

LEONARDO TRISTÃO SILVA

Variação espacial da biomassa e estrutura da comunidade algal no epipélon ao longo de um gradiente de profundidade em dois reservatórios de diferentes trofias

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Ambientais, da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE em BIODIVERSIDADE VEGETAL E MEIO AMBIENTE, na Área de Concentração de Plantas Avasculares e Fungos em Análises Ambientais).

SÃO PAULO

2023

LEONARDO TRISTÃO SILVA

Variação espacial da biomassa e estrutura da comunidade algal no epipélon ao longo de um gradiente de profundidade em dois reservatórios de diferentes trofias

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Ambientais, da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE em BIODIVERSIDADE VEGETAL E MEIO AMBIENTE, na Área de Concentração de Plantas Avasculares e Fungos em Análises Ambientais).

ORIENTADORA: DRA. CARLA FERRAGUT

Ficha Catalográfica elaborada pelo **NÚCLEO DE BIBLIOTECAS E MAPOTECAS**

Silva, Leonardo Tristão
S586v Variação espacial da biomassa e estrutura da comunidade algal no epípelon ao longo de um gradiente de profundidade em dois reservatórios de diferentes trofias / Leonardo Tristão Silva - - São Paulo, 2023.
67p.; il.

Dissertação (Mestrado) -- Instituto de Pesquisas Ambientais da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística, 2023.
Bibliografia.

1. Algas epípelicas. 2. Ambiente bentônico. 3. Reservatório supereutrófico e mesotrófico. I. Título.

CDU: 582.26

BANCA EXAMINADORA

Dr. Carla Ferragut (Orientador)

Dra. Gisele Carolina Marquardt

Dra. Karine Borges Machado

*À minha família e amigos, por todo
amor, carinho e incentivo.*

Dedico.

*Esforça-te, e tem bom ânimo;
não te atemorizes, nem te
espantes; porque o Senhor teu
Deus está contigo, por onde
quer que andares.*

Josué 1:9

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma colaboraram para a realização desse estudo e fizeram com que fosse possível a realização dessa dissertação.

À Dra. Carla Ferragut, pela oportunidade para realização desse trabalho, pela sua orientação, pela paciência e conselhos dados. Por ajudar nos momentos de dificuldade, e me mostrar a melhor forma de enfrentar todas as barreiras e obstáculos que enfrentei, pelos ensinamentos tanto na parte laboratorial como na parte de desenvolvimento da escrita e estatísticas. Obrigado por me orientar e me ensinar tanto com tanta dedicação, por confiar que eu seria capaz para realização desse trabalho.

À Dra. Denise Bicudo, pelos ensinamentos durante suas disciplinas, onde guardo com carinho quando eu ainda era da iniciação científica e durante sua disciplina me ensinou minuciosamente como entender e “ler” uma PCA, entre outros ensinamentos não menos importantes, agradeço a contribuição durante o exame de qualificação.

Dr. João Alexandre Saviolo e a Dra. Gisele Carolina Marquardt pelas contribuições no exame de qualificação, as colocações foram valiosas e muito importante para melhorar e organizar os dados desse estudo.

Ao Dr. Carlos Eduardo de Mattos Bicudo, pelos ensinamentos sobre taxonomia e suas grandes histórias durante as disciplinas, pelas grandes publicações e acervos que foram de grande valor na realização da taxonomia desse trabalho. Fico imensamente grato em ter conhecido e aprendido muito com um dos grandes nomes Botânica e da Limnologia no Brasil.

Ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente pela realização do presente estudo, pelo acolhimento e pelas disciplinas oferecidas que foram muito importantes para meu aperfeiçoamento profissional e para a realização dessa dissertação.

Ao Instituto de Pesquisas Ambientais da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, pela infraestrutura disponibilizada, auxílio nas coletas e uso irrestrito do laboratório e equipamentos do Núcleo de Pesquisas em Ecologia.

À Estação Meteorológica do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, por fornecer os dados climatológicos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida durante todo o período para o desenvolvimento deste trabalho.

À todos os amigos que fiz durante todo o período de desenvolvimento do meu mestrado, ficarei eternamente grato a todos.

Ao Ruan de Oliveira Carneiro, um irmão que a faculdade me deu e eu espero levar para o resto da minha vida, que me ensinou muito e me apresentou a limnologia, me indicando para uma bolsa de iniciação científica com a Dra. Carla Ferragut. Pelos conselhos, ensinamentos e ajuda durante todo o período de análises e coletas deste estudo.

À Renata Costa, pela grande amizade que criamos, pela dupla no laboratório durante as análises, pelas risadas e conversas durante todo o período deste trabalho. Obrigado pelos conselhos e conversas, por toda ajuda durante as coletas e análises, por me incentivar sempre em almejar coisas maiores, e mesmo quando eu não estava bem, não me deixava desanimar, fazendo piadas e brincadeiras. Sou grato pelo companheirismo e carinho que criamos durante esses anos.

À Simone pela amizade e pelos ensinamentos na parte laboratorial, que foi essencial para meu desenvolvimento no laboratório, minha imensa gratidão. À Leticia Sapucaia pela companhia e conversas durante o período de contagem, e por toda ajuda, sou muito grato pela nossa amizade. À Darah, Gabriela, Leonardo, Alex e Matheus, pela amizade, pelas conversas e risadas que deixavam o dia mais leve, e pela ajuda sempre que necessário.

À Dina e a Marli pela ajuda nos dias de análises laboratoriais e na lavagem de vidrarias, durante todos os dias.

Ao Chico, que guiava o motor nos dias de coletas e sempre que precisávamos de alguma ajuda ele estava disposto a ajudar, sem medir esforços.

À minha mãe Nurunihar Silvia, pela guerreira que é, sempre me incentivando e me motivando para seguir meu sonho de ser biólogo, que não mediu esforços para que eu pudesse realizar esse sonho, e mesmo quando eu não acreditava em mim e não acreditava mais que seria capaz de realizá-lo, ela não deixava acreditar e me incentivou a não desistir dele, e que apesar das circunstâncias nunca deixou faltar nada, sou grato por todo carinho e amor que me deu.

Ao meu pai Pedro Bernardo, pelas sabias palavras e conselhos, pelas longas conversas, para que eu não desanimasse de tudo que eu lutei e conquistei durante esses anos.

À minha sobrinha Maria Eduarda, que é a alegria do meu dia e faz com que eu me dedique mais para que eu possa servir como inspiração para ela algum dia de algum modo.

À minha irmã Thyssiane, por mostrar, mesmo que indiretamente, o orgulho que tem do que eu me tornei e por ser minha irmã mais velha.

Às minhas vózinhas, que eu sei que lá de cima estão olhando por mim e muito felizes e orgulhosas da pessoa que eu me tornei.

Ao meu amigo e irmão Matheus Campanelli Mussolin, que quando em vida, sempre me dava conselhos e me contagiava com sua alegria e seu jeito alegre de ser, sou eternamente grato por sua amizade e ter conhecido ele.

Resumo

A maioria dos estudos limnológicos aborda a zona pelágica e raramente considera a magnitude ou variabilidade das mudanças fitobentônicas. O presente estudo avaliou as mudanças da biomassa e estrutura da comunidade de algas e cianobactérias no epipélon ao longo de um gradiente de profundidade em reservatório raso mesotrófico e supereutrófico. Este estudo identificou a zona bêmica de maior biomassa e riqueza de algas epipélicas. A amostragem foi realizada no período de estratificação (verão) e em triplicata, incluindo 6 profundidades (0,5 m; 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m; 2,5 m; 3,0 m) no reservatório mesotrófico e 9 profundidades (0,5 m; 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m; 2,5 m; 3,0 m; 3,5m; 4m e 4,5m) no reservatório eutrófico. No reservatório mesotrófico, evidenciou-se uma maior atenuação da luz e concentração de fósforo total nos pontos de maior profundidade (3 m). Em relação ao epipélon, maior biomassa e riqueza de espécies foi encontrada em 1,5 m de profundidade, enquanto os maiores valores de massa seca livre de cinzas ocorreram nos pontos mais profundos (2,5m e 3m). Foram encontradas um total de 65 espécies de algas epipélicas. *Oedogonium* sp. e *Pinnularia viridis* foram as espécies maior contribuição para o biovolume total. O epipélon apresentou a maior biomassa da comunidade de algas e cianobactérias nas profundidades mais rasas (0,5m e 1m), constituindo-se como a zona bêmica de maior produção de biomassa no reservatório mesotrófico. No reservatório supereutrófico a maior disponibilidade de luz, fósforo total e CO₂ livre foi observada nas profundidades mais rasas (0,5m e 1 m). Encontrou-se um total de 51 espécies de algas e cianobactérias epipélicas. A *Fragilaria* sp.1, *Microcystis aeruginosa* e a *Pinnularia nobilis* var. *regularis* foram as espécies com maior contribuição para biomassa total nas diferentes profundidades. No epipélon, os maiores valores de clorofila-a foram observados nas profundidades mais rasas (0,5 m e 1 m), enquanto os maiores valores de biomassa foram observados em 1 m e 3 m, sendo a zona bentônica de maior produção de biomassa. Apesar das diferenças na zanação do epipélon nos reservatórios de diferentes trofias, alguns aspectos foram semelhantes, como a influência da atenuação de luz sobre a variação do epipélon no gradiente de profundidade. Assim, a luz foi um fator determinante para o crescimento da comunidade epipélica e pode ser um fator limitante para a comunidade, independentemente da trofia. Em conclusão, as mudanças na biomassa e a estrutura do epipélon foram associadas ao gradiente de profundidade, que determinou a disponibilidade de luz e nutrientes para comunidade no reservatório mesotrófico e no reservatório supereutrófico.

Palavras-chave: algas epipélicas, ambiente bentônico, fatores ambientais, zanação, reservatório supereutrófico e mesotrófico.

