

# Aplicabilidade dos índices de diversidade fitoplanctônica e do estado trófico como indicadores do processo de eutrofização nas áreas do braço do Rio Grande e Corpo Central do reservatório Billings

Applicability of phytoplankton diversity and trophic state indices as indicators of the eutrophication process in the areas of the Rio Grande branch and Central Body of the Billings reservoir

Aplicabilidad de los índices de diversidad y estado trófico del fitoplancton como indicadores del proceso de eutrofización en las áreas del brazo del Río Grande y Cuerpo Central del embalse Billings

Recebido: 24/01/2024 | Revisado: 31/01/2024 | Aceitado: 02/02/2024 | Publicado: 05/02/2024

**João Alexandre Saviolo Osti<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2154-2453>  
Universidade Guarulhos, Brasil  
E-mail: [jale.osti@gmail.com](mailto:jale.osti@gmail.com)

**Ana Carolina Peixoto Chamizo<sup>1</sup>**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2088-9834>  
Universidade Guarulhos, Brasil  
E-mail: [carol.peixoto2009@gmail.com](mailto:carol.peixoto2009@gmail.com)

**Matheus Barbosa Herbst de Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1540-2822>  
Instituto de Pesca, APTA, SAA, Brasil  
E-mail: [mbho2458@gmail.com](mailto:mbho2458@gmail.com)

**Clóvis Ferreira do Carmo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0069-5311>  
Instituto de Pesca, APTA, SAA, Brasil  
E-mail: [clovis.carmo@sp.gov.br](mailto:clovis.carmo@sp.gov.br)

**Kayanne Suen Soares Santos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5735-3788>  
Instituto de Pesca, APTA, SAA, Brasil  
E-mail: [kayannesuen@hotmail.com](mailto:kayannesuen@hotmail.com)

**Munique de Almeida Bispo Moraes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1433-2298>  
Instituto de Pesca, APTA, SAA, Brasil  
E-mail: [muniquebio@gmail.com](mailto:muniquebio@gmail.com)

**Cacilda Thais Janson Mercante**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5591-8383>  
Instituto de Pesca, APTA, SAA, Brasil  
E-mail: [cacilda.mercante@sp.gov.br](mailto:cacilda.mercante@sp.gov.br)

## Resumo

A estrutura fitoplanctônica é influenciada por fatores ambientais, ciclos sazonais e grau de trofia do sistema. O objetivo do presente estudo foi identificar como a diversidade de espécies fitoplanctônicas responde à fatores ambientais como a sazonalidade e estado trófico do reservatório Billings, localizado na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Variáveis físico-químicas e biológicas foram analisadas no Corpo Central (CC) e Braço Rio Grande (RG), ao longo de um ciclo sazonal (fevereiro a novembro de 2020; n = 6). A densidade fitoplanctônica foi obtida pela contagem de organismos por mL e os índices de diversidade, riqueza e equitabilidade foram calculados. O cálculo do índice de estado trófico evidenciou gradiente no grau de trofia, sendo RG caracterizado como mesotrófico e CC como eutrófico. A composição fitoplanctônica consistiu em 138 táxons, sendo 34 registrados exclusivamente no CC e 33 registrados somente no RG. A riqueza taxonômica, diversidade e equitabilidade apresentaram pequena variação no CC e RG. A abundância fitoplanctônica variou espacial e temporalmente. As maiores densidades foram registradas no CC, sendo que o grupo de cianobactérias foi o mais representativo (80% de contribuição). No RG, além

---

<sup>1</sup> Mestrado em Análise Ambiental, Universidade Guarulhos, Guarulhos, Brasil

das cianobactérias, foi registrada contribuição das algas verdes e diatomáceas. O fitoplâncton se mostrou sensível como ferramenta para monitorar a dinâmica dos processos de eutrofização e formação de florações de algas e de cianobactérias.

**Palavras-chave:** Bioindicador; Cianobactéria; Diagnóstico ambiental; Eutrofização; Microalgas.

### Abstract

The phytoplankton structure is influenced by environmental factors, seasonal cycles and trophic degree of the system. The objective of the present study was to identify how the diversity of phytoplankton species responds to environmental factors such as the seasonality and the trophic state of the Billings reservoir, located in the Metropolitan Region of São Paulo (RMSP). Physicochemical and biological variables were analyzed in Central Body (CC) and Rio Grande branch (RG), throughout a seasonal cycle (February to November 2020; n = 6). Phytoplankton density was obtained by counting organisms per mL and the diversity, richness and evenness indices were calculated. The calculation of the trophic state index showed a gradient in the trophic degree, with RG being characterized as mesotrophic and CC as eutrophic. The phytoplankton composition consisted of 138 taxa, 34 of which were recorded exclusively in CC and 33 recorded only in RG. Taxonomic richness, diversity and equitability showed small variation in CC and RG. Phytoplankton abundance varied spatially and temporally. The highest densities were recorded in CC, with the cyanobacteria group being the most representative (contribution of 80%). In RG, in addition to cyanobacteria, a contribution from green algae and diatoms was recorded. Phytoplankton proved to be a sensitive tool for monitoring the dynamics of eutrophication processes and the formation of algal and cyanobacterial blooms.

**Keywords:** Bioindicator; Cyanobacteria; Environmental diagnosis; Eutrophication; Microalgae.

### Resumen

La estructura del fitoplancton está influenciada por factores ambientales, ciclos estacionales y el grado de trofeo del sistema. El objetivo del presente estudio fue identificar cómo la diversidad de especies de fitoplancton responde a factores ambientales como la estacionalidad y el estado trófico del embalse Billings, ubicado en la Región Metropolitana de São Paulo (RMSP). Se analizaron variables fisicoquímicas y biológicas en Cuerpo Central (CC) y brazo del Río Grande (RG), a lo largo de un ciclo estacional (febrero a noviembre de 2020; n = 6). La densidad del fitoplancton se obtuvo contando organismos por mL y se calcularon índices de diversidad, riqueza y uniformidad. El cálculo del índice de estado trófico mostró un gradiente en el grado de trofia, caracterizándose RG como mesotrófico y CC como eutrófico. La composición del fitoplancton estuvo compuesta por 138 taxones, 34 de los cuales fueron registrados exclusivamente en el CC y 33 registrados únicamente en el RG. La riqueza taxonómica, la diversidad y la equitabilidad mostraron poca variación en CC y RG. La abundancia de fitoplancton varió espacial y temporalmente. Las mayores densidades se registraron en el CC, siendo el grupo de las cianobacterias el más representativo (80% de contribución). En RG, además de las cianobacterias, se registró el aporte de algas verdes y diatomeas. El fitoplancton demostró ser una herramienta sensible para monitorear la dinámica de los procesos de eutrofización y la formación de floraciones de algas y cianobacterias.

