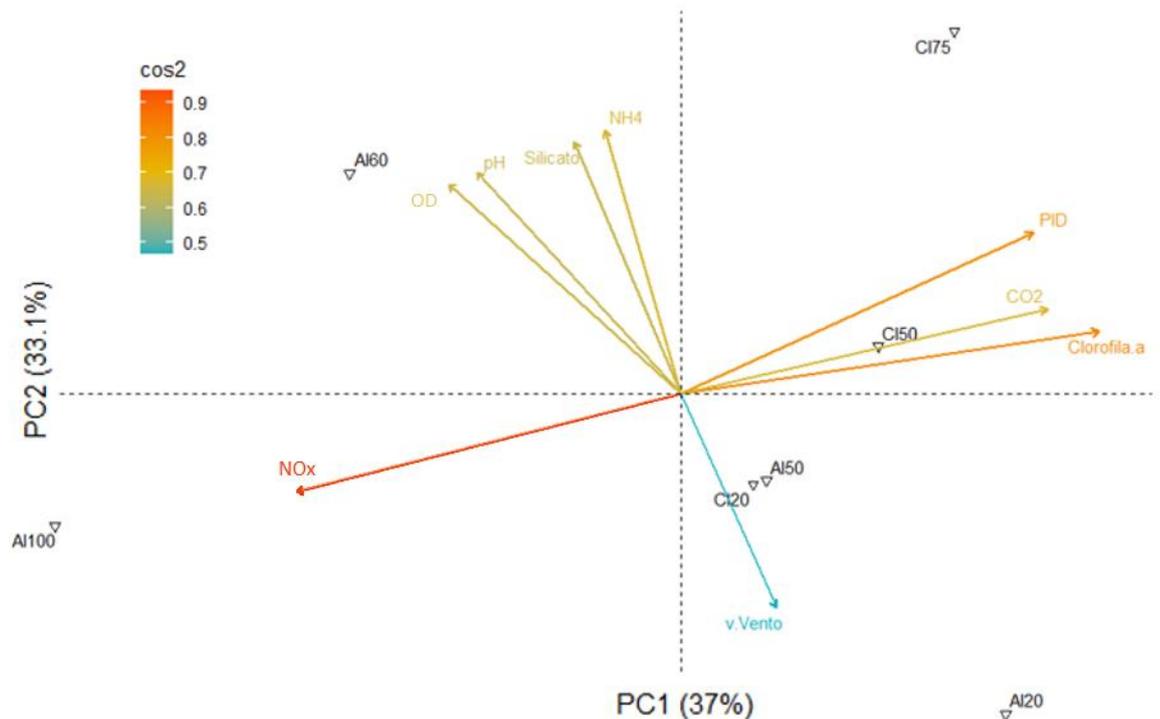
Encontrou-se um cocolitoforídeo ocorrendo em densidades de  $2,4 \times 10^4$  cél.L<sup>-1</sup> nas proximidades da isóbata de 50m. Segundo Brandini (2018), os cocolitoforídeos, embora comumente amostrados na região, representam um componente menor do fitoplâncton. Becker (2018) identificou o cocolitoforídeo *Umbilicosphaera* sp. ocorrendo com densidades  $\sim 7.10^3$  cél.L<sup>-1</sup> na plataforma de Santa Catarina, concomitante com a ocorrência de ressurgência de primavera tardia. Acreditamos que o cocolitoforídeo identificado neste trabalho na amostra AI50 seja desta mesma espécie, devido à similaridade morfológica e condições oceanográficas do entorno. No entanto, análises em microscópio eletrônico de varredura seriam necessárias para confirmar esta hipótese.

### 3.7 ANÁLISE DE DADOS

#### 3.7.1 Análise de Componentes Principais

A análise de componentes principais aplicada às variáveis ambientais explicou 70.1% da variabilidade observada (Fig. 12). O primeiro eixo (PC1) explicou 37% e o segundo eixo (PC2) 33.1% da variabilidade total dos dados. Oxigênio dissolvido (DO), silicato,  $\text{NH}_4$  e pH estão positivamente relacionados entre si e mais bem correlacionados com a estação da floração de *T. erythraeum* (AI60), demarcando a relação com produção primária e o consumo de  $\text{CO}_2$  no ponto onde a razão N:P também é significativa. Estas variáveis foram relacionadas negativamente com fosfato (PID),  $\text{CO}_2$  e clorofila-a, que crescem principalmente na direção das estações CI50 e CI75. Velocidades mais altas do vento foram relacionadas inversamente à estação da floração e ficaram mais próximas das estações CI20, AI20 e AI50. O ponto AI100 representou boa correlação principalmente com nitrato+nitrito ( $\text{NO}_x$ ).

Figura 10 – Análise de Componentes Principais: oxigênio dissolvido (DO); nitrato+nitrato ( $\text{NO}_x$ ); potencial hidrogeniônico (pH); silicato; amônio ( $\text{NH}_4$ ); fosfato (PID); gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ); clorofila-a; e velocidade do vento (v.Vento). O gradiente de cores (cos2) representa a qualidade da representação das variáveis no espaço 2D, quanto menor seu valor menor a distorção. Os triângulos representam as estações amostrais. Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.



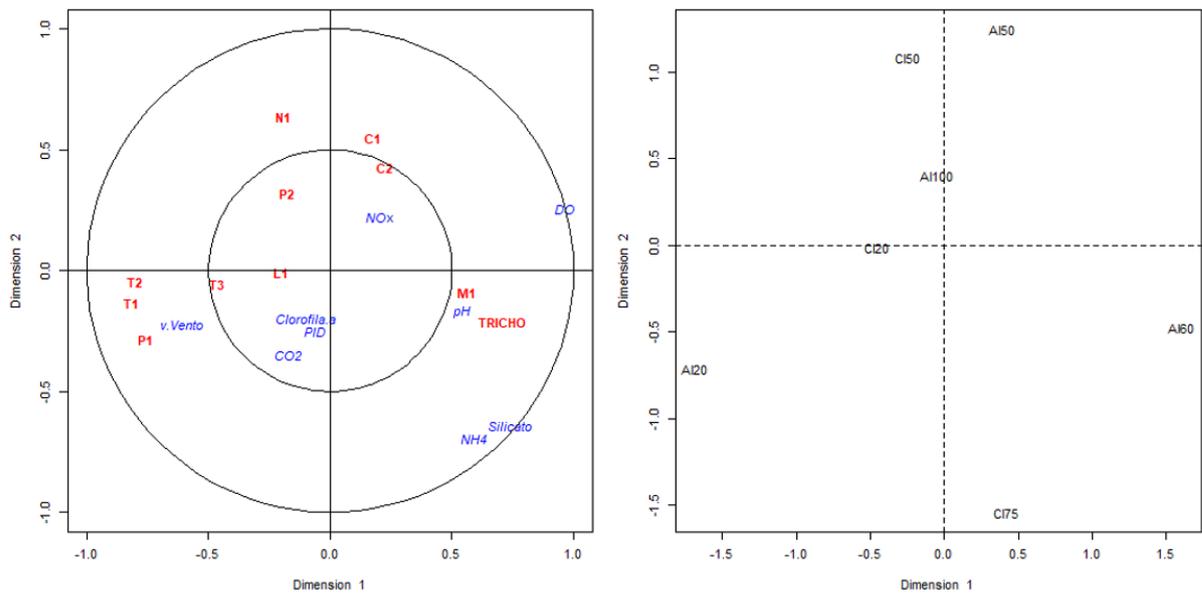
Fonte: a autora (2021)