Abstract

Most limnological studies address the pelagic zone and rarely consider the magnitude or variability of phytobenthic changes. The present study evaluated changes in biomass and community structure of algae and cyanobacteria in the epipelon in a depth gradient in a shallow mesotrophic and supereutrophic reservoirs. This study identified the benthic zone with the highest biomass and richness of epipellic algae. Sampling was carried out during the stratification period (summer) and in triplicate, including six depths (0.5 m; 1.0 m; 1.5 m; 2.0 m; 2.5 m; 3.0 m) in the mesotrophic reservoir and nine depths (0.5 m; 1.0 m; 1.5 m; 2.0 m; 2.5 m; 3.0 m; 3.5 m; 4 m and 4.5 m) in the eutrophic reservoir. Higher light attenuation and total phosphorus concentration were found at the 3 m in mesotrophic reservoir. Concerning the epipelon, greater biomass and species richness were found at 1.5 m depth, while the highest values of ash-free dry mass occurred at the deepest points (2.5 m and 3 m). A total of 65 species of epipellic algae were found in mesotrophic reservoir. *Oedogonium* sp. and *Pinnularia viridis* were the species that contributed most to the total biovolume. The epipelon presented the highest biomass of the algae and cyanobacteria at the shallowest depths (0.5m and 1m), constituting the benthic zone with the high biomass production in the mesotrophic reservoir. In the supereutrophic reservoir, the higher availability of light, total phosphorus, and free CO₂ was observed at the shallowest depths (0.5 m and 1 m). A total of 51 epipellic algae and cyanobacteria species were found in the eutrophic reservoir. *Fragilaria* sp.1, *Microcystis aeruginosa* and *Pinnularia nobilis* var. *regularis* were the species with the higher contribution to total biomass at different depths. In the epipelon, the highest chlorophyll-a values were observed at the shallowest depths (0.5 m and 1 m), and the highest biomass values were observed at 1 m and 3 m, which was the benthic zone with the higher biomass production. Despite the differences in epipelon zonation in reservoirs of different trophic states, some aspects were similar, such as the influence of light attenuation on the epipelon variation in the depth gradient. Thus, the light was a determining factor for the epipelon growth and could be a limiting factor for the community, regardless of trophy. In conclusion, changes in biomass and structure in the epipelon were associated with the depth gradient, which determined the light and nutrient availability for the community in the mesotrophic and supereutrophic reservoirs.

Keywords: epipellic algae, phytobenthos, benthic environment, environmental factors, zonation, supereutrophic and mesotrophic reservoir

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa batimétrico do reservatório das Ninfêias e Mapa mostrando os pontos de amostragem distribuídos no gradiente de profundidade.....	7
Figura 2: Mapa batimétrico do reservatório das Garças e mapa mostrando os pontos de amostragem distribuídos no gradiente de profundidade.....	8
Figura 3: PCA das variáveis limnológicas das diferentes profundidades no reservatório supereutrófico estudado.....	18
Figura 4: Variação dos valores médios e desvio padrão da concentração de clorofila-a, massa seca livre de cinzas e biomassa total de algas e cianobactérias do epipélon no reservatório mesotrófico.....	20
Figura 5: Variação dos valores médios e desvio padrão da densidade total, riqueza de espécies, diversidade e equitatividade do epipélon no reservatório mesotrófico.....	21
Figura 6: Biomassa total relativa das espécies descritoras de algas e cianobactérias epipélicas no reservatório mesotrófico.....	22
Figura 7: RDA do biovolume das espécies de algas e cianobactérias descritoras do epipélon e variáveis ambientais nas profundidades amostradas no reservatório mesotrófico estudado.....	24
Figura 8: PCA das variáveis limnológicas das diferentes profundidades no reservatório supereutrófico.....	29
Figura 9: Variação dos valores médios e desvio padrão da clorofila-a, massa seca livre de cinzas e biomassa total do epipélon no gradiente de profundidade de um reservatório supereutrófico.....	30
Figura 10: Variação dos valores médios e desvio padrão da densidade total, riqueza de espécies, diversidade e equitatividade do epipélon no gradiente de profundidade de um reservatório supereutrófico.....	32
Figura 11: Biomassa relativa das espécies descritoras de algas e cianobactérias do epipélon no gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico.....	33
Figura 12: RDA da biomassa das espécies de algas descritoras do epipélon e variáveis ambientais no gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico.....	35
Figura 13. Mapas dos reservatórios supereutrófico e mesotrófico com os valores de biomassa total de algas e cianobactérias nos pontos de amostragem georreferenciados.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão (D.P.) da temperatura do ar (°C), velocidade do vento (km/h) e precipitação pluviométrica (mm) no mês da amostragem (março/2022)	6
Tabela 2: Valores médios e desvio padrão das variáveis limnológicas (n=3) no gradiente de profundidade no reservatório das Ninfeias (21/03/2022)	15
Tabela 3. Valores médios e desvio padrão das variáveis limnológicas (n=3) no gradiente de profundidade no reservatório mesotrófico	16
Tabela 4. Resultados da one-way ANOVA dos dados abióticos da superfície da água no gradiente de profundidade no reservatório mesotrófico	16
Tabela 5. Correlação de Pearson do biovolume das algas epipéllicas (r) com os eixos 1 e 2 da RDA e seus respectivos códigos do reservatório mesotrófico	25
Tabela 6. Valores médios e desvio padrão das variáveis limnológicas (n=3) no gradiente de profundidade no reservatório das Garças (22/03/2022)	27
Tabela 7. Valores médios e desvio padrão das variáveis limnológicas (n=3) no gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico	28
Tabela 8. Resultados da one-way ANOVA dos dados abióticos da superfície da água no gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico	28
Tabela 9. Correlação de Pearson do biovolume das algas epipéllicas (r) com os eixos 1 e 2 da RDA e seus respectivos códigos no reservatório supereutrófico	36

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Material e Métodos	5
2.1. Área de estudo	5
2.2. Delineamento amostral	9
2.3. Variáveis climáticas analisadas	10
2.4. Variáveis ambientais analisadas	10
2.5. Atributos do epipélon analisados	11
2.6. Tratamento estatístico	12
3. Resultados	13
3.1. Reservatório mesotrófico	13
3.1.1. Variáveis abióticas	13
3.1.2. Epipélon	19
3.2. Reservatório supereutrófico	26
3.2.1. Variáveis abióticas	26
3.2.2. Epipélon	30
4. Discussão	39
Referências bibliográficas	48

1. Introdução

Os ecossistemas aquáticos de água doce são constituídos principalmente por rios, riachos, lagos e reservatórios, dentre os quais, os lagos e reservatórios rasos são ecossistemas predominantes em nível mundial (Wetzel 1990; Downing et al. 2006). Lagos e reservatórios rasos, são os mais vulneráveis à eutrofização, em razão da interação que ocorre do sedimento com a coluna d'água, que dificulta os processos de restauração dos ecossistemas aquáticos (Søndegaard et al. 2003, Bicudo et al. 2007).

Os reservatórios e lagos mesotróficos são corpos d'água com um nível moderado de nutrientes, o que resulta em uma comunidade algal diversificada e relativamente equilibrada (Wetzel, 2001). Esse tipo de lago é considerado um dos mais saudáveis e produtivos, pois possui uma ampla variedade de organismos aquáticos, como peixes, crustáceos e outros invertebrados (Dodds, 2006). A comunidade algal em um lago mesotrófico é composta por uma mistura de algas verdes, diatomáceas, cianobactérias e outras espécies de algas (Smith, 2003). Os lagos eutróficos são ambientes aquáticos caracterizados por altas concentrações de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, que resultam em um crescimento excessivo de algas, cianobactérias e plantas aquáticas (Schindler, 2012). A sobrecarga de nutrientes é proveniente principalmente de atividades humanas, como a agricultura intensiva, a urbanização e o lançamento de esgotos sem tratamento adequado (Smith, 2003). Essa condição pode causar o crescimento excessivo de algas, tornando a água turva e prejudicando a sua qualidade, além de afetar negativamente a biodiversidade e a função ecológica do ecossistema (Smith, 2003). O crescimento excessivo do fitoplâncton em um lago supereutrófico pode afetar negativamente o ambiente bentônico, pois a floração do fitoplâncton pode sombrear os sedimentos, reduzindo a penetração de luz solar necessária para a realização da fotossíntese pelos organismos (Bottrell et al., 1991; Smith, 2003). A eutrofização pode comprometer a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos (Bicudo et al., 2002, Binzer et al. 2014).

Epipélon é a comunidade de organismos que habita a superfície dos sedimentos aquáticos e se desenvolve em estreita relação com o ambiente circundante (Wetzel, 2001). A comunidade possui uma diversidade de algas que permite com que a comunidade desempenhe diversas funções ecológicas (Wetzel, 2001) e atue no funcionamento dos ecossistemas aquáticos, principalmente nos sistemas rasos (Woodruff et al. 1999; Bartoli et al. 2003; Spears et al. 2006). É uma comunidade formada principalmente por microalgas, bactérias, protozoários e fungos. O epipélon é um dos principais produtores primários em ambientes aquáticos, servindo de fonte de alimento para invertebrados bentônicos aquáticos (Liboriussen et al. 2005; Vadeboncoeur et al. 2001), sendo um elo entre as teias tróficas do ambiente bentônico e pelágico (Vadeboncoeur et al. 2002). Além disso, a diversidade de algas epipélicas permite que a comunidade desempenhe diversas funções ecológicas (Wetzel, 2001), como por exemplo, atuar no funcionamento dos ecossistemas aquáticos, principalmente nos sistemas rasos (Woodruff et al. 1999; Bartoli et al. 2003; Spears et al. 2006), na ciclagem de nutrientes e no controle da liberação de fósforo e nitrogênio da zona de mineralização do sedimento para coluna de água (Wetzel 2001; Jansson 1980; Dodds 2003). O epipélon pode conferir estabilidade física ao sedimento e, conseqüentemente, reduzir a taxa de ressuspensão (Cano et al. 2016).