**Palabras clave:** Bioindicador; Cianobacterias; Diagnóstico ambiental; Eutrofización; Microalgas.

## 1. Introdução

Reservatórios, ambientes construídos para produção de energia e abastecimento de água, são sistemas complexos, dinâmicos e sensíveis aos efeitos de atividades antropogênicas. Uma das principais consequências das ações antrópicas na bacia hidrográfica é a ocorrência do processo de eutrofização artificial decorrente do aporte excessivo de nutrientes que desencadeia o crescimento acelerado do fitoplâncton (algas e cianobactérias). Este fato é uma preocupação atual dos gestores, uma vez que a proliferação de algas nocivas pode interferir na qualidade da água e inviabilizar os usos múltiplos do reservatório.

Nos reservatórios, as mudanças na comunidade fitoplanctônica podem ser rápidas, e a distribuição e dinâmica tendem a ser desiguais no espaço, notadamente relacionadas aos processos de uso e ocupação do entorno e do próprio manejo do reservatório, como, por exemplo, o controle do volume. Desta forma, é essencial a utilização de ferramentas apropriadas para rastrear com exatidão as mudanças ambientais na escala espaço-temporal que podem servir na predição de eventos de florações de algas e cianobactérias.

Estudos realizados em reservatórios tropicais e subtropicais demonstraram que a estrutura fitoplanctônica é influenciada por fatores ambientais, ciclos sazonais e estado trófico do sistema (Oliveira et al., 2020; Pineda et al., 2020; Rivera et al., 2022). Para Pineda et al. (2020), mudanças ao longo do tempo são importantes fatores de força em reservatórios,

levando a diminuição da riqueza e a mudança nos grupos funcionais. Já Oliveira et al. (2020) avaliaram a estrutura da comunidade fitoplanctônica em cinco reservatórios do estado de São Paulo, e verificaram que as guildas fitoplanctônicas estiveram associadas a um gradiente de trofia. Resultados semelhantes foram observados por Rivera et al. (2022) em quatro reservatórios localizados na cordilheira oriental da Colômbia, onde os autores atribuem as alterações registradas nos gêneros fitoplanctônicos às diferenças nos graus de trofia dos reservatórios.

A comunidade fitoplanctônica é formada por um diversificado grupo de algas e cianobactérias e é amplamente utilizada no biomonitoramento dos ambientes aquáticos (CETESB, 2021; Dochin, 2023), uma vez que é um bom indicador da qualidade da água, pois apresenta um ciclo de vida curto (2 a 3 dias) e responde rapidamente às mínimas alterações nos ambientes aquáticos através da modificação na estrutura de sua comunidade (Rosini et al., 2016). Variações na distribuição e dinâmica dessa comunidade refletem o funcionamento dos ecossistemas aquáticos e implicam em mudanças na estrutura trófica, nos processos de eutrofização, na formação de florações de algas e cianobactérias potencialmente tóxicas, na dinâmica de fluxos energéticos destes ambientes e, conseqüentemente, afetam o crescimento, desenvolvimento, sobrevivência e reprodução de muitos organismos aquáticos (Sonobe et al., 2019; Oliveira et al., 2020; Pineda et al., 2020, b; Qin et al., 2023). Desta forma, um delineamento amostral que associe análises taxonômicas e ecológicas em ambientes aquáticos pode garantir a ampliação e a melhor qualificação de informações sobre parâmetros ecológicos das comunidades aquáticas (Bicudo et al., 1995), notadamente para reservatórios de usos múltiplos.

O índice de estado trófico pode ser uma ferramenta muito útil para gestores de reservatórios, pois permite uma rápida medição do estado do sistema. Complementarmente, a estrutura da comunidade fitoplanctônica tem sido utilizada como um importante discriminante ambiental em reservatórios. Entretanto, a principal dificuldade na utilização da comunidade fitoplanctônica é a falta de conhecimento sobre a relação entre o ambiente aquático e o fitoplâncton, além do conhecimento limitado sobre a taxonomia dos grupos fitoplanctônicos. Considerando este contexto, é fundamental o desenvolvimento de estudos relacionados à estrutura da comunidade fitoplanctônica e sua relação com a trofia de reservatórios, notadamente para aqueles localizados próximos aos grandes centros urbanos, como é o caso do reservatório Billings.

Considerando que a comunidade fitoplanctônica tem grande importância ecológica nos ecossistemas aquáticos e que a heterogeneidade espacial é um fator determinante para a distribuição, estrutura e funcionamento das comunidades aquáticas, buscamos avaliar como a comunidade fitoplanctônica responde às características de qualidade da água de reservatórios de usos múltiplos. A hipótese que norteia a pesquisa é que há heterogeneidade espaço-horizontal de algas e cianobactérias planctônicas em reservatórios com diferentes graus de trofia. Assim, o objetivo do presente estudo foi identificar como a diversidade de espécies fitoplanctônicas responde à fatores ambientais como a sazonalidade e o estado trófico do reservatório Billings, localizado na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

## **2. Metodologia**

### **2.1 Área de estudo**

O intenso crescimento da população, a alta demanda e os diferentes usos dados aos recursos hídricos têm colocado em risco a disponibilidade hídrica, tanto em quantidade quanto em qualidade, especialmente nos grandes centros urbanos, como é o caso da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A RMSP é o mais populoso aglomerado urbano do país e um dos cinco maiores do Mundo. Com população acima de 21 milhões de habitantes, apresenta consumo de água de aproximadamente  $69 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e tem sete vezes menos água por habitante do que a ONU considera como crítico (Whately & Diniz, 2009; ANA, 2010; IBGE, 2022).

A maior bacia hidrográfica da região é a Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BAT). Coincidindo com 70% do território da RMSP, a BAT é caracterizada por densidades demográficas e taxas de urbanização elevadas (FABHAT, 2018). A bacia

abrange a porção leste do rio Tietê, com nascentes no Parque Ecológico Nascentes do Tietê, no município de Salesópolis, seguindo a direção geral Leste-Oeste até atingir a Barragem de Rasgão, em Pirapora do Bom Jesus. Dentre os diversos reservatórios da bacia, temos o reservatório Billings, inserido no Sistema Produtor Alto Tietê (SPAT) e localizado na porção sudeste da Região Metropolitana de São Paulo, que possui uma lâmina de água de aproximadamente 108 km<sup>2</sup> e colabora com 7,7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> de água para atender 2,3 milhões de municípios de Cotia, Embu, Itapeverica da Serra, São Paulo, e Taboão da Serra (braço Taquacetuba), e Diadema, Santo André e São Bernardo do Campo (braço Rio Grande), conforme citado por ANA (2021).