### 3.7.2 Análise de Correlação Canônica regularizada

A Análise de Correlação Canônica regularizada (CCA), que utiliza tanto as variáveis ambientais quanto as bióticas (neste caso densidade (cél.L<sup>-1</sup>)), é apresentada na Fig. 11. As variáveis ambientais mais significativas, encontradas a partir da Análise de Componentes Principais, foram selecionadas para compor a CCA. Para esta análise de ordenação, foram incluídos os valores de densidade de células.L<sup>-1</sup> das 10 espécies mais representativas, considerando todos os transectos, e o valor de densidade encontrado para a amostra do nêuston em AI60. Nesta análise, encontrou-se uma porcentagem de explicação para a variabilidade dos dados em torno de 72%, sendo 39% para a dimensão 1 e 33% para a dimensão 2.

As altas densidades para *T. erythraeum* (TRICHO) foram mais bem correlacionadas, no primeiro quadrante, com OD, pH, NH<sub>4</sub> e silicato, assim como demonstrado no PCA para o ponto AI60, onde ocorreu a floração. O ciliado *M. rubrum*, que apresentou a maior densidade em AI60, também apresentou uma relevância para CI75. O ponto AI100 foi mais bem correlacionado com nitrito+nitrato (NO<sub>x</sub>). As estações mais rasas agruparam-se correlacionadas a clorofila-a, CO<sub>2</sub>, velocidades dos ventos, fosfato e CO<sub>2</sub> e com as espécies as diatomáceas *Lauderia Anulata*, *Thalassiosira rotula*, *Thalassiosira punctigera*, *Pseudo-nitzchia* e *Thalassionema nitzchioides*.

Figura 11 – Análise de Correlação Canônica regularizada. As variáveis bióticas estão representadas em vermelho: cocolitorofídeo (C1), *Pseudo Nitzschia* (P1), *Mesodinium rubrum* (M1), *Thalassiosira punctigera* (T1), *Ceratium furca* (C1), *Thalassionema nitzschioides* (T2), *Navicula* sp. (N1), *Thalassiosira rotula* (T3), *Laudera anulata* (L1), *Paralia sulcata* (P2), *Trichodesmium erythraeum* (TRICHO). As variáveis abióticas estão representadas em azul: oxigênio dissolvido (DO); nitrito+nitrato ( $\text{NO}_x$ ); potencial hidrogeniônico (pH); silicato; amônio ( $\text{NH}_4$ ); fosfato (PID); gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ); clorofila-a; e velocidade do vento (v.Vento). Convenções: A indica estações do transecto Arvoredo; C indica estações do transecto Campeche; I seguido de número indica a isóbata e sua respectiva profundidade.



Fonte: a autora (2021)

## 4 DISCUSSÃO

### 1. Massas de água na plataforma de Santa Catarina (27° S – primavera tardia)

O perfil vertical de massas de água para as amostras de primavera tardia realizadas neste trabalho identificou a Água Subtropical de Plataforma em superfície, Água Tropical no meio da coluna e Água Central do Atlântico Sul em maiores profundidades, como demonstrado em estudos anteriores para a região (BECKER, 2018; MÖLLER et al., 2008; PEREIRA BRANDINI et al., 2014a; PIOLA et al., 2018). A literatura aponta a primavera e o verão como as épocas mais favoráveis ao desenvolvimento de florações do gênero na costa de Santa Catarina (RÖRIG et al., 2018).

### 2. Momento da floração, inicial ou senescente

A presença de *T. erythraeum* não foi associada a altos valores de densidade ou riqueza para outras espécies microfitoplanctônicas coocorrendo com a cianobactéria. Portanto, sugere-se que a floração estivesse em uma fase primária de agregação pois:

i) Rörig e Guimarães (1997), em área próxima a Rebio Arvoredo, identificaram uma floração saudável e outra senescente e estimaram que a abundância total de nano e microfitoplâncton – sem levar em conta os valores para *Trichodesmium* sp. – foi maior na mancha senescente (decomposição das colônias e possível ciclagem de nutrientes) do que na mancha com aspecto saudável (fase inicial da agregação de tricomas).

ii) Bif et al. (2019) analisaram a presença de toxinas em amostras de florações de *Trichodesmium* spp. na quebra de plataforma entre 35°S e 24°S e encontraram uma correlação positiva entre suas concentrações e a quantidade de tricomas. Os autores sugerem que a produção de toxinas se dá na fase inicial de agregação de tricomas na superfície, inibindo o crescimento de outros organismos microfitoplanctônicos e a herbivoria.

### 3. Influência da floração na química da água

A concentração máxima de amônio (8,3µM) ocorreu na estação da floração de *T. erythraeum*, na qual foi registrada a presença do copépodo *M. gracillis*, um dos poucos pastadores diretos de *Trichodesmium* spp. Bif (2019) também registrou o copépodo ocorrendo nas amostras de mancha de *Trichodesmium* spp. na quebra de plataforma. O'Neill, Metzler e Glibert (1996) encontraram um incremento significativo de NH<sub>4</sub> em função da densidade de *M. gracillis*, comparando incubações do copépodo com e sem a presença de *T. erythraeum*. Assim,

a presença do copépodo agrega na explicação da alta concentração relativa para  $\text{NH}_4$  na estação da floração, além de reforçar o item anterior (2. Momento inicial da floração).

As análises multivariadas indicaram que o ambiente em torno da floração não era limitado por nitrogênio no momento da coleta. Nesta estação, as variáveis pH, amônio, silicato e oxigênio indicaram a produção primária prevalecendo em relação à respiração, além da entrada de nitrogênio. É importante ressaltar que, em uma escala de massa d'água, ao compararmos as médias para os parâmetros químicos da ASTP deste trabalho com médias anteriores para a região (Tabela 3), quando não foram identificadas florações de *Trichodesmium* spp., não foi identificado um incremento relativo de nitrogênio. Portanto, conclui-se que a presença de *T. erythraeum* influencia pontualmente a massa de água onde ocorre a floração, reforçando o já conhecido processo de incremento de nitrogênio oriundo da fixação de  $\text{N}_2$  pela cianobactéria.

Detoni et al (2016), a partir de dados para quebra da plataforma no Atlântico Sudoeste, compararam estações com e sem florações de *Trichodesmium* spp. visíveis a olho nu e registraram razões N:P maiores em pontos onde florações formaram manchas em superfície. Aqui, identificamos padrão similar. Comparada com as outras estações, também foi encontrada razão N:P elevada ocorrendo na amostra da floração. Na Tabela 3, a média para razão N:P ( $24,28 \pm 15,06$ ) apresentou um aumento quando comparado com Bordin (2019), mas esteve próximo aos valores encontrados por Fontes (2018).