O equilíbrio das comunidades bentônicas, como a do epipélon, pode ser afetado por diversos fatores ambientais, os quais podem influenciar a estrutura da comunidade, como a disponibilidade de luz e nutrientes, temperatura e grau de perturbação (Pouličková et al. 2014; Vadeboncoeur et al. 2014). Lagos e reservatórios rasos mesotróficos, geralmente, possuem elevada abundância de macrófitas (Janssen et al. 2020), as quais podem afetar a disponibilidade de luz para o epipélon (Santos et al. 2020). A quantidade total de radiação fotossintética ativa (PAR) disponível para as algas bentônicas é uma função combinada entre a profundidade do lago e a cobertura de macrófitas (Squires et al. 2009). Estudo em um lago mesotrófico temperado mostrou que variação sazonal da cobertura de macrófitas está correlacionada com a variação da biomassa algal no epipelon (Aberle & Wiltshire 2006). Além disso, a dinâmica da

comunidade do epipélon também é influenciada por mudanças sazonais na disponibilidade de nutrientes em lagos mesotróficos (Liu et al., 2016; Santos et al. 2020). Os estudos citados destacam a importância do epipélon em lagos mesotróficos e, ressaltam o papel da comunidade na avaliação da qualidade da água e na saúde do ecossistema aquático.

O desempenho das funções do epipélon pode variar em função da profundidade do ecossistema (Spears et al. 2010, Vadeboncoeur et al. 2014). A profundidade é um fator chave para o crescimento do epipélon, pois pode determinar a intensidade da luz, a disponibilidade de nutrientes e o regime de perturbação que atua sobre a comunidade (Vadeboncoeur et al. 2014). Assim, a variação da profundidade pode influenciar o acúmulo de biomassa e a composição de espécies do epipélon (Spears et al. 2010). Embora os fatores que influenciam a abundância do epipélon sejam conhecidos, a variação da biomassa, diversidade e composição taxonômica do epipélon é ainda pouco conhecida em nível mundial (Lami et al. 2009; Kingsbury et al. 2012; Cano et al. 2016).

Diversos estudos têm sido realizados para investigar o epipélon em diferentes tipos ecossistemas lacustres (Pouličková et al. 2014; Cano et al. 2016), incluindo os lagos da área de estudo (Tavares et al. 2019; Santos et al. 2020; Costa & Ferragut 2023; Carneiro & Ferragut 2022). No reservatório das Garças (supereutrófico), estudos experimentais anteriores envolvendo o epipélon evidenciaram que técnicas de restauração de sistemas eutrofizados, como o uso de floculante, de macrófitas ou biorreator do perifíton, podem contribuir para o aumento da biomassa do epipélon (Costa & Ferragut 2023; Carneiro & Ferragut 2022). Amaral et al. (2020) evidenciaram que a oligotrofização obteve um efeito positivo sobre o crescimento do epipélon. Portanto, as mudanças na estrutura da comunidade algal no epipélon em função da profundidade são praticamente desconhecidas no reservatório estudado. Em lagos e reservatórios supereutróficos, o crescimento excessivo de fitoplâncton pode afetar negativamente o crescimento e a diversidade da comunidade epipélica (Vadeboncoeur et al. 2003). Por outro lado, em lagos mesotróficos, o crescimento excessivo de macrófitas aquáticas

pode influenciar o crescimento da comunidade epipélica e reduzir sua contribuição para produção primária. O reservatório das Ninfas (mesotrófico) possui elevada riqueza de espécies de algas no plâncton, epifíton e epipélon, como foi demonstrado em estudos anteriores (Fonseca & Bicudo 2011; Santos & Ferragut, 2019, Tavares et al. 2019). O estudo do epipélon em diferentes trofias é importante para a compreensão da dinâmica de ambientes aquáticos. Além disso, é essencial conduzir pesquisas no ambiente bentônico para compreender os processos que regem os ecossistemas e elaborar estratégias de gestão e conservação mais eficazes.

Considerando a influência da profundidade no crescimento do epipélon (Vadeboncoeur et al. 2014), este estudo avaliou os fatores ambientais determinantes da variação espacial da biomassa (clorofila-a, massa seca livre de cinzas e biomassa total) e estrutura (composição de espécies, densidade e biovolume algas e cianobactérias) do epipélon ao longo de um gradiente de profundidade em reservatório mesotrófico e supereutrófico. Este estudo visa responder as seguintes perguntas: i) Há uma zona bética de maior produção de biomassa no reservatório? ii) Há uma variação espacial da riqueza e diversidade de espécies? iii) A estrutura da comunidade de algas e cianobactérias epipélicas está organizada em função da profundidade e em zonas? iv) Quais variáveis são determinantes da distribuição espacial das espécies descritoras do epipélon? v) A trofia tem influência sob a distribuição espacial do epipélon? De acordo com Andersen et al. (2020), a identificação de zonas bentônicas mais produtivas em lagos e reservatórios permite quantificar a produção e os processos do ecossistema e, assim, possibilitar o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de gestão dos ecossistemas lacustres.

2. Material e métodos

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado no reservatório mesotrófico (Lago das Ninfas) e supereutrófico (Lago das Garças), ambos localizados no PEFI - Parque Estadual das Fontes do Ipiranga na região metropolitana da cidade de São Paulo. O PEFI constitui-se em uma grande área verde com vegetação natural (Mata Atlântica). Situa-se na região sudeste da cidade e apresenta uma área total de 526,38 ha e altitude média de 798 m (Bicudo et al. 2002).

O reservatório das Ninfas (23°38'18,95" S e 46°37'16,3" W) possui uma superfície com área de 5.433 m², um volume de 7.170 m³, uma profundidade média de 1,3 m, profundidade máxima de 3,6 m e tempo médio de residência de 7 dias. A imagem de satélite do reservatório e o mapa batimétrico com a localização dos pontos de amostragem encontram-se na Figuras 1A-B. O reservatório das Ninfas é um reservatório mesotrófico pequeno raso e artificial formado pelo barramento do córrego Pirarungua com finalidade paisagística e apresenta extensa região litorânea com uma flora diversa de macrófitas aquáticas (Bicudo et al. 2002) com abundância de *Nymphaea* spp. e *Utricularia foliosa* L. (Santos et al. 2019).

O reservatório das Garças (23°38'18,95" S e 46°37'16,3" W) apresenta uma área de 88.156 m², uma profundidade máxima e média de 4,7 m e 2,14 m, respectivamente, com tempo médio de residência de 68 dias. A imagem de satélite do reservatório e o mapa batimétrico com a localização dos pontos de amostragem encontram-se na Figuras 2A-B. Segundo Costa-Böddeker et al. (2012), a barragem do campanário foi dividido em cinco corpos d'água em 1917 e o reservatório das Garças era o sistema principal e em 1958 iniciou-se processo de eutrofização com a entrada de esgoto não tratado do zoológico e da Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo em 1975. O grande aumento nos nutrientes como fósforo e nitrogênio neste reservatório acarretou a proliferação de macrófitas, que ocuparam 40-70% da superfície da água e em 1999 foi ordenada a remoção dessa macrófitas do reservatório e, assim, estado

trófico do reservatório passou de eutrófico para hipereutrófico com florações permanentes de cianobactérias (Bicudo et al.2007). Após algumas intervenções, o reservatório foi classificado como supereutrófico a partir de 2011 (Bicudo et al. 2020).

Conforme Conti & Furlan (2003), o clima é tropical de altitude, que é caracterizado pelo verão quente e chuvoso e inverno frio e seco. Os dados climáticos do mês de amostragem (21 e 23 de março de 2022) encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão (D.P.) da temperatura do ar (°C), velocidade do vento (km/h) e precipitação pluviométrica (mm) no mês da amostragem (março/2022).

Valores	Temperatura do ar (°C)	Velocidade do vento (km/h)	Precipitação Pluviométrica (mm)
Mínimo	18,3	0	0,0
Máximo	29,4	17	40,7
Média	22,4	5,0	8,9
D.P.	1,1	1,1	12,8