A bacia hidrográfica da Billings é protegida pela Lei 13.579, de 13 de julho de 2009 e suas alterações, que define a Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais da Bacia Hidrográfica da Billings (APRM-B) (São Paulo, 2009). Dentre seus diversos objetivos, o principal é o desenvolvimento sustentável da bacia.

Atualmente, o Reservatório Billings apresenta múltiplos usos como regulação do nível do rio Pinheiros por transposição de água para controle de inundações, diluição de efluentes, pesca profissional e artesanal, abastecimento público de água e lazer (Carmo & Tagnin, 2001; Penteado et al., 2017). Entretanto, devido ao uso e ocupação irregular no entorno de sua bacia hidrográfica, o reservatório vem sofrendo um processo contínuo de degradação com ocorrências de florações de algas e cianobactérias, que podem contaminar as águas com suas toxinas, causando riscos à saúde humana.

No presente estudo, foram realizadas coletas em duas estações amostrais localizadas no Reservatório Billings que apresentam diferenças quanto aos usos preponderantes (Figura 1 e 2), sendo eles: 1) Rio Grande (RG) - estação amostral próxima à captação de água pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), localizado no Braço Rio Grande (RG). Este braço faz parte do Sistema Produtor Rio Grande, formado pelo Ribeirão da Estiva e Rio Grande, responsável por cerca de 6% do abastecimento de água da face leste da RMSP (SABESP, 2023); 2) Corpo Central (CC) – estação amostral no corpo central do reservatório Billings, sendo que este local está isolado do Braço Rio Grande pelo dique da Via Anchieta (SABESP, 2023).

A escolha da área de estudo se deteve aos usos múltiplos das estações amostrais que fazem parte do reservatório Billings, e por estes apresentarem diferentes graus de trofia, além da facilidade de acesso. A Figura 1 contém a vista área de parte do reservatório Billings e a indicação das estações amostrais e na Figura 2 são apresentadas imagens das duas estações amostrais (RG e CC) no reservatório Billings.

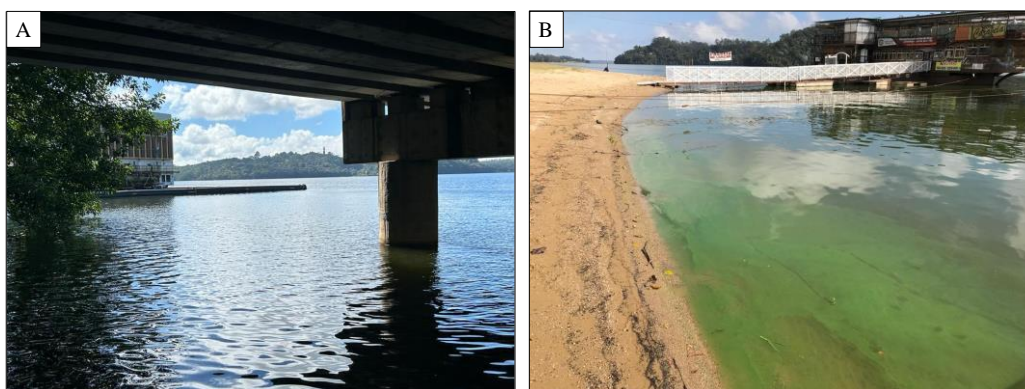


**Figura 1** - Imagem vista de satélite das duas estações amostrais localizadas em diferentes regiões do reservatório Billings, São Bernardo do Campo (SP). Sendo: estação RG = Rio Grande; estação CC = Corpo Central. A seta indica o local aproximado das amostragens.



Fonte: Adaptado de *Google Earth Pro* (2023).

**Figura 2** - Vista parcial das estações de coleta localizadas no reservatório Billings, São Bernardo do Campo (SP). Legenda: A = braço Rio Grande; B = Corpo Central (prainha do Riacho Grande).



Fonte: Autores (2020).

## 2.2 Análises das variáveis ambientais e cálculo do índice de estado trófico

Trata-se de uma pesquisa de campo de natureza quali-quantitativa, para Pereira et al. (2018) essa metodologia é empregada nas várias áreas do saber e visam o melhor entendimento sobre um fenômeno com auxílio de técnicas matemáticas. No presente estudo, campanhas amostrais foram realizadas nos meses de março, maio, junho, agosto, setembro e novembro de 2020 ( $n = 6$ ), perfazendo um ciclo sazonal completo, em duas estações de coleta (Figuras 1 e 2). Amostras de água foram coletadas na subsuperfície da coluna d'água com auxílio de balde metálico, transportadas e acondicionadas em frascos próprios seguindo os procedimentos do Guia de Coleta e Preservação de Amostras, disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (CETESB, 2011).

*In situ*, com auxílio de sonda multiparâmetros (marca Horiba – modelo U-50), foram determinados os valores das variáveis temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ), oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ), condutividade elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), turbidez (UNT), sólidos

dissolvidos totais ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e pH. Amostras de 1,0 L de água foram coletadas para determinação das concentrações dos nutrientes e da biomassa fitoplanctônica em laboratório.

No laboratório foi realizada determinação da estimativa da biomassa fitoplanctônica foi realizada por meio da concentração de clorofila *a*, para tanto as amostras foram filtradas utilizando-se filtros de microfibras de vidro (AP 20) de 47 mm de diâmetro. Os filtros foram envoltos em papel alumínio e estocados em freezer até a análise em laboratório. A extração por meio do etanol como solvente, bem como a análise, seguiu a técnica proposta por Marker et al. (1980) e Santory e Grobellar (1984). As análises para determinação das concentrações de fósforo total ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) e nitrogênio total ( $\text{mg L}^{-1}$ ) foram realizadas segundo metodologia descrita por Valderrama (1981).

A partir dos resultados de fósforo total e clorofila *a* foi calculado o Índice de Estado Trófico (IET) de Carlson (1977) adaptado por Lamparelli (2004) para ambientes lênticos. O referido índice é recomendado pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2013) e utilizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a avaliação da trofia dos corpos hídricos do Estado de São Paulo (CETESB, 2021).