No entanto, é interessante verificar que este trabalho identificou a menor média para concentração de fosfato ( $0,21 \pm 0,06 \mu\text{M}$ ). Trabalhos anteriores já associaram escassez de fosfato e ferro (não amostrado neste trabalho) à motilidade de tricomas e subsequente formação de colônias (TZUBARI et al., 2018).

Tabela 2 – Comparação dos parâmetros (média  $\pm$  dp) com trabalhos anteriores para a região. \*média (máx - mín) – os valores não possuem desvio pois foram calculados a partir da soma das médias para os valores de nitrato e amônio para ASTP.

	<b>Braga <i>et al</i> (2008)</b>	<b>Fontes <i>et al</i> (2018)</b>	<b>Bordin <i>et al</i> (2019)</b>	<b>Este trabalho</b>
<b>Estação - ano</b>	Verão – 2004	Verão – 2010	Verão - 2014, 2015, 2016	Primavera – 2018
<b>N amostral</b>	n = 167	n = 21	n = 34	n = 7
<b>Temperatura (°C)</b>	20,49 $\pm$ 1,22	-	24,76 $\pm$ 2,01	23,61 $\pm$ 0,75
<b>Salinidade</b>	34,44 $\pm$ 0,99	-	35,06 $\pm$ 0,65	35,1 $\pm$ 0,44
<b>Nitrato+nitrato (µM)</b>	2,26 $\pm$ 1,80	1,29 $\pm$ 0,77	1,15 $\pm$ 1,45	0,75 $\pm$ 0,24
<b>Amônio (µM)</b>	-	7,71 $\pm$ 3,51	1,62 $\pm$ 1,51	3,85 $\pm$ 2,42
<b>NID (µM)</b>	-	9 (1,22 - 15,72) *	2,78 $\pm$ 2,23	4,61 $\pm$ 2,44
<b>N:P</b>	-	24,00 $\pm$ 11,00	12,58 $\pm$ 29,71	24,28 $\pm$ 15,06
<b>Fosfato (µM)</b>	0,40 $\pm$ 0,08	0,43 $\pm$ 0,19	0,39 $\pm$ 0,23	0,21 $\pm$ 0,06
<b>Silicato (µM)</b>	4,09 $\pm$ 0,41	3,76 $\pm$ 2,98	2,89 $\pm$ 1,71	7,17 $\pm$ 3,63
<b>OD µg.L<sup>-1</sup></b>	4,91 $\pm$ 0,12	-	8,91 $\pm$ 1,07	6,37 $\pm$ 0,18
<b>Clorofila a µg.L<sup>-1</sup></b>	-	1,12 $\pm$ 0,61	-	0,71 $\pm$ 0,28

Fonte: a autora (2021)

#### 4. Influência costeira x oceânica no desencadeamento da floração

Acreditamos que a influência costeira tenha sido pouco significativa para o desencadeamento da floração, ao menos no que diz respeito aos nutrientes mensurados neste trabalho, pois:

i) Nossos resultados para precipitação (mm) indicaram ausência de chuvas para o período de pelo menos 10 dias anteriores ao evento. Supomos, portanto, que não houve um aporte costeiro significativo de nutrientes que alcançasse a isóbata de 60m, onde a floração foi identificada.

ii) As características fisiológicas de *Trichodesmium* spp. são melhor associadas a regiões quentes e com depleção de nutrientes, encontradas nas águas da Corrente do Brasil, por exemplo, que faz fronteira oeste com nossa costa próximo à quebra de plataforma. Detoni (2016) descreve ocorrência de um grande número de manchas neustônicas de *Trichodesmium* spp. nesta região (outono e primavera). Bordin et al. (2019) mostra que próximo à Rebio Arvoredo, tanto para o inverno quanto para o verão, isóbatas mais rasas (30m) possuem águas menos quentes do que isóbatas mais afastadas da costa (50m). Temperaturas em torno de 25°C, propícias para proliferação de *Trichodesmium* spp., foram encontradas pelos autores em amostragens de verão na isóbata 50m. Outro ponto importante é que a fluutuabilidade positiva do gênero faz com que as florações tornem-se passíveis de transporte eólico, o que poderia

sugerir que florações encontradas próximas à costa poderiam ter sido transportadas horizontalmente e não necessariamente sido impulsionadas por aporte costeiro de nutrientes – oriundo de tratamento ineficiente de esgoto ou *run-off* em áreas agrícolas (RÖRIG et al., 2018).

### 5. Influência da floração nas assembleias fitoplanctônicas

As diatomáceas foram identificadas dominando em cinco das sete estações amostrais, variando a contribuição relativa entre 49 e 85%. As duas exceções foram a estação da floração (26% para diatomáceas) e a estação onde uma espécie de cocolitoforídeos dominou (13% para diatomáceas). Portanto, houve uma alteração na composição fitoplanctônica associada à floração de *T. erythraeum*. *Thalassiosira punctigera*, *Thalassionema nitzschioides*, *Navicula* sp.1, *Cyclotella* sp.1 e *Climacodium frauenfeldianum* foram os táxons mais representativos, estando presentes em ao menos seis dos sete pontos amostrais. Trabalhos anteriores na região da costa de Santa Catarina também identificaram diatomáceas cêntricas e penadas dominando em abundância e diversidade, principalmente no verão, com as espécies mais importantes em águas mais próximas à costa (BRANDINI, 2018; GUIMARÃES; RÖRIG, 1997; PEREIRA BRANDINI et al., 2014b). Guimarães e Rörig (1997) encontraram elevada contribuição de *Pseudo-nitzschia* sp. em amostras para a região (isóbata ~50m), sob influência de florações de *Trichodesmium* spp. Aqui, encontramos o táxon ocorrendo com relativa importância ( $9,5 \times 10^3$  cél.L<sup>-1</sup>) nas proximidades da Rebio Arvoredo, isóbata de 20m.

Na estação da floração, outro ponto que chama atenção é a grande contribuição de ciliados (45%). O ciliado mais importante foi *M. rubrum*. Além dele, *Strombidium* spp., *Eutintinnus* spp. e *Tintinnopsis* spp. foram registrados na estação. *Strombidium* spp. também foi encontrado por Becker fazendo parte da comunidade planctônica na região. A autora encontrou ciliados ocorrendo em estações amostradas ao longo do Cabo de Santa Marta e Baía da Babitonga, porém sempre em baixa densidade. A floração ainda teve importância maior para cianobactérias do que o encontrado para as demais amostras. Portanto, a floração parece ter favorecido a ocorrência de outras cianobactérias na estação. Além de *T. erythraeum*, outra cianobactéria (*J. pellucida*) contribuiu para o total de 10% para este grupo na estação da florescência, contra valores em torno de 1% encontrados para as outras amostras.

Brandini (2018) aponta que, em condição de estratificação de verão, os dinoflagelados são menos importantes que as diatomáceas, mas que no início do outono eles tendem a ocupar a plataforma intermediária. Aqui, identificamos padrão similar ao verão, com o grupo contribuindo entre 3 e 24% do total em cada estação; e com maiores contribuições em estações

mais afastadas da costa, como também verificado por Becker (2018). As espécies de dinoflagelados mais importantes foram *Ceratium furca*, *Protoperidinium simulum*, *Scripssiela trochoidea*, *Protoperidinium steinii*, *Prorocentrum gracile*, *Dinohopsis acuminata*, *Prorocentrum micans* e *Prorocentrum lima*.