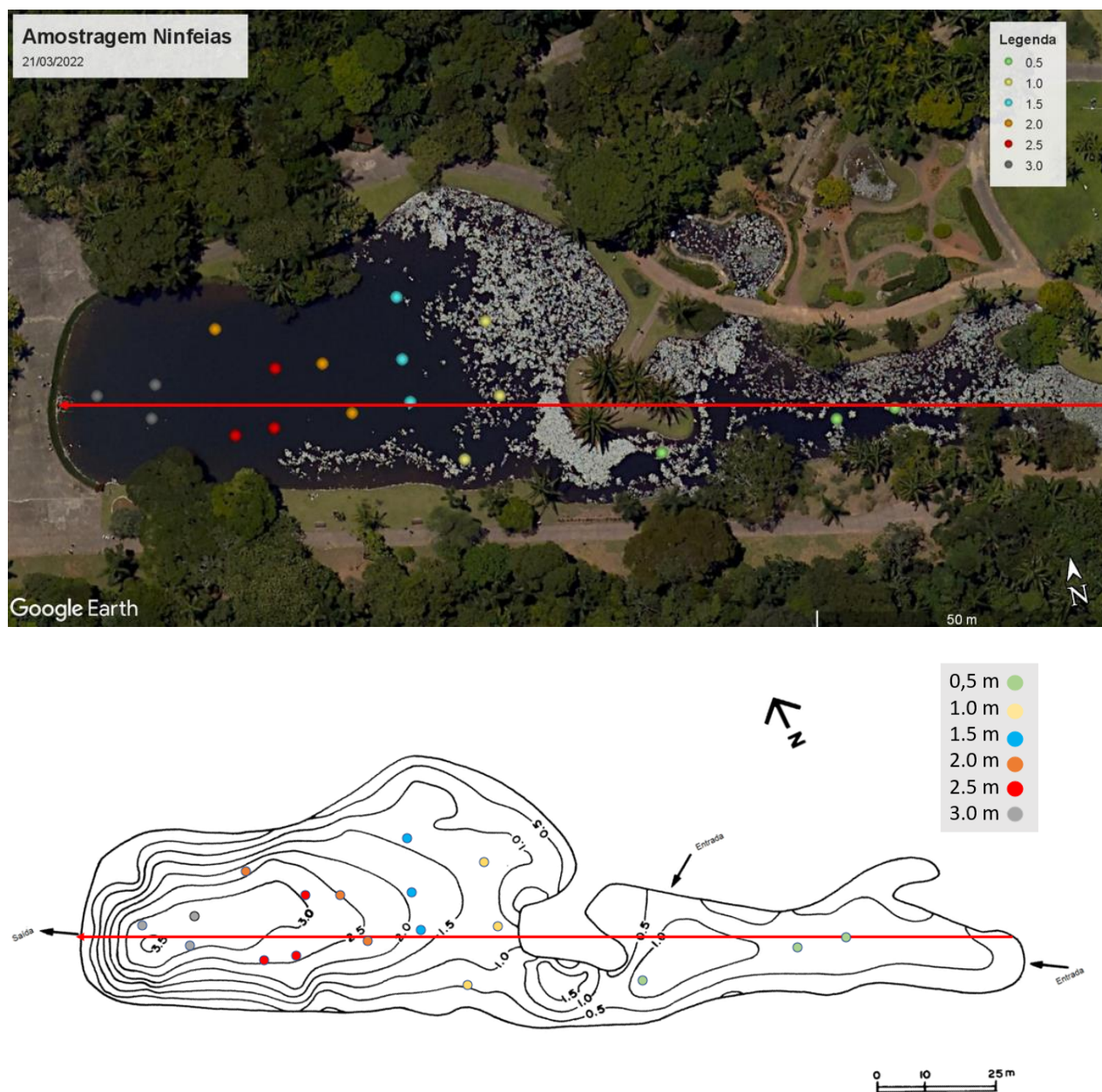


Figura 1. Imagem obtida através do programa Google Earth Pro (versão 7.3.6.9345;12/10/2022) a partir de pontos georreferenciados pelo GPS (A). Mapa batimétrico do Reservatório das Ninfeias (Fonte: Bicudo *et al.* 2002). Mapa mostrando os pontos de amostragem distribuídos no gradiente de profundidade, evidenciado pelo transecto (B).

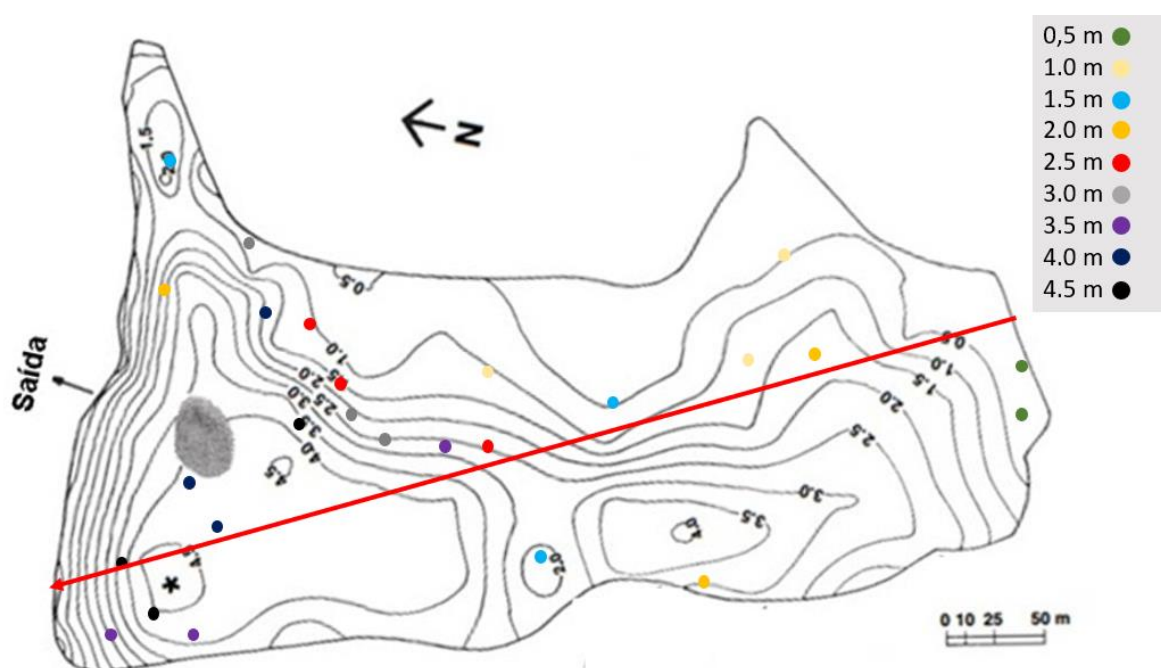
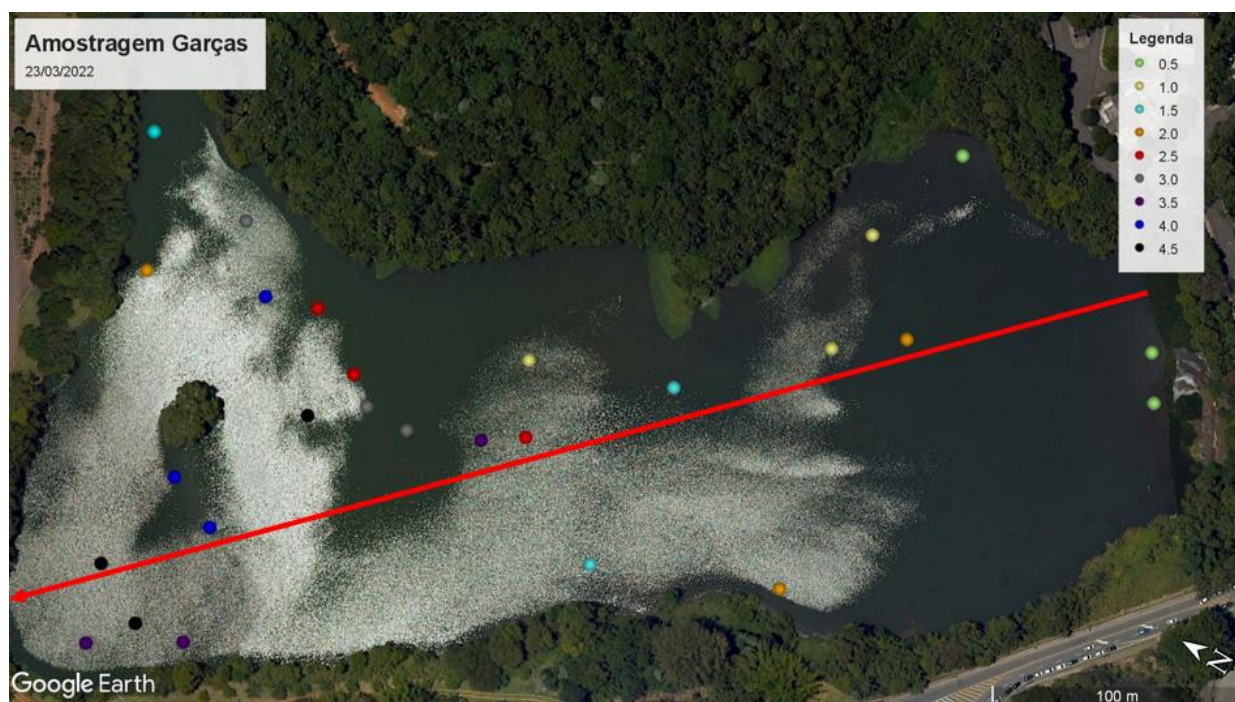


Figura 2. Imagem obtida através do programa Google Earth Pro (versão 7.3.6.9345;12/10/2022) com os pontos georreferenciados pelo GPS (A). Mapa batimétrico do Reservatório das Garças mostrando os pontos de amostragem distribuídos no gradiente de profundidade próximo ao transecto (B) (Fonte: Bicudo et.al 2002).

2.2. Delineamento amostral

Como processos de mistura levam a ressuspensão partículas vivas e não vivas do ambiente bentônico (MacIntyre & Melack 1995), o estudo foi realizado no período de estratificação com base em estudos anteriores (Crossetti et al. 2019; Santos et al 2020). A amostragem no reservatório mesotrófico foi realizada no dia 21/03/2022 e no supereutrófico no 23/03/2022, ambos no período chuvoso, quando o reservatório se encontra na fase de estratificação (Bicudo et al. 2007; Crossetti et al. 2019) e o sedimento, consequentemente, apresenta menor grau de perturbação física. Todos os pontos de amostragem foram georreferenciados com uso de GPS (Garmin, GPSMAP).

No reservatório mesotrófico, amostras de água da superfície e do sedimento superficial foram coletados dentro de um gradiente de profundidade, incluindo a zona pelágica e litorânea no reservatório mesotrófico. Com base no mapa batimétrico, os pontos de amostragem foram selecionados em função do gradiente de profundidade, mantendo uma distância de 1 a 2 m da margem do reservatório e uma distância mínima 20 m entre os pontos (Figura 1B). Amostras em triplicatas foram coletadas em 6 profundidades (0,5 m; 1.0 m; 1.5 m; 2.0 m; 2.5 m; 3.0 m), e 3 m foi a profundidade máxima encontrada no reservatório, totalizando 18 amostras.

No reservatório supereutrófico, amostras de água e sedimento superficial foram coletados dentro de um gradiente de profundidade, incluindo a zona pelágica e litorânea no reservatório supereutrófico. Com base no mapa batimétrico, os pontos de amostragem foram selecionados em função do gradiente de profundidade, mantendo uma distância de 1 a 2m da margem do lago reservatório (minimizar a interferência externa) e uma distância máxima 50 m entre os pontos da margem (evitar pseudo-replicação) (Figura 2B). Amostras em triplicatas foram coletadas em 9 profundidades (0,5 m; 1.0 m; 1.5 m; 2.0 m; 2.5 m; 3.0 m; 3.5 m; 4.0 m; 4.5 m), sendo 4,5 m a profundidade máxima encontrada no reservatório, assim totalizando 27 amostras neste reservatório supereutrófico.