### 2.3 Estrutura da comunidade fitoplanctônica

Amostras para as análises qualitativas da comunidade fitoplanctônica foram obtidas usando rede de plâncton de 20  $\mu\text{m}$  ( $n = 6$ ) e preservadas em solução de formaldeído a 4%. Os táxons foram identificados em microscópio de luz padrão (Olympus BX51), respaldado por bibliografia especializada. O sistema de classificação adotado para o nível de classe foi o de Wehr e Sheath (2003) e Bicudo e Menezes (2017).

As amostras para as análises quantitativas ( $n = 6$ ) do fitoplâncton foram fixadas em solução de Lugol a 1%. Populações de fitoplâncton foram contadas em campos aleatórios usando a técnica de sedimentação (Utermöhl, 1958) em microscópio invertido LEICA DMIL (640 x), em câmara de sedimentação de 2 e 10 mL. O tempo de sedimentação foi de 3 h  $\text{cm}^{-1}$  (Lund et al., 1958). O limite de contagem foi estabelecido através da curva de rarefação de espécies até atingir 100 indivíduos (células, colônias, cenóbios e filamentos) das espécies mais comuns. Os resultados foram expressos em densidade ( $\text{org. mL}^{-1}$ ).

A partir dos resultados de densidade ( $\text{org. mL}^{-1}$ ) do fitoplâncton foram calculados os seguintes atributos:

- **Riqueza (R):** foi considerado o número total de táxons encontrados por amostra.
- **Índice de Diversidade (H') (bits  $\text{ind}^{-1}$ ):** estimado pelo índice de Shannon & Weaver (1963).
- **Índice de Equitabilidade (E')**: avaliado de acordo com Lloyd & Ghelardi (1964).

### 2.4 Análise dos dados

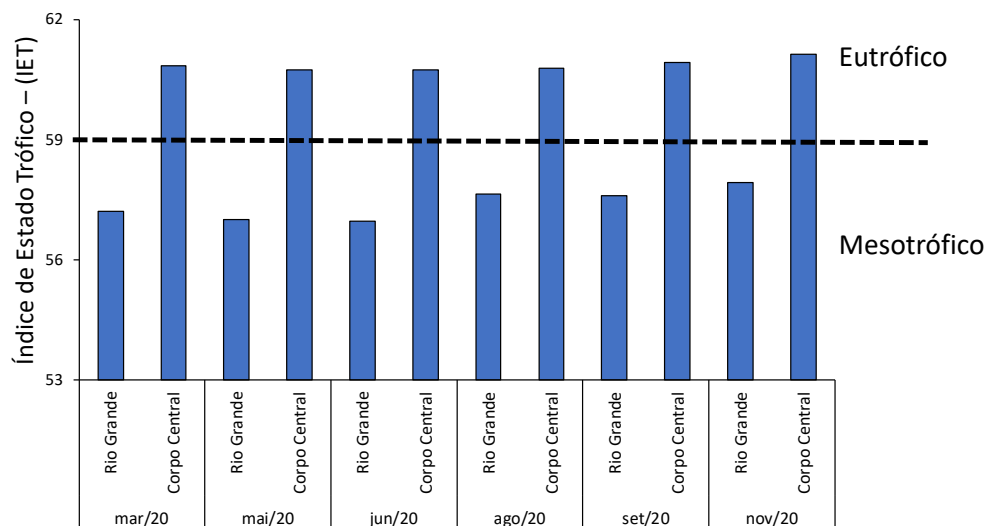
Os resultados das variáveis ambientais foram analisados por meio de estatística descritiva, utilizando média aritmética como medida de tendência central e desvio padrão (DP) como medida do grau de dispersão absoluta dos dados. A análise de variância One-way (ANOVA) ( $p < 0,05$ ) foi aplicada às variáveis ambientais para testar diferenças significativas entre as médias das estações amostrais e, quando foram encontradas diferenças significativas entre as médias, foi aplicado o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). A análise foi realizada no software estatístico Past 4.01.

Para a análise da variabilidade ambiental dos dados bióticos em relação aos meses de estudo (temporal) e aos diferentes pontos de amostragem (espacial), foi realizada análise de similaridade através do Programa PC-ORD versão 6.0 para Windows (McCune & Mefford, 2011), o algoritmo utilizado foi o de Grupos Pareados (UPGMA) e o índice de similaridade utilizado foi o de Jaccard.

### 3. Resultados e Discussão

Na Figura 3 apresentamos os valores médios do Índice de Estado Trófico (IET) para os ambientes estudados, ao longo de um ciclo sazonal completo. Os reservatórios estudados apresentaram diferenças quanto ao grau de trofia (Figura 3). O Braço do Rio Grande (RG) foi classificado como mesotrófico ao longo de todo o período de estudo, apresentando concentrações médias de fósforo total de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ , enquanto o Corpo Central (CC), classificado como eutrófico, evidenciou concentrações de fósforo total duas vezes mais elevadas do que o RG. A separação das características da qualidade da água nos diferentes compartimentos do sistema Billings foi também observada por Cardoso-Silva et al. (2014). Os referidos autores relacionaram a mesotrofia no braço do Rio Grande às atividades desenvolvidas no entorno do reservatório e do constante uso de algicidas. No caso do Corpo Central, classificado como eutrófico, o aporte de fósforo advém da contribuição de córregos localizados à montante com lançamento de esgotos sem tratamento (Araújo et al., 2018). Estas observações indicam a vulnerabilidade que os reservatórios próximos aos grandes centros urbanos podem sofrer com aportes de cargas difusas e pontuais advindas das atividades antrópicas (Santos et al., 2018).

**Figura 3** - Índice de Estado Trófico (IET) de acordo com o Índice de Carlson (1977), adaptado por Lamparelli (2004), para o reservatório Billings no Braço Rio Grande e Corpo Central, ao longo de um ciclo sazonal completo (n = 6).