Becker (2018) encontrou densidades relativamente baixas para o microfitoplâncton e maiores importâncias para células na classe do nanofitoplâncton. Encontramos densidades do microfitoplâncton variando entre  $1,2 \times 10^3$  e  $3 \times 10^4$  cél.L<sup>-1</sup>. A densidade de microfitoplâncton para a amostra da floração foi  $1,2 \times 10^4$  cél.L<sup>-1</sup>, não configurando aumento significativo para a assembleia microfitoplanctônica associada à *T. erythraeum*, como já verificado no item 1 desta seção, embora tenhamos identificado o incremento de nitrogênio na coluna.

Tricomas isolados de *T. erythraeum* foram identificados em todas as amostras qualitativas. Já para as amostras quantitativas, a espécie esteve presente em apenas dois pontos e em baixa densidade. Para a amostra neustônica da floração, a densidade apenas de tricomas de *T. erythraeum* superou em três ordens de grandeza as densidades de células para o microfitoplâncton total (considerando ciliados) em cada estação, com *T. erythraeum* contribuindo com 99% do total do microfitoplancton. No outro 1%, a amostra foi constituída principalmente pelos dinoflagelados *Ceratium furca*, *Ceratium fusus*, *Prorocentrum gracile*, *Protoperidinium steinii* e *Protoperidinium divergens*. Bif (2019) também registrou espécies de *Ceratium* spp. coocorrendo com *Trichodesmium* spp., além da presença de diatomáceas da ordem Coscinodiscineae. A autora ainda registrou a ocorrência de *Rhizosolenia* sp. e *Chaetoceros* sp. em simbiose com outras fixadoras de N<sub>2</sub>. Aqui, *Rhizosolenia hebetata* foi encontrada em associação com a diazotrófica *Richelia intracellularis*, na amostra qualitativa da floração.

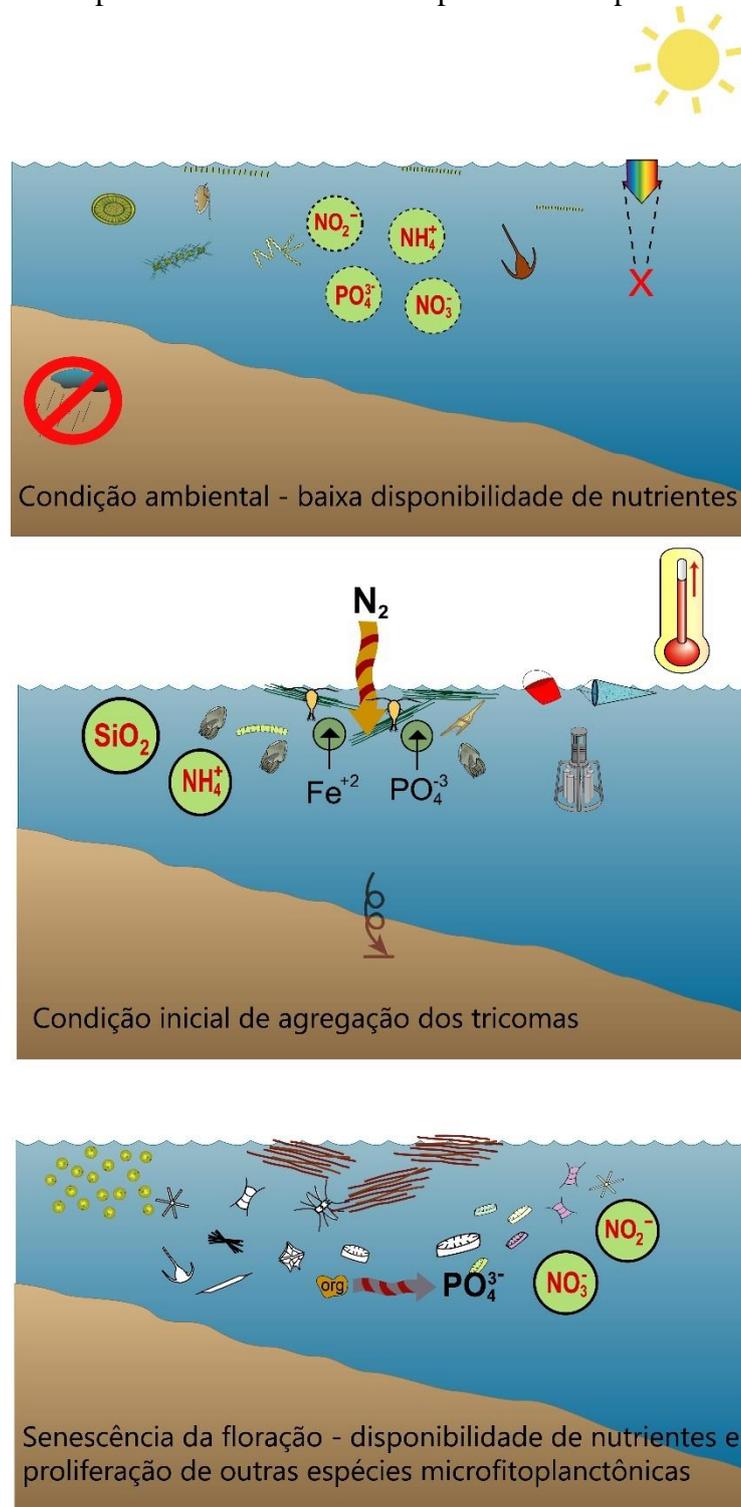
## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a composição do fitoplâncton e as características biogeoquímicas em dois transectos da plataforma continental de Santa Catarina, detectando uma floração de *Trichodesmium erythraeum* nas proximidades da Reserva Marinha Biológica do Arvoredo sob influência da Água Subtropical de Plataforma.

Identificou-se um incremento pontual de nitrogênio ( $\text{NH}_4$ ) na estação da floração, que não pode ser verificado em uma escala de massa de água. Houve, ainda, uma diferença na composição das espécies microfitoplanctônicas, com queda na contribuição por diatomáceas e máximo para ciliados. A estação não apresentou altas densidades de células, configuração esperada após o *input* de formas nitrogenadas oriundas do processo de fixação de  $\text{N}_2$ . Acredita-se que a floração estivesse em estágio inicial de agregação de tricomas e que a influência da drenagem costeira não tenha sido significativa para o seu desencadeamento. A Fig. 12 representa um resumo dos estágios da floração de *T. erythraeum*.

Considerando a potencial toxicidade, o baixo controle por herbivoria e a suscetibilidade a processos de advecção, as florações do gênero *Trichodesmium* spp. podem representar uma ameaça à biota adjacente e até mesmo à saúde humana. Em regiões como a costa de Santa Catarina, que abriga os principais cultivos de moluscos bivalves do país, além de possuir grande importância pesqueira, o acúmulo de manchas de *Trichodesmium* spp. próximo à costa pode representar um risco especialmente em condições de estresse de vento, quando as células entram em estado de senescência e a saxitoxina é liberada e solubilizada na água. Este é um dos principais incentivos para melhor compreender a distribuição e sazonalidade de florações do gênero, especialmente em isóbatas rasas na plataforma continental.