Em todos os pontos de amostragem, as amostras de água foram coletadas na subsuperfície com garrafas de polietileno para determinação das variáveis abióticas em cada ponto de amostragem. Posteriormente, o sedimento superficial foi coletado manualmente com auxílio de um amostrador tipo Kajak usando um cano de acrílico de 72 mm de diâmetro em todas as profundidades.

2.3. Variáveis climáticas analisadas

As variáveis climatológicas foram fornecidas pela Estação Meteorológica do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, campus da Água Funda, que se localiza cerca de 200 metros do local de estudo (estacao.iag.usp.br). As variáveis analisadas foram: temperatura do ar, precipitação pluviométrica e velocidade do vento.

2.4. Variáveis ambientais analisadas

As seguintes variáveis abióticas foram analisadas no campo: transparência (profundidade do disco de Secchi), temperatura, condutividade elétrica, pH (sonda subaquática multiparâmetros Horiba U53), radiação subaquática (PAR, luxímetro Li-Cor 250). Conforme métodos descritos no APHA (2012), foram determinadas as concentrações do oxigênio dissolvido (método da azida modificado), alcalinidade (método da titulação), CO₂ livre e bicarbonato (calculado a partir da alcalinidade e pH), nitrito (método da diazotação) e nitrato (método da redução do cádmium), ortofosfato (método ácido ascórbico), nitrogênio total e fósforo total (método do persulfato alcalino) e amônio (método do fenol). O coeficiente de atenuação de luz (k) foi calculado usando a seguinte equação:

$k = \frac{(\ln(I_1) - \ln(I_2))}{z}$, onde I_1 é a luz na camada superior e I_2 é a luz na camada inferior e z é a profundidade máxima de cada ponto de amostragem (Kirk, 1994).

2.5. Atributos do epipélon analisados

Medidas de Biomassa

Para determinação da biomassa fotossintética, a concentração de clorofila-*a* (com a correção de feofitina; mg/m²) do epipélon foi obtida através da filtração das amostras em filtros de fibra de vidro (Whatman GF/F) e pela extração da clorofila-*a* com etanol (90%), conforme Sartory & Grobbelaar (1984).

Para determinação da massa total e biomassa (g/m²), a massa seca (MS) e massa seca livre de cinzas (MSLC) do epipélon foram determinadas através da filtração da amostra em filtro de fibra de vidro Whatman GF/F em bomba a vácuo sob baixa pressão (0,3 atm), conforme método descrito no APHA (2012). Os filtros foram previamente calcinados (500 °C; 1 hora) para eliminar possíveis resíduos orgânicos, em seguida, pesados em balança analítica para determinação da massa (gramas). Após filtração, os filtros contendo o epipélon foram colocados em estufa à 105 °C e pesados a cada 24 horas até obtenção de massa constante. Posteriormente, os filtros com material foram levados à mufla a 500 °C por 1 hora para obtenção da massa de cinzas e, posterior, cálculo da MSLC.

Estrutura da comunidade de algas e cianobactérias epipélicas

Para avaliar as mudanças na composição de espécies do epipélon, amostras do epipélon foram fixadas com formalina 4% para análise qualitativa ao microscópio óptico (Zeiss Axioscop com câmara acoplada). A identificação das algas teve como base publicações regionais, principalmente referentes ao PEFI (Bicudo & Menezes 2006; Tucci et al. 2006; Ferragut et al. 2005), além de literatura internacional especializada (ex. Komárek & Fott 1983). As amostras do epipélon para análise quantitativa foram fixadas e preservadas em Lugol acético e, mantidas no escuro até o momento da análise. A contagem das algas foi realizada em microscópio invertido (Axio Observer D1, Zeiss com câmera digital acoplada) e seguiu o

método de Utermöhl (aumento de 400x). O critério de contagem usado foi a curva de rarefação de espécies. A densidade (ind cm^{-2}) e o biovolume ($\mu\text{m}^3 \text{ cm}^{-2}$) de algas e cianobactérias foram determinados. O biovolume de algas e cianobactérias foi determinado pelo biovolume médio das espécies descritas para os reservatórios da área de estudo em Fonseca et al. (2014) e, quando a espécie estava ausente na lista, o biovolume foi estimado de acordo Hillebrand et al. (1999). O biovolume de algas e cianobactérias no perifíton foi expresso em $\mu\text{m}^3 \text{ cm}^{-2}$ e convertido para $\text{cm}^3 \text{ m}^{-2}$ dividindo por 10^8 . Com base em uma densidade específica de $1,0 \text{ g cm}^{-3}$, as unidades de biovolume de $\text{cm}^3 \text{ m}^{-2}$ são proporcionais para unidades de biomassa de g m^{-2} (Porter et al. 2008). Espécies com densidade maior do que 50% da densidade total foram consideradas espécies dominantes. A riqueza de espécies foi determinada com base no número total de táxons quantificados nas amostras. As algas e cianobactérias com mais que 5% de biovolume total da amostra foram consideradas espécies descritoras.

2.6. Tratamento estatístico

Os correlogramas gerados por Índice I de Moran e a significância do índice de autocorrelação espacial foram analisados para avaliar a autocorrelação espacial entre as unidades amostrais (Legendre & Legendre 2012).

Os dados limnológicos foram analisados conjuntamente através da Análise dos Componentes Principais (PCA) a partir de matriz de covariância e dos dados transformados por $\log(x + 1)$, o teste de randomização foi executado (9999 randomizações) para escolher a dimensão para interpretação dos dados. A correlação de Pearson (r) das variáveis ambientais e dos escores dos eixos 1 e 2 foram analisados. PCA foi realizada no programa PC-ORD 6.0 (McCune & Mefford 2011).

A análise permutacional de variância multivariada (PERMANOVA 2-fatores) foi aplicada para determinar a diferença significativa na estrutura da comunidade de algas no

epipélon entre profundidade e trofia. Esta análise foi executada usando a similaridade de Bray-Curtis e 9999 permutações (Past 4.05; Hammer et al. 2001).

A relação entre as espécies descritoras de algas do epipélon com as variáveis ambientais foram avaliadas através da análise de redundância (RDA). As variáveis da matriz ambiental da RDA foram escolhidas em função do peso da variável na ordenação da análise de componentes principais (PCA). Análise de agrupamento da composição de espécies foi realizada para identificação das zonas bênticas em ambos os reservatórios. As análises multivariadas foram feitas no programa PC-ORD 6.0 (McCune & Mefford 2011).

Realizou-se a análise de variância (ANOVA one-way) para detecção de diferença significativa das variáveis abióticas e bióticas entre profundidades em cada reservatório ($\alpha = 0,05$). A comparação múltipla de médias foi realizada pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Para comparação da biomassa entre reservatório de diferentes trofias foi usada a ANOVA two-way (fatores: profundidade e trofia). Todos os testes foram realizados no programa Sigma Plot 12.0. As premissas, normalidade dos dados e homogeneidade de variância, foram checadas para realização das análises de variância. Os gráficos de isolinhas da biomassa total nos pontos de amostragem foram obtidos através do programa Surfer (Surfer ® 19.1.189).

3. Resultados

3.1. Reservatório mesotrófico

3.1.1 Variáveis abióticas

A tabela 1 mostra o resumo dos resultados das variáveis ambientais analisadas no reservatório mesotrófico.

Em relação ao gradiente de profundidade, verificou-se que a temperatura apresentou uma variação espacial e uma diferença significativa entre as profundidades ($F = 28,4$; $p = <0,001$), apresentando uma menor temperatura nas profundidades mais rasas e aumentando conforme a profundidade foi aumentando. Os valores do pH, condutividade e TDS se

mostraram mais uma distribuição mais homogênea ao longo do gradiente de profundidade, não apresentando diferença significativa entre as profundidades. A concentração do fósforo total foi maior nas maiores profundidades (2 m, 2,5 m e 3 m), e apresentou diferença significativa entre as profundidades ($F = 4,075$; $p = 0,021$). A quantidade de luz (%) teve diferença significativa entre as profundidades ($F = 5,753$; $p = 0,006$) e maiores valores em 3 m de profundidade. No reservatório mesotrófico, Zeu atingiu o fundo em todas as profundidades e o valor médio da Z_{ds} foi de 0,84 m (Tabela 3). A maior quantidade de PAR atingiu o sedimento do reservatório, contudo, o coeficiente de atenuação da luz foi mais elevado nas menores profundidades. Considerando o gradiente de profundidade, a razão Z_{ds}/Z_{max} aumentou com a profundidade e a PAR diminuiu, indicando a menor disponibilidade de luz no sedimento das maiores profundidades.

Tabela 2. Valores médios e desvio padrão das variáveis limnológicas (n=3) no gradiente de profundidade no reservatório das Ninfeias (21/03/2022).