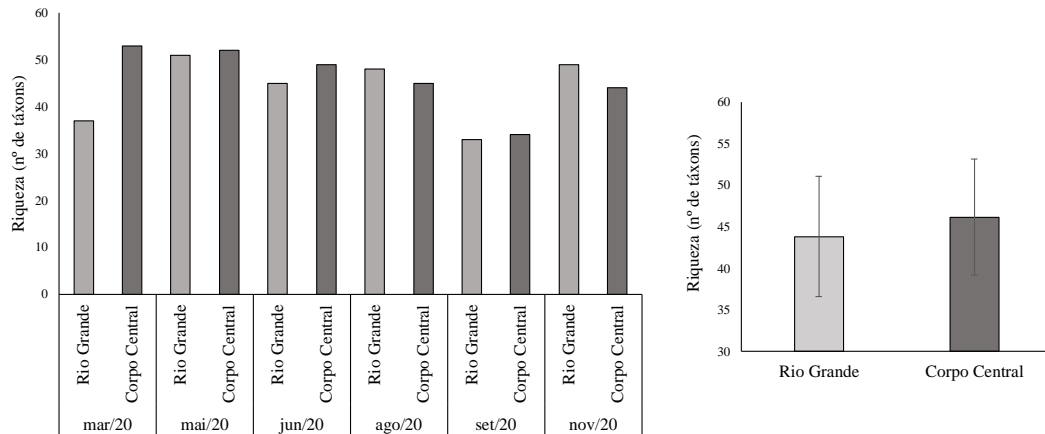


Fonte: Autores (2023).

Embora as duas estações amostrais sejam próximas, ambas estão isoladas pelo dique da Via Anchieta que tem por objetivo preservar a qualidade da água do braço Rio Grande para o abastecimento público (Pompêo et al., 2015), sendo que o maior grau de trofia observado no Corpo Central está relacionado às atividades do entorno, como consequência da intensa ocupação irregular nas décadas de 1960 e 1980, falta de planejamento urbano, saneamento básico precário, descarte inadequado de lixo e perda de cobertura vegetal (Cardoso-Silva et al., 2014; Abreu & Cunha, 2017; Araújo et al., 2018; Lobo et al., 2021).

Com relação à diversidade fitoplanctônica, foram identificados 138 táxons de microalgas e cianobactérias, sendo 33 táxons registrados exclusivamente em RG e 34 táxons registrados somente em CC. A Figura 4 mostra o número de táxons registrados por estação amostral e ao longo do estudo, importante observar a baixa variação na riqueza de espécies entre as estações amostrais, sendo ligeiramente maior ao final do período chuvoso para o Corpo Central (março, maio e junho) e no período seco e início do período chuvoso para o braço Rio Grande.

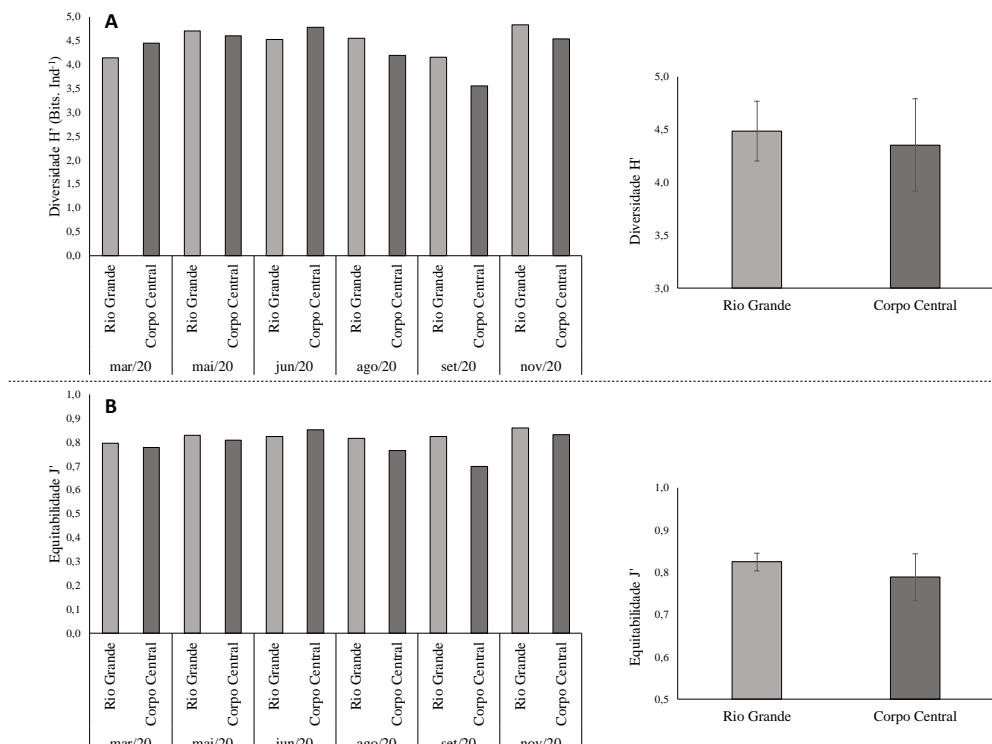
**Figura 4** - Variação temporal e espacial da riqueza fitoplanctônica (número de táxons) no reservatório Billings (Braço Rio Grande e Corpo Central), ao longo de um ciclo sazonal completo (n = 6).



Fonte: Autores (2023).

Na Figura 5 é apresentado os índices de diversidade do fitoplâncton. O Índice de Diversidade de Shannon ( $H'$ ) foi aplicado aos valores de densidade e varia entre 0 (zero) e 5 (cinco), sendo que valores próximos a cinco representam maior diversidade, já o Índice de Equitabilidade ( $J'$ ) varia entre 0 (zero) e 1 (um), onde valores próximos a um representam que as espécies são igualmente abundantes. A diversidade e equitabilidade de espécies também não apresentaram elevada amplitude entre os ambientes estudados e ao longo do período de estudo (Figura 5). Os maiores valores médios de diversidade e equitatividade foram registrados no RG ( $H'$   $4,49 \pm 0,28$  bits ind<sup>-1</sup> e  $J'$  0,82) quando comparados com os resultados registrados para CC ( $H'$   $4,35 \pm 0,44$  bits ind<sup>-1</sup> e  $J'$  0,79).

**Figura 5** - Valores dos índices de diversidade de espécies (bits ind<sup>-1</sup>) (A) e equitabilidade (B) com base na densidade fitoplanctônicas no reservatório Billings (Braço Rio Grande e Corpo Central), ao longo de um ciclo sazonal completo (n = 6).