Figura 12 – Diagrama conceitual representando os estágios de uma floração de *Trichodesmium*. a) Condição anterior à floração; b) Início da agregação de tricomas de *T.erythraeum*. Este foi, provavelmente, o estágio em que a floração se encontrava no momento da coleta; c) Senescência da floração e disponibilidade de nutrientes para outras espécies do fitoplâncton.



Fonte: a autora (2021)

## REFERÊNCIAS

BASU, S. et al. Colonies of marine cyanobacteria *Trichodesmium* interact with associated bacteria to acquire iron from dust. **Communications Biology**, v. 2, n. 1, p. 1–8, 2019.

BECKER, É. **COMUNIDADE PLANCTÔNICA, ESPECIALMENTE COPEÓDES, DA PLATAFORMA CONTINENTAL DE SANTA CATARINA (26-29°S): ASSOCIAÇÃO COM PROCESSOS OCEANOGRÁFICOS E ESTRUTURA DE TAMANHO DE FITOPLÂNCTON**. [s.l: s.n.].

BECKER, É. C.; EIRAS GARCIA, C. A.; FREIRE, A. S. Mesozooplankton distribution, especially copepods, according to water masses dynamics in the upper layer of the Southwestern Atlantic shelf (26°S to 29°S). **Continental Shelf Research**, v. 166, n. June, p. 10–21, 2018.

BEHRENFELD, M. J. et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. **Nature**, v. 444, n. 7120, p. 752–755, 2006.

BEHRENFELD, M. J. Climate-mediated dance of the plankton. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 10, p. 880–887, 2014.

BERGMAN, B. et al. *Trichodesmium* - a widespread marine cyanobacterium with unusual nitrogen fixation properties. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 37, n. 3, p. 286–302, 2013.

BIF, M. B. et al. Microplankton Community Composition Associated With Toxic *Trichodesmium* Aggregations in the Southwest Atlantic Ocean. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, p. 23, 2019.

BIF, M. B.; YUNES, J. S. Distribution of the marine cyanobacteria *Trichodesmium* and their association with iron-rich particles in the South Atlantic ocean. **Aquatic Microbial Ecology**, v. 78, n. 2, p. 107–119, 2016.

BORDIN, L. H. et al. Nutrient and carbon dynamics under the water mass seasonality on the continental shelf at the South Brazil Bight. **Journal of Marine Systems**, v. 189, p. 22–35, 2019.

BRANDINI, F. Phytoplankton Assemblages of the Subtropical South West Atlantic: Composition and Dynamics in Relation to Physical and Chemical Processes. In: **Plankton Ecology of the Southwestern Atlantic: From the Subtropical to the Subantarctic Realm**. [s.l: s.n.]. p. 129–148.

CAPONE, D. G. et al. *Trichodesmium*, a Globally Significant Marine

Cyanobacterium. **Science**, v. 276, n. 5316, p. 1221–1229, 1997.

CAPONE, D. G. et al. Nitrogen fixation by *Trichodesmium* spp.: An important source of new nitrogen to the tropical and subtropical North Atlantic Ocean. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 19, n. 2, p. 1–17, 2005.

CARVALHO, J. L.; SCHETTINI, C. A.; RIBAS, T. M. Estrutura Termohalina Do Litoral Centro-Norte Catarinense. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 2, n. 1, p. 181, 2010.

CARVALHO, M.; GIANESELLA, S. M. F.; SALDANHA-CORRÊA, F. M. P. *Trichodesmium* Erythraeum bloom on the continental shelf off Santos, Southeast Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 56, n. 4, p. 307–311, 2008.

CAVICCHIOLI, R. et al. Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. **Nature Reviews Microbiology**, v. 17, n. 9, p. 569–586, 2019.

DETONI, A. M. S. et al. *Trichodesmium* latitudinal distribution on the shelf break in the southwestern Atlantic Ocean during spring and autumn. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 11, p. 1738–1753, 2016.

EBERL, R.; CARPENTER, E. J. Association of the copepod *Macrosetella gracilis* with the cyanobacterium *Trichodesmium* spp. in the North Pacific Gyre. **Marine Ecology Progress Series**, v. 333, n. August, p. 205–212, 2007.

FIELD, C. et al. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. **sci**, v. 281, p. 237–240, 1998.

GONZÁLEZ, I.; DÉJEAN, S. **CCA: Canonical Correlation Analysis. R package version 1.2.1.**, 2021.

GUIMARÃES, S. C. P.; RÖRIG, L. R. MICRORGANISMOS ASSOCIADOS À FLORAÇÕES DA CIANOBACTÉRIA *Trichodesmium hildebrandtii* NA COSTA DE SANTA CATARINA. **Notas Técnicas Da Facimar**, v. 1, p. 43–47, 1997.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7.**, 2020.

KLAWONN, I. et al. Distinct nitrogen cycling and steep chemical gradients in *Trichodesmium* colonies. **ISME Journal**, v. 14, n. 2, p. 399–412, 2020.

MARINOV, I.; DONEY, S.; LIMA, I. Response of ocean phytoplankton community structure to climate change over the 21st century: Partitioning the effects of nutrients, temperature and light. **Biogeosciences Discussions**, v. 7, 2010.

MENEZES, B. S.; DE MACEDO-SOARES, L. C. P.; FREIRE, A. S. Changes in the

plankton community according to oceanographic variability in a shallow subtropical shelf: SW Atlantic. **Hydrobiologia**, v. 835, n. 1, p. 165–178, jun. 2019.

MILLS, M. M. et al. Iron and phosphorus co-limit nitrogen fixation in the eastern tropical North Atlantic. **Nature**, v. 429, n. 6989, p. 292–294, 2004.

MITRA, A. et al. Defining Planktonic Protist Functional Groups on Mechanisms for Energy and Nutrient Acquisition: Incorporation of Diverse Mixotrophic Strategies. **Protist**, v. 167, n. 2, p. 106–120, 2016.

MÖLLER, O. O. et al. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 13, p. 1607–1624, 2008.

MULHOLLAND, M. R. Mulholland 2007. n. C, p. 1–15, 2007.

O'NEIL, J. M.; METZLER, P. M.; GLIBERT, P. M. Ingestion of  $^{15}\text{N}_2$ -labelled *Trichodesmium* spp. and ammonium regeneration by the harpacticoid copepod *Macrosetella gracilis*. **Marine Biology**, v. 125, n. 1, p. 89–96, 1996.

PEREIRA BRANDINI, F. et al. Deep chlorophyll maximum and plankton community response to oceanic bottom intrusions on the continental shelf in the South Brazilian Bight. **Continental Shelf Research**, v. 89, n. September, p. 61–75, 2014a.

PEREIRA BRANDINI, F. et al. Deep chlorophyll maximum and plankton community response to oceanic bottom intrusions on the continental shelf in the South Brazilian Bight. **Continental Shelf Research**, v. 89, p. 61–75, 2014b.