Profundidade	0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m
Temperatura (°C) "Subsuperfície"	20,39 (±0,35)	21,15 (±0,04)	21,23 (±0,10)	21,45 (±0,10)	21,62 (±0,17)	22,19 (±0,23)
Temperatura (°C) "Fundo"	19,98 (±0,28)	21,06 (±0,02)	21,12 (±0,10)	21,08 (±0,02)	20,86 (±0,28)	20,88 (±0,45)
pH "Subsuperfície"	5,40 (±0,53)	5,08 (±0,26)	5,13 (±0,27)	5,12 (±0,18)	5,26 (±0,31)	5,35 (±0,10)
pH "Fundo"	4,79 (±0,14)	4,86 (±0,09)	4,79 (±0,08)	4,73 (±0,03)	4,78 (±0,04)	4,83 (±0,02)
ORP - mV "Subsuperfície"	231,67 (±32,87)	249,00 (±23,52)	257,67 (±9,61)	241,67 (±21,59)	221,33 (±36,02)	204,00 (±9,64)
ORP - mV "Fundo"	232,33 (±33,86)	253,33 (±32,35)	226,67 (±25,11)	234,67 (±33,08)	185,00 (±18,33)	222,33 (±11,68)
Condutividade (uS.cm ⁻¹) "Subsuperfície"	49,67 (±1,15)	50,00 (±1,00)	50,00 (±1)	49,66 (±1,52)	51,00 (±1,00)	49,00 (±0,00)
Condutividade (uS.cm ⁻¹) "Fundo"	49,00 (±0,00)	48,67 (±0,57)	50,00 (±0,00)	49,67 (±1,15)	51,33 (±1,52)	50,33 (±0,57)
TDS - g/L "Subsuperfície"	0,04 (±0,01)	0,03 (±0,00)	0,04 (±0,01)	0,03 (±0,00)	0,03 (±0,00)	0,03 (±0,00)
TDS - g/L "Fundo"	0,03 (±0,00)	0,03 (±0,00)	0,03 (±0,00)	0,03 (±0,00)	0,03 (±0,00)	0,03 (±0,00)
OD (mg.L ⁻¹) "Subsuperfície"	3,74 (±0,21)	4,66 (±1,70)	5,27 (±2,39)	5,25 (±2,29)	6,48 (±1,97)	6,46 (±0,04)
OD (mg.L ⁻¹) "Fundo"	5,56 (±0,00)	3,86 (±0,00)	3,91 (±0,00)	4,93 (±0,00)	1,90 (±0,00)	3,03 (±0,00)
Alcalinidade	0,19 (±0,01)	0,20 (±0,01)	0,20 (±0,00)	0,21 (±0,01)	0,21 (±0,02)	0,20 (±0,00)
CO ₂ Livre (mg .L ⁻¹)	120,63 (±123,86)	182,17 (±94,00)	171,76 (±112,17)	163,54 (±66,16)	133,66 (±83,82)	90,25 (±19,43)
PO ₄ (µg .L ⁻¹)	3,14 (±0,68)	2,51 (±0,80)	2,85 (±0,22)	3,14 (±0,30)	11,79 (±13,51)	3,67 (±0,08)
PT (µg .L ⁻¹)	10,15 (±0,18)	9,79 (±0,46)	9,58 (±0,39)	12,15 (±0,24)	12,91 (±1,24)	12,91 (±0,32)
PDT (µg .L ⁻¹)	6,04 (±1,55)	5,12 (±2,18)	4,81 (±0,87)	7,43 (±1,85)	16,97 (±19,10)	5,53 (±0,85)
Si (µg .L ⁻¹)	1,89 (±0,79)	1,93 (±0,20)	2,02 (±0,07)	2,01 (±0,10)	2,17 (±0,09)	2,10 (±0,07)
NID (µg .L ⁻¹)	890,11 (±38,9)	900,83 (±101,6)	948,30 (±45,3)	1017,67 (±25,7)	1005,61 (±72,4)	998,93 (±23,2)
Luz (%)	48,85 (±1,62)	81,03 (±23,22)	80,04 (±14,46)	65,78 (±25,83)	72,86 (±28,17)	85,49 (±20,93)
Coeficiente de Atenuação da luz (k)	3,22 (±0,86)	2,00 (±0,11)	2,07 (±0,23)	1,76 (±0,03)	1,91 (±0,39)	1,79 (±0,14)

Tabela 3. Valores médios e desvio padrão das variáveis limnológicas (n=3) no gradiente de profundidade no reservatório mesotrófico. Abreviação: Prof. – Profundidade; Transp. – Transparência; Luz sup. – Luz na superfície; Luz fun. – Luz no fundo.

Prof. (m)	Transp. (cm)		Luz sup. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		Luz fun. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		Coeficiente de atenuação da Luz (k)	
0.5	50,00	$\pm 0,00$	376,20	$\pm 162,69$	89,77	$\pm 77,48$	3,22	$\pm 0,86$
1	79,00	$\pm 3,61$	313,30	$\pm 108,22$	41,53	$\pm 9,97$	2,00	$\pm 0,11$
1.5	75,33	$\pm 2,52$	636,30	$\pm 180,05$	27,77	$\pm 4,50$	2,07	$\pm 0,23$
2	82,00	$\pm 3,46$	655,37	$\pm 276,49$	19,17	$\pm 7,34$	1,76	$\pm 0,03$
2.5	79,33	$\pm 1,53$	1239,10	$\pm 296,14$	12,51	$\pm 9,18$	1,91	$\pm 0,39$
3	80,33	$\pm 3,06$	886,60	$\pm 287,99$	4,26	$\pm 1,79$	1,79	$\pm 0,14$

Tabela 4. Resultados da one-way ANOVA dos dados abióticos da superfície da água no gradiente de profundidade no reservatório mesotrófico. Abreviatura: sds, sem diferença significativa.

	F	P
CO ₂ livre	sds	sds
Condutividade	sds	sds
Coeficiente de atenuação da luz - k	5,75	0,006
Luz	sds	sds
NID	sds	sds
NT	27,60	<0,001
OD	sds	sds
PDT	sds	sds
pH	sds	sds
PT	4,08	0,021
Sílica	sds	sds

Análise dos componentes principais (Figura 3): A análise dos componentes principais resumiu 85% da variabilidade total dos dados abióticos nos dois primeiros eixos. As profundidades de 2 m; 2,5 m e 3 m foram ordenadas no lado positivo do eixo 1 e correlacionados com os maiores valores de temperatura, atenuação da luz e $Z_{\text{máx}}/Z_{\text{ds}}$ ($r = >0,971$) e, as profundidades 0,5 m, 1 m e 1,5 m (com exceção do 1,5B) foram ordenados no lado negativo do mesmo eixo e correlacionados alta concentração de NT ($r = >-0,921$). No eixo 2, as profundidades de 1 m; 1,5 m e 2 m foram ordenados no lado positivo desde eixo e correlacionados com valores de transparências e N-NH_4 ($r = >0,572$), enquanto 0,5 m; 2,5 m, 3 m foram correlacionados com elevada concentração de P-PO_4 , PT e Si ($r = >-0,752$). Assim, as unidades amostrais foram ordenadas principalmente em função do gradiente de profundidade.

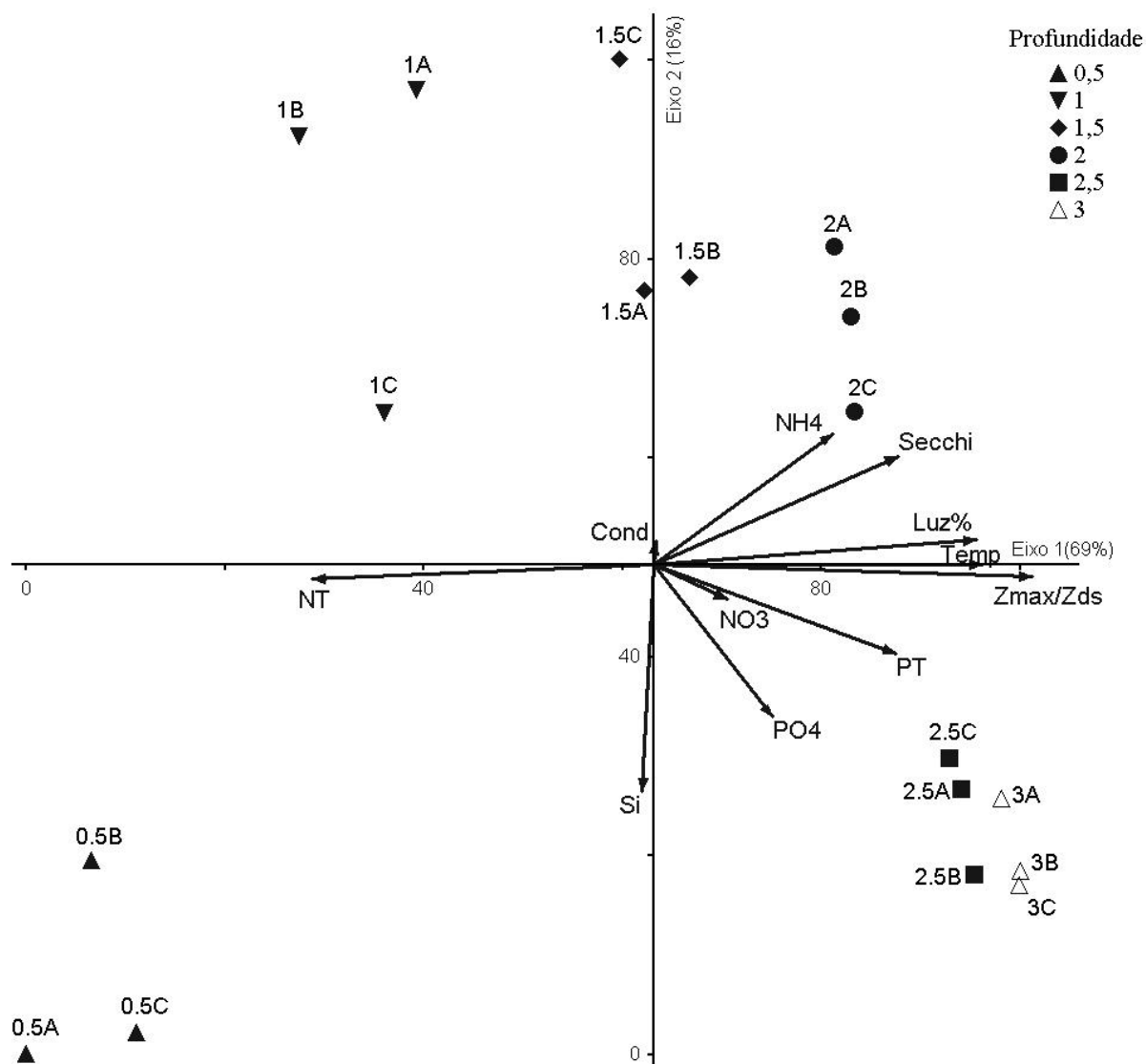


Figura 3. PCA das variáveis limnológicas das diferentes profundidades em réplicas (A, B e C) no reservatório mesotrófico estudado. Vetores: NH₄ - amônio; NT- nitrogênio total; PT-fósforo total; Si – ortossilicato; Luz% - Atenuação da luz do fundo em porcentagem; Temp – temperatura; Cond – condutividade; STD – sólidos totais dissolvidos; NO₃ – nitrato; PO₄ – ortofosfato; Secchi – disco de secchi; Z_{máx}/Z_{ds} – razão Z_{máx}/Z_{ds},