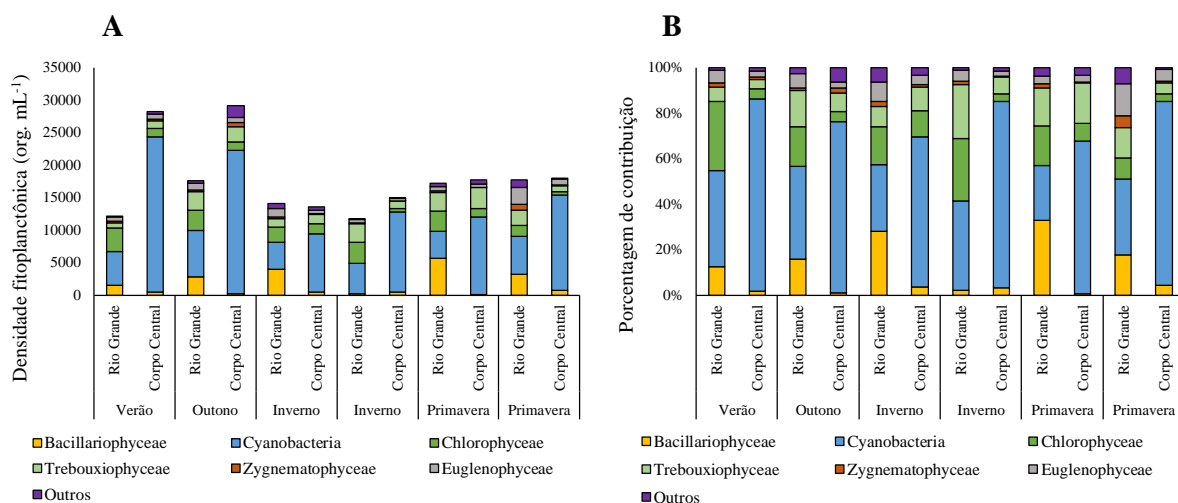


Fonte: Autores (2023).



Os valores da densidade fitoplanctônica (abundância) é apresentada na Figura 6. A abundância fitoplanctônica variou entre as estações de amostragem (espacial-horizontal) e ao longo do período de estudo (temporal). As maiores densidades fitoplanctônicas foram registradas no Corpo Central do reservatório Billings, notadamente em março e maio (período de verão e primavera, respectivamente), quando a densidade esteve próxima aos 30.000 org. mL<sup>-1</sup> (Figura 6a). Nesta estação amostral, o grupo formado pelas cianobactérias contribuiu com cerca de 80% na estrutura da comunidade fitoplanctônica, formado por gêneros de cianobactérias potencialmente causadoras de florações tóxicas, como *Aphanizomenon*, *Cuspidothrix*, *Dolichospermum* e *Raphidiopsis* (Figura 6b). No braço Rio Grande, a densidade máxima foi cerca de 18.000 org. mL<sup>-1</sup>, registrados no outono e primavera (Figura 6a), sendo que além das cianobactérias, também foram registradas as contribuições das algas verdes (Chlorophyceae e Trebouxiophyceae) e das diatomáceas (Figura 6b).

**Figura 6** - Variação espacial e temporal da densidade fitoplanctônica (A) e da porcentagem de contribuição (B) no reservatório Billings (Braço Rio Grande e Corpo Central), ao longo de um ciclo sazonal completo (n = 6). (Outros = Cryptophyceae; Chrysophyceae; Xanthophyceae e Dinophyceae).



Fonte: Autores (2023).

A presença de Cyanobacteria nos ambientes aquáticos se relaciona à períodos com temperaturas elevadas e maior disponibilidade de nutrientes e podem se agregar em colônias esféricas, ovoides ou filamentosas e se distribuem ao longo da coluna d'água, de acordo com a disponibilidade de luz (Chorus & Bartram, 1999). A ocorrência sazonal de cianobactérias foi relatada em outros estudos (Sherman et al., 1998; Figueredo & Giani, 2001; Gomes et al., 2012; Loza et al., 2014).

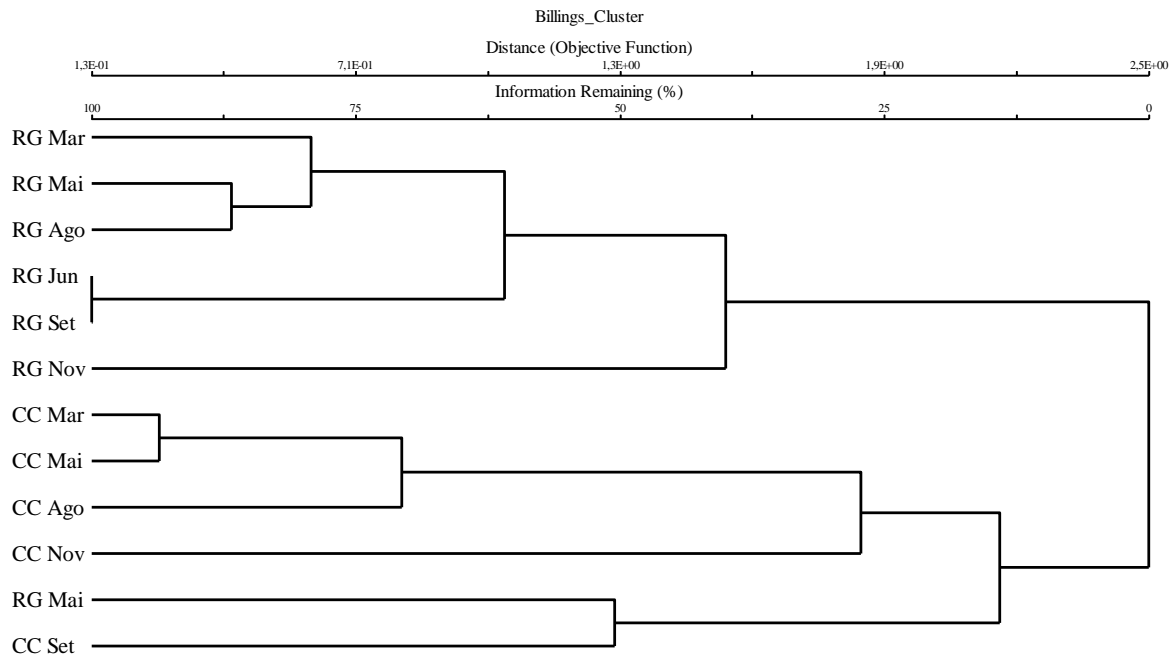
A densidade de cianobactérias no braço Rio Grande variou entre 4.160 e 7.258 org. mL<sup>-1</sup>, e no Corpo Central entre 8.955 e 23.918 org. mL<sup>-1</sup>. As densidades observadas no Corpo Central se mostram de importância sanitária, e implica em possíveis restrições quando considerado os diferentes usos ao que reservatório está submetido.