PIOLA, A. R. et al. Physical Oceanography of the SW Atlantic Shelf: A Review. In: **Plankton Ecology of the Southwestern Atlantic**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 37–56.

PROENÇA, L. A. O.; TAMANAHA; FONSECA, R. Screening the toxicity and toxin content of blooms of the cyanobacterium *Trichodesmium erythraeum* (Ehrenberg) in Northeast Brazil. **Journal of Venomous Animals and Toxins Including Tropical Diseases - J VENOM ANIM TOXINS TROP DIS**, v. 15, 2009.

QGIS ASSOCIATION. QGIS Geographic Information System. 2021.

QU, P. et al. Distinct responses of the nitrogen-fixing marine cyanobacterium *trichodesmium* to a thermally variable environment as a function of phosphorus availability. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, n. JUN, p. 1–15, 2019.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria., 2021.

RAYBAUT, P. Spyder-documentation. **Available online at: [pythonhosted.org](http://pythonhosted.org)**,

2009.

RODRIGUES, S. V et al. Phytoplankton community structures in shelf and oceanic waters off southeast Brazil (20°–25°S), as determined by pigment signatures. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 88, p. 47–62, 2014.

RÖRIG, L. et al. Studies on the ecology and toxicity of *Trichodesmium* spp. Blooms in southern Brazilian coast waters. **Harmful Algae**, v. 1, p. 22–25, 1998.

RÖRIG, L. et al. Phytoplankton Patterns and Processes in a Tropical-Subtropical Transition Region: Santa Catarina Coast, Southern Brazil. In: **Plankton Ecology of the Southwestern Atlantic: From the Subtropical to the Subantarctic Realm**. [s.l: s.n.]. p. 269–288.

SCANLAN, D. J.; POST, A. F. Aspects of Marine Cyanobacterial Nitrogen Physiology and Connection to the Nitrogen Cycle. **Nitrogen in the Marine Environment**, p. 1073–1095, 2008.

SCHETTINI, C. et al. Variabilidade temporal das características oceanográficas e ecológicas da região de influência fluvial do rio Itajaí-Açu. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 9, 2005.

SCHLITZER, R. Ocean Data View. 2018.

SHERIDAN, C. C.; STEINBERG, D. K.; KLING, G. W. The microbial and metazoan community associated with colonies of *Trichodesmium* spp.: A quantitative survey. **Journal of Plankton Research**, v. 24, n. 9, p. 913–922, 2002.

SIQUEIRA, A.; KOLM, H. E.; BRANDINI, F. P. Offshore distribution patterns of the cyanobacterium *Trichodesmium erythraeum ehrenberg* and associated phyto- and bacterioplankton in the southern atlantic coast (Paraná, Brazil). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 49, n. 2, p. 323–337, 2006.

SOHM, J. A.; WEBB, E. A.; CAPONE, D. G. Emerging patterns of marine nitrogen fixation. **Nature Reviews Microbiology**, v. 9, n. 7, p. 499–508, 2011.

TENENBAUM, D. R. Dinoflagelados e Tintínídeos da Região Central da ZEE brasileira. **Série Livros / Documentos REVIZEE Score Central**, v. 15, p. 37, 2006.

TOMAS, C. R. (ED.). Front Matter. In: **Identifying Marine Phytoplankton**. San Diego: Academic Press, 1997. p. iii.

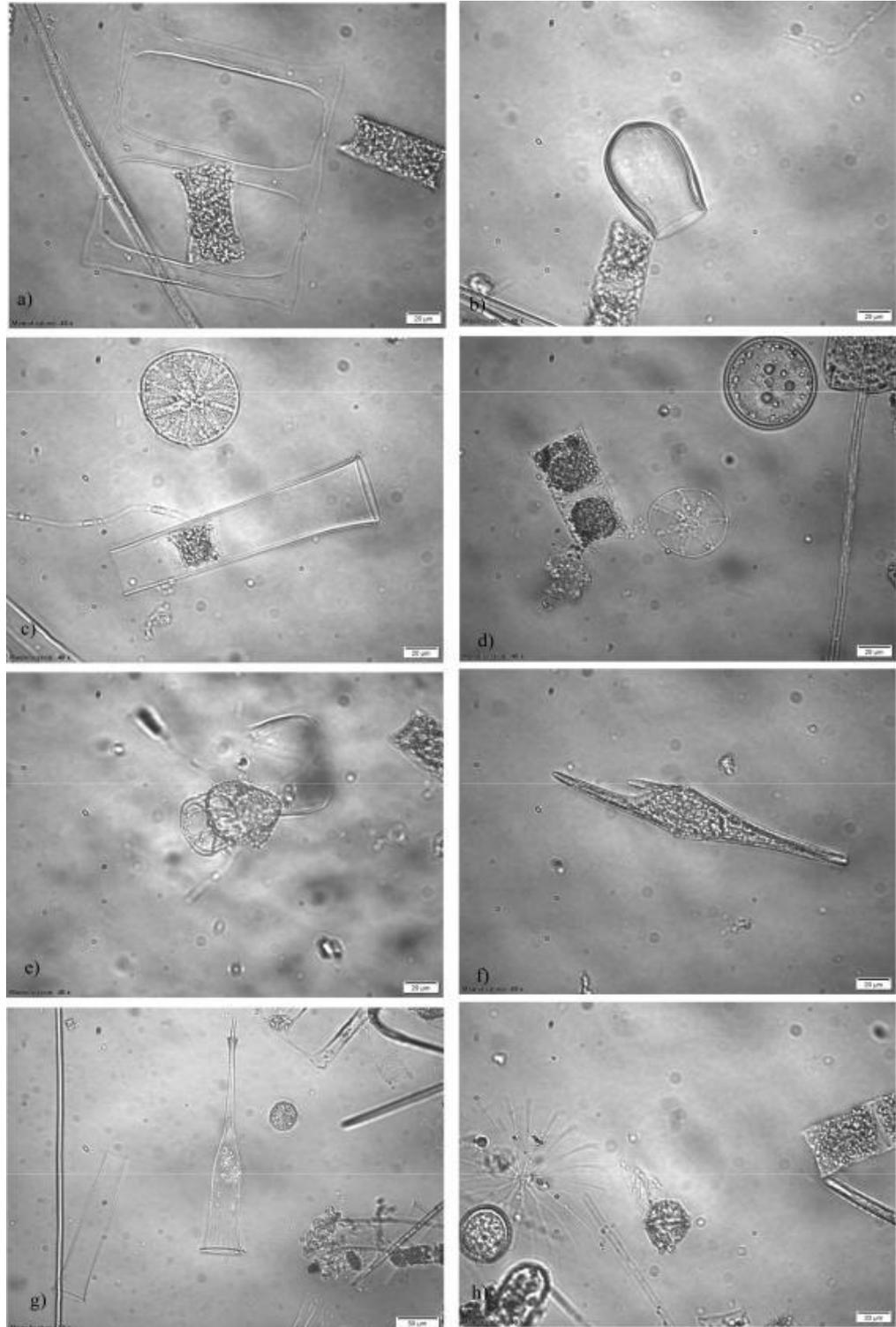
TZUBARI, Y. et al. Iron and phosphorus deprivation induce sociality in the marine bloom-forming cyanobacterium *Trichodesmium*. **The ISME Journal**, v. 12, n. 7, p. 1682–1693, 2018.