3.1.2 Epipélon

Biomassa (clorofila-*a*, Massa Seca Livre de Cinzas, Biomassa total)

A concentração de clorofila-*a* do epipélon mostrou pouca variação entre as diferentes profundidades (Figura 4A). Apesar da ausência de diferença significativa, a maior concentração foi encontrada nas menores profundidades (0,5 m; 1 m). Observou-se uma maior concentração de massa seca livre de cinzas (MSLC) nas profundidades de 2,5 m e 3 m e uma menor concentração nas profundidades de 1 m e 1,5 m (Figura 4B). Contudo, a MSLC não apresentou diferença significativa entre as profundidades. Com base no biovolume, o maior valor de biomassa de algas e cianobactérias no epipélon foi encontrado em 1,5 m de profundidade e o menor a 0,5 m (Figura 6A). A biomassa total de algas e cianobactérias no epipélon foi significativamente diferente entre profundidades (ANOVA: $F = 6,77$; $p = 0,003$). O teste de Tukey mostrou que a biomassa encontrada em 0,5 m foi diferente da encontrada de 1,5 m a 3 m ($p < 0,022$). A biomassa foi correlacionada positivamente com a profundidade ($r = 0,60$; $p = 0,0089$).

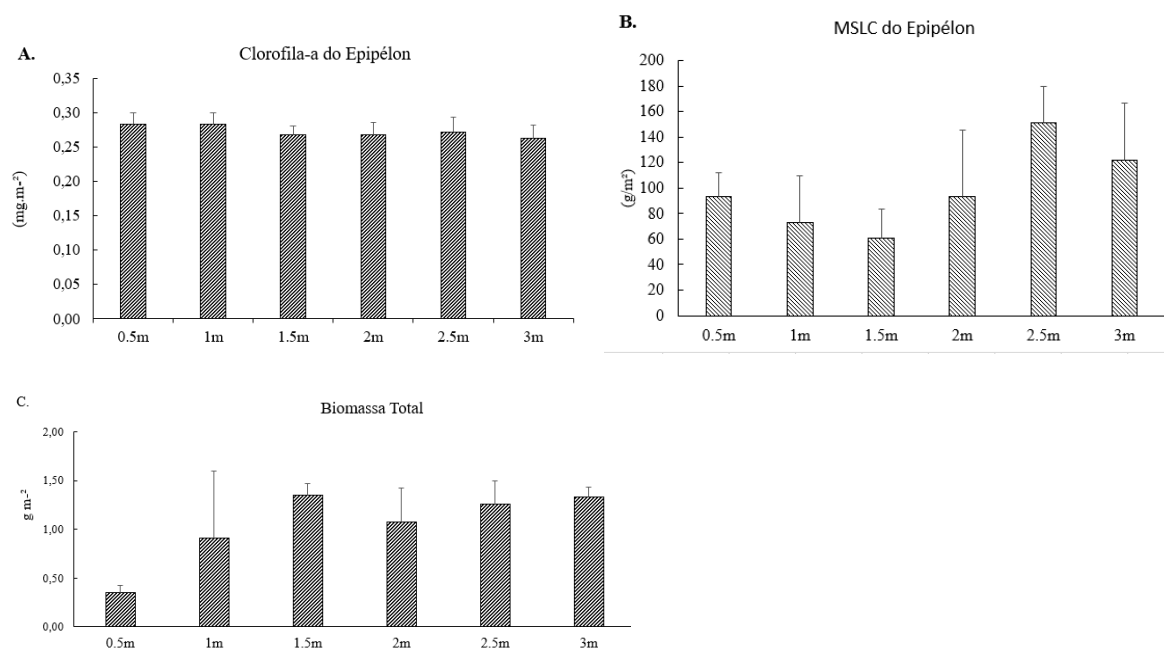


Figura 4. Variação dos valores médios e desvio padrão ($n = 3$) da concentração de clorofila-*a* (A), massa seca livre de cinzas (MSLC, B) e biomassa total de algas e cianobactérias (C) do epipélon no gradiente de profundidade de um reservatório mesotrófico.

Comunidade de algas epipélicas

Os maiores valores de densidade total de algas e cianobactérias epipélicas foram observados nas profundidades de 1 m e 3 m, enquanto, nas demais profundidades houve pouca variação (Figura 5A). A densidade total apresentou diferença significativa entre profundidades (ANOVA: $F = 15,623$; $p < 0,001$). O teste de Tukey mostrou que a densidade encontrada em 1 m foi diferente da encontrada em 1,5 a 3 m ($p < 0,001$), enquanto a densidade de 3m foi diferente de 0,5m e de 2 a 2,5 m ($p < 0,027$).

A riqueza de espécies do epipélon foi maior em 0,5 m de profundidade e conforme foi aumentando a profundidade a riqueza de espécies foi diminuindo gradualmente (Figura 5B). A riqueza foi significativamente diferente entre profundidades (ANOVA: $F = 5,983$; $p = 0,005$). O teste de Tukey mostrou que a riqueza encontrada em 0,5 m foi diferente da encontrada de 2

a 3 m ($p < 0,042$). A riqueza foi correlacionada negativamente com a profundidade (Pearson: $r = -0,78$; $p = 0,000152$).

Observou-se que o menor valor de diversidade ocorreu na profundidade de 0,5m (Figura 5C, D). Além disso, a diversidade diminuiu com o aumento da profundidade.

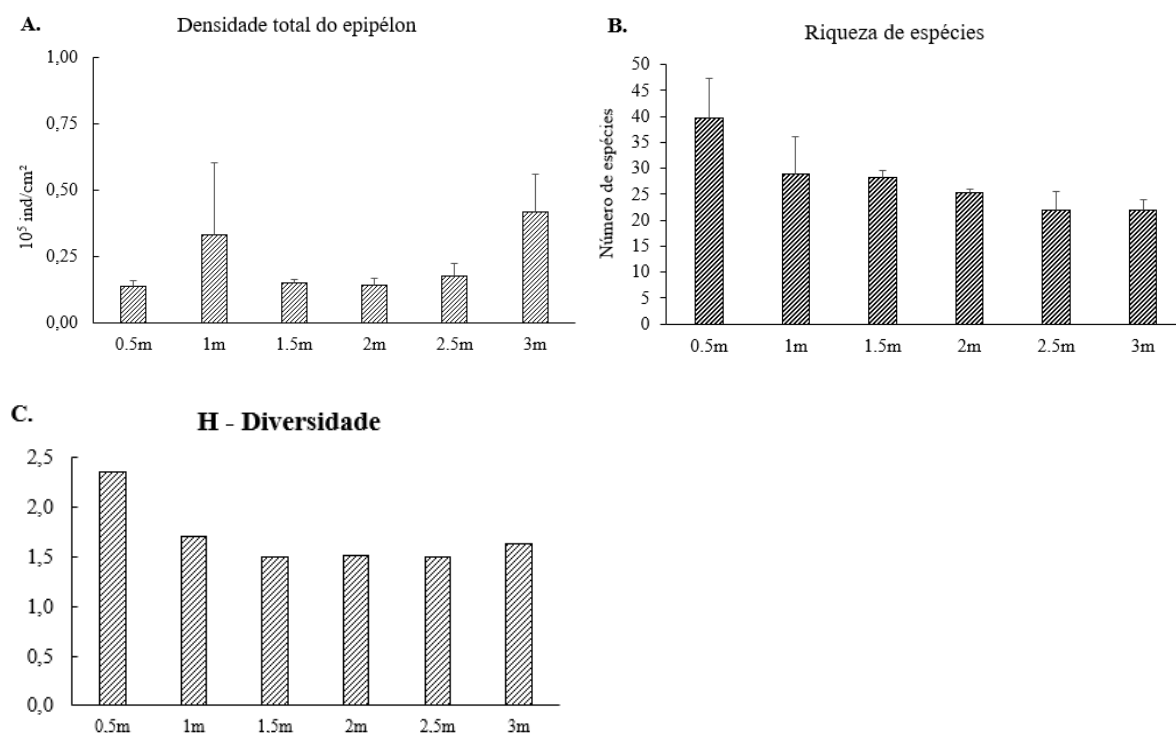


Figura 5. Variação dos valores médios e desvio padrão ($n = 3$) da densidade total (A), riqueza de espécies (B), diversidade (C) do epipélon no gradiente de profundidade de um reservatório mesotrófico.

Considerando as espécies descritoras, observou-se que a *Oedogonium* sp. e *Pinnularia* cf. *viridis* foram as espécies com maior contribuição para o biomassa total, contribuindo em média com 39% e 28% (Figura 6). *Pinnularia* cf. *viridis* foi a espécie mais representativa da estrutura do epipélon em 0,5 m de profundidade, *Oedogonium* (56%) foi dominante em 1 m, ambas as espécies foram apresentaram elevada representatividade no epipélon em 1,5 m e 2 m,

Oedogonium (52%) voltou a ser dominante em 2,5 m e manteve elevada a contribuição em 3 m, junto com *Cosmarium contractum* e *Cosmarium* sp. 4.

A PERMANOVA one-way (fator profundidade) mostrou que a estrutura da comunidade de algas perifíticas apresentou diferença significativa entre as profundidades ($F = 4,77$; $p = 0,0001$).