A análise de agrupamento aplicada à abundância fitoplanctônica mostrou a formação de dois grupos de reservatórios (Figura 7). O primeiro formado pelas amostras relacionadas ao braço Rio Grande, com a exceção da coletada realizada em maio que esteve associada ao segundo grupo. Neste grupo, a similaridade entre o período amostrado foi elevada, acima de 60%. O segundo grupo foi formado por amostras coletadas no Corpo Central com mais de 75% de similaridade. O coeficiente cofenético de 0,861 mostrou que o agrupamento foi consistente.

A entrada de nutrientes, a morfologia dos reservatórios e a dinâmica sazonal, podem provocar uma série de alterações na estrutura da comunidade fitoplanctônica (Henry et al., 2006, Reynolds, 2006). A comunidade fitoplanctônica parece responder a estes filtros ambientais observados entre os reservatórios. Os grupos formados por meio da análise de similaridade

demonstraram que a estrutura da comunidade fitoplanctônica respondeu às diferenças no grau de trofia entre as estações amostrais, mesotrófico para RG e eutrófico para CC (Figura 7).

**Figura 7** - Dendrograma de similaridade da composição da comunidade fitoplanctônica no reservatório Billings (Braço Rio Grande e Corpo Central), ao longo de um ciclo sazonal completo (n = 6).



Fonte: Autores (2023).

#### 4. Conclusão

Reservatórios urbanos situados em locais densamente povoados sofrem todo tipo de aporte e interferência antrópica devido às diferentes atividades que ocorrem na sua microbacia, como é o caso do reservatório Billings. Por essa razão, a comunidade fitoplanctônica se mostrou como excelente indicador ambiental da qualidade da água do reservatório Billings. É nítida a elevada porcentagem de contribuição do grupo Cyanobacteria, tanto em relação às amostragens temporais (sazonais) quanto às horizontais em ambos os locais de coleta, o mesmo ocorrendo para as suas densidades. Os índices de diversidade e equitabilidade corroboram esta conclusão. A presença das cianobactérias em elevada densidade refletiu as condições de eutrofia e hipertrofia do Corpo Central, com exceção da região do braço do Rio Grande, classificado como mesotrófico, onde a presença de clorófitas e diatomáceas também foram observadas no período de estudo. Portanto, os índices de diversidade fitoplanctônica e do estado trófico foram excelentes indicadores do processo de eutrofização, podendo contribuir nas tomadas de decisão relacionadas à gestão desse importante reservatório, respondendo às alterações ambientais, notadamente ao aporte excessivo do elemento fósforo. Como medida preventiva às possíveis alterações na qualidade da água advinda das mudanças climáticas e de eventos extremos que poderão intensificar o processo de eutrofização em reservatórios, sugere-se que estudos futuros abordem a comunidade fitoplanctônica como sentinela desses eventos.

Reservatórios inseridos próximos a grandes centros urbanos, como é o caso do reservatório Billings, mesmo sofrendo com a poluição de suas águas evidenciou ser importante local de diversidade fitoplanctônica com representatividade de diferentes grupos e espécies sendo essa biodiversidade de extrema importância para propostas de preservação e conservação de ecossistemas urbanos. Visto que a caracterização ambiental refletiu os diferentes usos a que são submetidos esse local, e por isso sugerimos intensificar estudos para avaliar a integridade desses ecossistemas em um transecto horizontal e temporal,

considerando sua biodiversidade e sua relação com o uso e ocupação da terra o que tornaria mais robusta as tomadas de decisão relacionadas à gestão desse recurso hídrico.

## Agradecimentos

Ao Instituto de Pesca pela disponibilização de toda infraestrutura e à Danish Agency for Science and Higher Education pela cooperação internacional (Dinamarca-Brasil). Chamizo, A. C. P. agradece à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de Mestrado.

## Referências

- Abreu, C. H. M. & Cunha, A. C. (2017). Qualidade da água e índice trófico em rio de ecossistema tropical sob impacto ambiental. *Engenharia sanitária e Ambiental*, 22, 45-56.
- ANA – Agência Nacional das Águas. (2010). *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água*. <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/RegiaoMetropolitana.aspx?rme=24>
- ANA – Agência Nacional das Águas. (2013). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília.
- ANA – Agência Nacional das Águas. (2021). *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água*. <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/RegiaoMetropolitana.aspx?rme=24>
- Araújo, P. L. (2018). Relação entre a qualidade da água e o uso do solo em microbacias do reservatório Billings, na Região Metropolitana de São Paulo-SP. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 15.
- Bicudo, C.E.M. & Menezes, M. (2017). *Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições*. (3a ed.), RiMa.
- Bicudo, D. C., Necchi, O. & Chamixaes, C. B. C. B. (1995). *Periphyton studies in Brazil: present status and perspectives*. In: Tundisi, J. G., Bicudo, C. E. M. & Matsumura-Tundisi, T. (Ed.). *Limnology in Brazil*. ABC/SBL, 37-58.
- Cardoso-Silva, S., Nishimura, P. Y., Padiál, P. R., Mariani, C. F., Moschini-Carlos, V. & Pompêo, M. L. M. (2014). Compartmentalização e qualidade da água: o caso da Represa Billings. *Bioikos*, 28 (1).
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369.
- Carmo, R. L. & Tagnin, R. (2001). *Uso múltiplo da água e múltiplos conflitos em contextos urbanos: o caso do Reservatório Billings*. In: Hogan, D. J., Carmo, R. L., Cunha, J. M. P. & Baeninger, R. (Org.). *Migração e ambiente nas aglomerações urbanas*. Campinas: Núcleo de Estudos de População/UNICAMP, 421-4441.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2011). *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos* - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Organizadores: Carlos Jesus Brandão et al. São Paulo: CETESB, Brasília: ANA, 326 p.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2021). *Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo*. <http://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>
- Chorus, I. & Bartram, J. (1999). *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. Londres: E & FN Spon, 400p.
- Dochin, K. (2023). Using phytoplankton as a tool for evaluating changes in the ecological status of two Bulgarian reservoirs (2020-2021). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 29 (2).
- FABHAT – Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. (2018). *Relatório de situação dos Recursos Hídricos 2019: Bacia Hidrográfica Alto Tietê UGRHI 06 - Ano base 2018*. <https://comiteat.sp.gov.br/wp-content/uploads/2020/03/Relat%C3%B3rio-de-Situa%C3%A7%C3%A3o-Bacia-do-Alto-Tiet%C3%AA.pdf>
- Figueredo, C. C. & Giani, A. (2001). A seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 445, 165-174.
- Gomes, L. N. L., Oliveira, S. M. A. C., Giani, A. & Von Sperling, E. (2012). Association between biotic and abiotic parameters and the occurrence of cyanobacteria in a Brazilian reservoir. *Environmental monitoring and assessment*, 184, 4635-4645.
- Henry, R., Ushinohama, É. & Ferreira, R. M. (2006). Fitoplâncton em três lagoas marginais ao Rio Paranapanema e em sua desembocadura no Reservatório de Jurumirim (São Paulo, Brasil) durante um período prolongado de seca. *Brazilian Journal of Botany*, 29, 399-414.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Panorama – São Paulo*. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>
- Lamparelli, M. C. (2004). *Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento*. Tese de Doutorado: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo – Departamento de Ecologia, São Paulo, 238p.