UTERMOHL, H. Zur Ver vollkommung der quantitativen phytoplankton-methodik. **Mitteilung Internationale Vereinigung Fuer Theoretische unde Amgewandte Limnologie**, p. 9, 39 p., 1958.

VAN MOOY, B. A. S. et al. Quorum sensing control of phosphorus acquisition in *Trichodesmium* consortia. **ISME Journal**, v. 6, n. 2, p. 422–429, 2012.

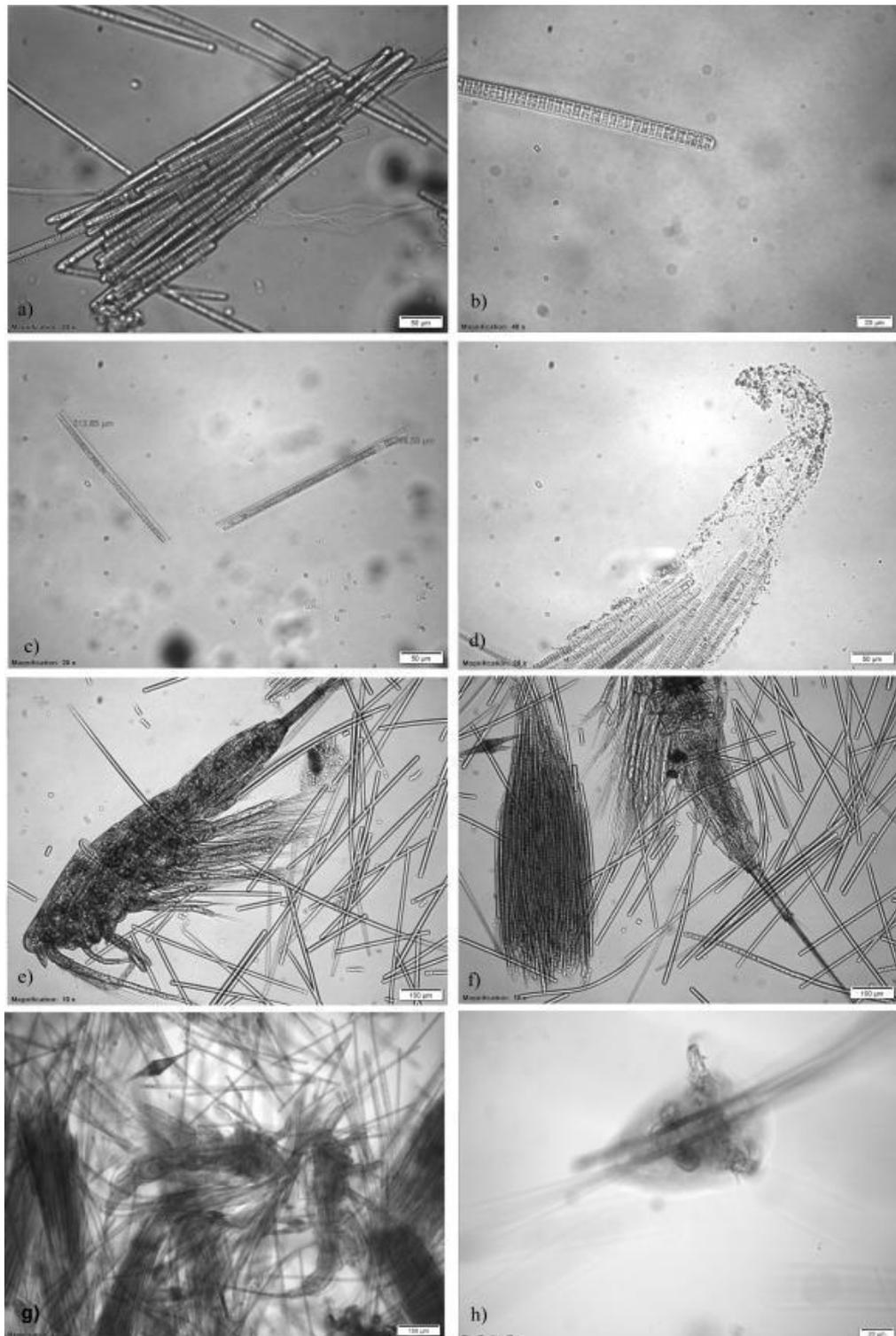
WALWORTH, N. G. et al. Mechanisms of increased *Trichodesmium* fitness under iron and phosphorus co-limitation in the present and future ocean. **Nature Communications**, v. 7, n. May, 2016.

ANEXO A – Fotos (Microscópio OLYMPUS BX53) de diferentes táxons encontrados nas amostras de subsuperfície. a) *Climacodium fraunfeldianum*; b) *Undella claparideii*; c) *Eutintinnus* sp.; d) *Asteromphalus* sp. e *Hemiaulus membranaceus*; e) *Dictyosysta* sp.; f) *Ceratium furca*; g) *Rhabdonellopsis apophysata* e h) *Gonyaulax* sp.



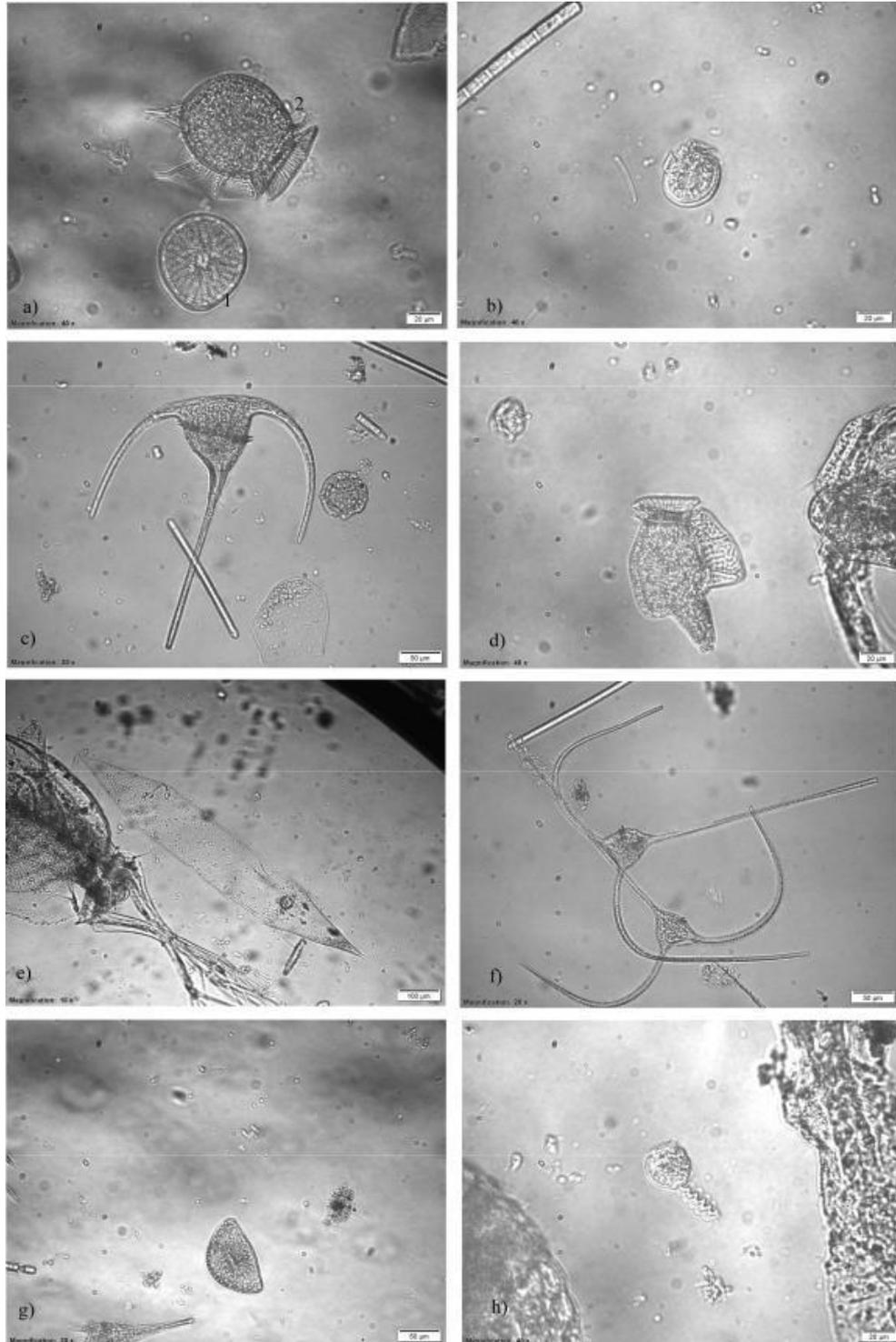
Fonte: a autora (2020)

**ANEXO B – Fotos (Microscópio OLYMPUS BX53) de diferentes táxons encontrados nas amostras de subsuperfície. *Trichodesmium erythraeum*; a) colônia fusiforme; b); c) tricomas livres; d) Colônia fusiforme evidenciando mucilagem; e); f); g) e h) copepoda *Macrosetella Gracilis* em conhecida associação com a floração de *Trichodesmium erythraeum*.**



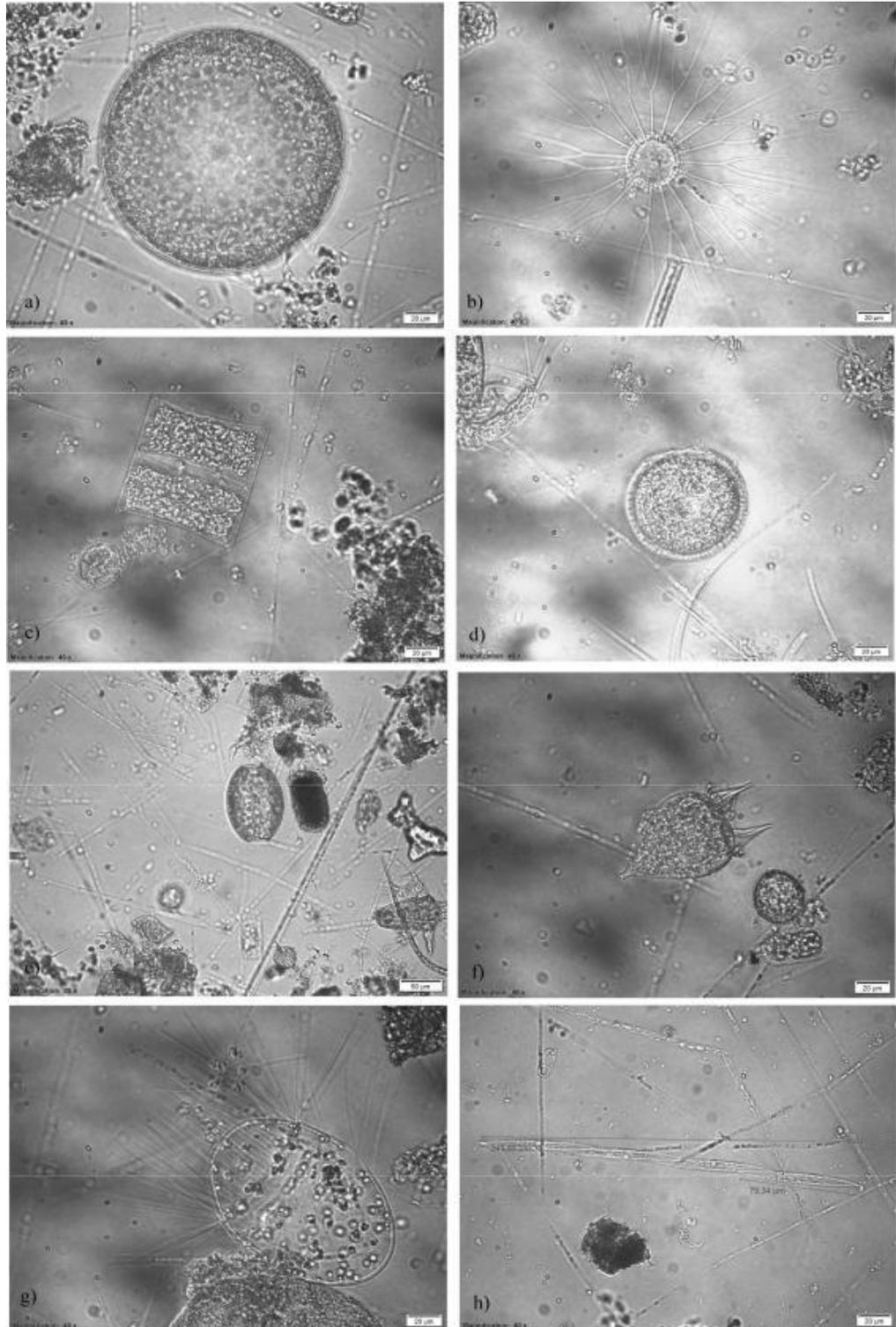
Fonte: a autora (2020)

ANEXO C – Fotos (Microscópio OLYMPUS BX53) de diferentes táxons encontrados nas amostras de subsuperfície. a) 1- *Asteromphalus* sp. e 2- *Dinophysis* sp.; b) *Dinophysis acuminata*; c) *Ceratium tripos*; d) *Dinophysis caudata*; e) *Rhizosolenia* sp; f) *Ceratium trichoceros*; g) *Hemidiscus cuneiformes* e h) associação entre a diatomácea *Chaetoceros coarctatus* e o ciliado *Vorticella oceanica*.



Fonte: a autora (2020)

**ANEXO D – Fotos (Microscópio OLYMPUS BX53) de diferentes táxons encontrados nas amostras de subsuperfície. a) *Coscinodiscus* sp.; b) *Bacteriastrum delicatulum*; c) *Hemiaulus membranaceus*; d) *Diplopelta* sp.; e) *Coscinodiscus* sp. 1; f) *Podolampas bipes*; g) *Corethron* sp.; h) *Pseudo-Nitzschia* sp.**



Fonte: a autora (2020)