- Lloyd, M. & Ghelardi, R. J. (1964). A Table for Calculating the "Equitability" Component of Species Diversity. *Journal of Animal Ecology*, 33, 217-225.
- Lobo, F. D. L., Nagel, G. W., Maciel, D. A., Carvalho, L. A. S. D., Martins, V. S., Barbosa, C. C. F. & Novo, E. M. L. D. M. (2021). AlgaeMAP: Algae bloom monitoring application for inland waters in Latin America. *Remote Sensing*, 13 (15), 2874.
- Loza, V., Perona, E. & Mateo, P. (2014). Specific responses to nitrogen and phosphorus enrichment in cyanobacteria: factors influencing changes in species dominance along eutrophic gradients. *Water Research*, 48, 622-631.
- Lund, J. W. G., Kipling, C. & Lecren, E. D. (1958). The invert microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting. *Hydrobiologia*, 1986 (11), 143-170.
- Marker, A. F. H., Nusch, E. A., Rai, H. & Riemann, B. (1980). The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods: conclusions and recommendations. *Archiv für Hydrobiologie*, 14, 91-106.
- McCune, B. & Mefford, M. J. (2011). *PC-ORD: Multivariate analysis of Ecological Data*. Version 6.0 for Windows.
- Oliveira, S. A. D., Ferragut, C. & Bicudo, C. E. M. (2020). Relationship between phytoplankton structure and environmental variables in tropical reservoirs with different trophic states. *Acta Botanica Brasílica*, 34, 83-93.
- Penteado, C. L. C., Almeida, D. L. & Benassi, R. F. (2017). Conflitos hídricos na gestão dos reservatórios Billings e Barra Bonita. *Estudos Avançados*, 31 (89), 299-322.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. UFSM.
- Pineda, A., Iatskiu, P., Jati, S., Paula, A. C. M., Zanco, B. F., Bonecker, C. C., Moresco, G. A., Ortega, L. A., Souza, Y. R. & Rodrigues, L. C. (2020). Damming reduced the functional richness and caused the shift to a new functional state of the phytoplankton in a subtropical region. *Hydrobiologia*, 847, 3857-3875.
- Pompêo, M., Cardoso-Silva, S. & Moschini-Carlos, V. (2015). Rede independente de monitoramento da qualidade da água de reservatórios eutrofizados: uma proposta. In: Pompêo, M., Moschini-Carlos, V., Nishimura, P. Y., Silva, S. C. & Doval, J. C. L. (Org.). Ecologia de reservatórios e interfaces. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (IB/USP), 396-410.
- Qin, M., Fan, P., Li, Y., Wang, H., Wang, W., Liu, H., Messyasz, B., Goldyn, R. & Li, B. (2023). Assessing the ecosystem health of large drinking-water reservoirs based on the phytoplankton index of biotic integrity (P-IBI): a case study of Danjiangkou Reservoir. *Sustainability*, 15 (6), 5282.
- Reynolds, C. S. (2006). *Ecology of Phytoplankton*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Rivera, C. A., Zapata, A., Villamil, W. & León-López, N. (2022). Trophic assessment of four tropical reservoirs using phytoplankton genera. *Acta Limnológica Brasiliensis*, 34.
- Rosini, E. F., Tucci, A., Carmo, C. F., Rojas, N. E. T., Barros, H. P. & Mallasen, M. (2016). Changes in phytoplankton spatial and temporal dynamics in a Brazilian tropical oligotrophic reservoir after net cage installation. *Brazilian Journal of Botany*, 39(2), 569-581.
- Santos, L. G., Machado, L. S., Carlos, V. M. & Pompêo, M. (2018). Os grupos funcionais fitoplanctônicos nos reservatórios do Sistema Cantareira, São Paulo, Brasil. *Iheringia*, 73(2), 135-145.
- SÃO PAULO – Governo do Estado de São Paulo. (2009). *Lei 13.579, de 13 de julho de 2009 – Define a Área de Proteção dos Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings – APRM-B, e dá providências correlatas*. Assembléia Legislativa do Estado de São Paulo. <http://www.al.sp.gov.br/repositorio-legislacao/lei/2009/lei-13579-13.07.2009.html>
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. (2023). *Dados dos Sistemas Produtores*. <https://mananciais.sabesp.com.br/HistoricoSistemas?SistemaId=1>
- Sartory, D. P. & Grobbelaar, J. U. (1984). Extraction of chlorophyll *a* from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis. *Hydrobiologia*, 114, 177-187.
- Shannon, C. E. & Weaver, W. W. (1963). *The mathematical theory of communications*. Urbana: University of Illinois Press, 117p.
- Sherman, B. S., Webster, I. T., Jones, G. J. & Oliver, R. L. (1998). Transitions between *Aulacoseira* and *Anabaena* dominance in a turbid river weir pool. *Limnology and Oceanography*, 43, 1902-1915.
- Sonobe, H. G., Lamparelli, M. C. & Cunha, D. G. F. (2019). Avaliação espacial e temporal de aspectos sanitários de reservatórios com captação de água para abastecimento em SP com ênfase em cianobactérias e cianotoxinas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24, 909-918.
- Utermöhl, H. (1958). Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Mitteilungen*, 9(1), 1-38.
- Valderrama, J. C. (1981). The simultaneous analysis of nitrogen and phosphorus total in natural waters. *Marine Chemistry*, 10, 109-122.
- Wehr, J. D. & Sheth, R. G. (2003). *Freshwater algae of north America: Ecology and classification*. San Diego: Academic, 897p.
- Whately, M. & Diniz, L. T. (2009). *Água e esgoto na grande São Paulo: situação atual, nova lei de saneamento e programas governamentais propostos*. São Paulo: Instituto Socioambiental.