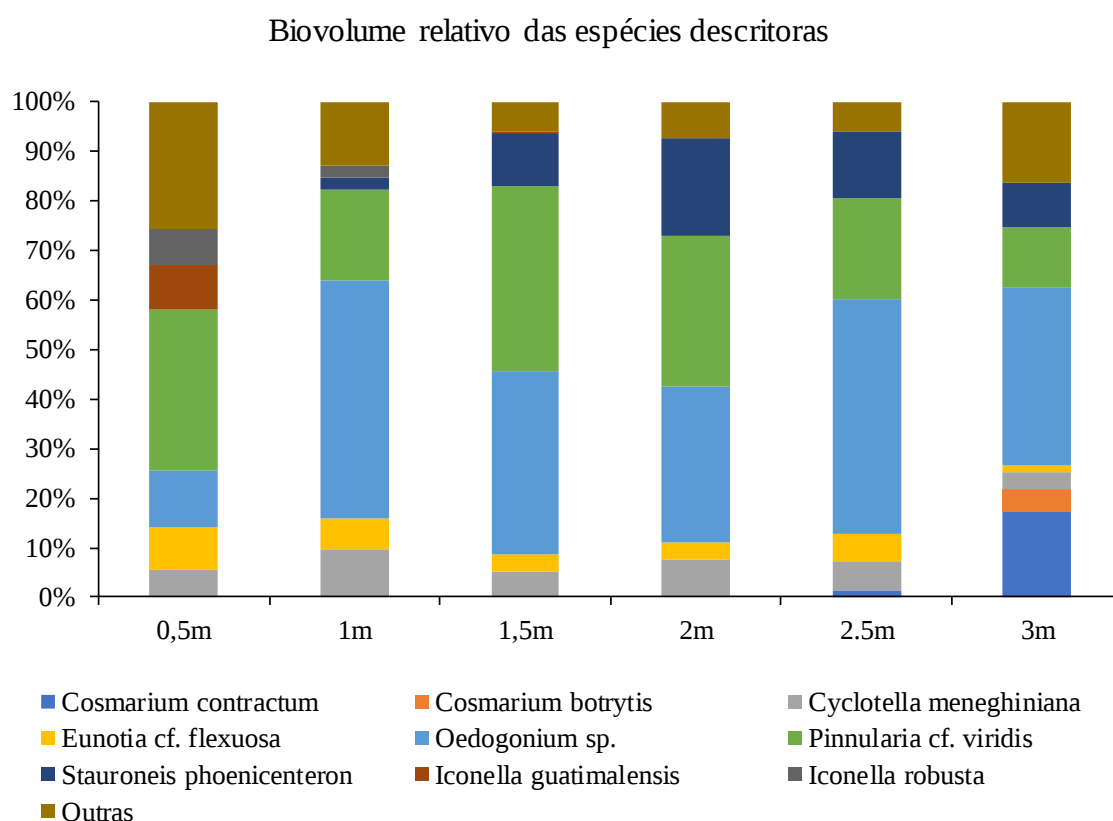


Figura 6. Biomassa total relativa ($n = 3$) das espécies descritoras de algas e cianobactérias epipélicas no gradiente de profundidade de um reservatório mesotrófico.

Análise de redundância (RDA) – A análise conjunta de 32 espécies de algas e cianobactérias epipélicas e 6 variáveis ambientais foi realizada pela análise de redundância (RDA, Figura 7). Os autovalores do eixo 1 ($\lambda = 131,12$) e 2 ($\lambda = 69,37$) e a explicabilidade total

dos dados foi de 39%, sendo no eixo 1 de 25,5% e no eixo 2 de 13,5%. A correlação de Pearson espécie-preditora foi alto para o eixo 1 ($r = 0,975$) e para o eixo 2 ($r = 0,924$), o que indicou forte relação entre a ordenação das espécies e dos preditores ambientais.

No lado positivo do eixo 1, foram ordenadas as profundidades de 2 m, 2,5 m e 3 m de profundidades e foram correlacionados com altos valores de $Z_{\text{máx}}/Z_{\text{ds}}$ ($r = 0,969$), PT ($r = 0,851$) e luz ($r = -0,807$). No lado negativo do eixo 1, foram ordenadas as profundidades de 0,5m, 1m e 1,5m e foram correlacionados com elevada concentração de nitrogênio total ($r = -0,774$).

Considerando a correlação do eixo 1, as espécies mais associadas as profundidades de 2 m, 2,5 m e 3 m foram *Actinotaenium perminutum* ($r = 0,671$), *Cosmarium botrytis* ($r = 0,688$), *Cosmarium contractum* ($r = 0,829$) e *Oedogonium* sp. ($r = 0,705$). No lado negativo do eixo 1, as espécies *Discostella stelligera* ($r = -0,857$), *Gomphonema gracile* ($r = -0,634$) e *Navicula cryptotenella* var. *cryptotenella* ($r = -0,670$) foram mais associadas as profundidades de 0,5 m, 1 m e 1,5 m.

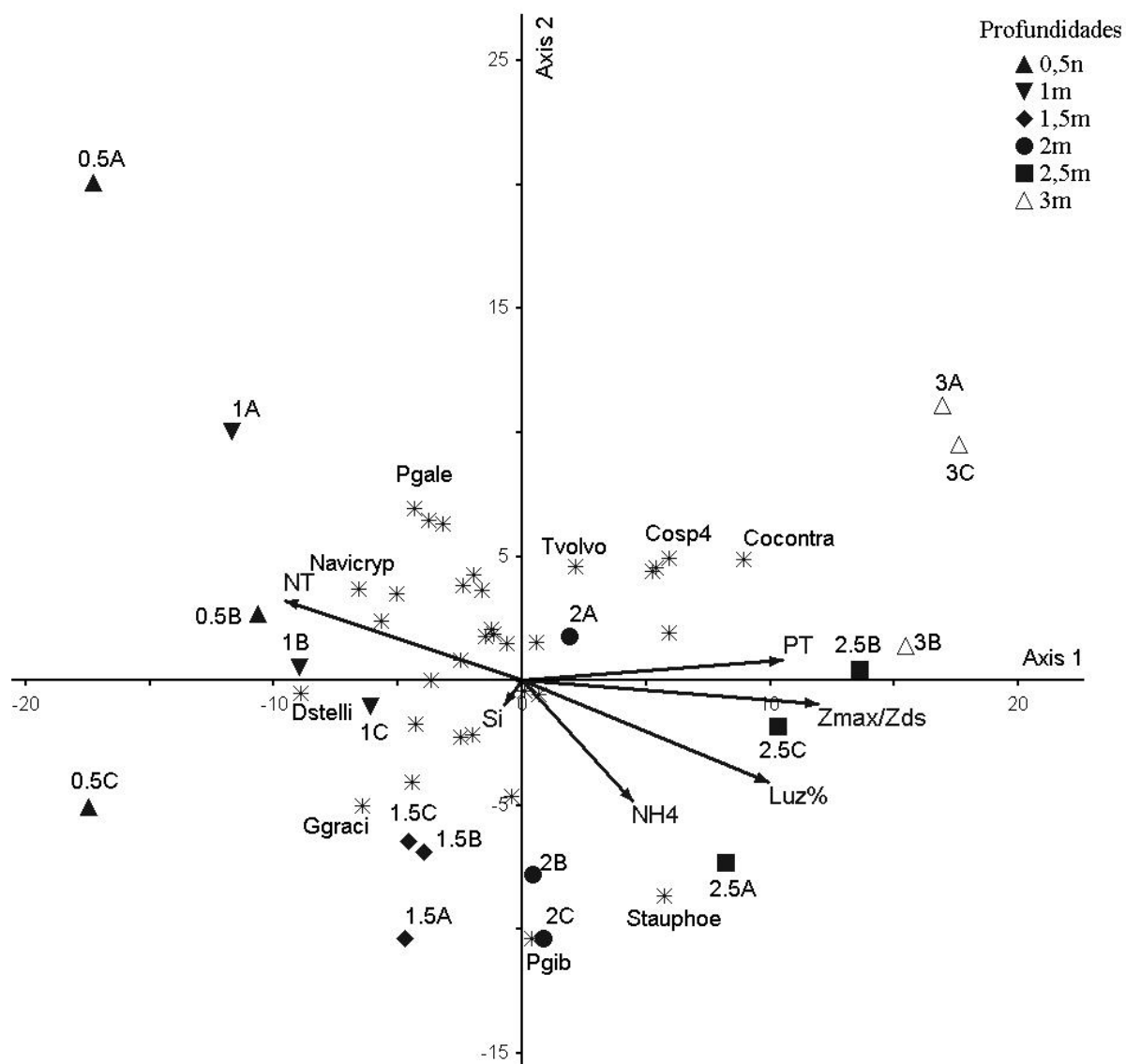


Figura 7. RDA do biovolume das espécies de algas e cianobactérias descritoras do epipélon e 6 variáveis ambientais em réplicas (A, B e C) nas profundidades amostradas no reservatório mesotrófico estudado. Unidade amostral: o número indica a profundidade (0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 e 3) e a letra indica a amostra (A, B, C). Vetores: NH₄-amônio; NT-nitrogênio total; PT-fósforo total; Si – Ortossilicato; Z_{máx}/Z_{ds} – razão Z_{máx}/Z_{ds}; Luz% - Atenuação da luz do fundo em porcentagem. Correlação das espécies com os eixos 1 e 2 e seus respectivos códigos encontram-se na tabela 2.

Tabela 5. Correlação de Pearson do biovolume das algas epipélicas (r) do reservatório mesotrófico com os eixos 1 e 2 da RDA e seus respectivos códigos. As espécies com maior correlação com eixo 1 encontram-se em negrito ($>0,6$ e $>-0,6$).

Táxons	Códigos	Eixo 1	Eixo 2
<i>Actinotaenium perminutum</i> (G.S.West) Teiling	Apermi	0,671	0,411
<i>Ankistrodesmus fusiformis</i> Corda	Afusi	-0,376	0,601
<i>Brachysira vitrea</i> (Grunow) R.Ross	Bvitrea	-0,277	-0,188
<i>Cosmarium botrytis</i> sp. 1	Cosbotry	0,688	0,163
<i>Cosmarium contractum</i> Kurt Förster	Cocontra	0,829	0,330
<i>Cosmarium majae</i> Ström	Cosmajae	0,670	0,411
<i>Cosmarium</i> sp. 4	Cosp4	0,670	0,407
<i>Discostella stelligera</i> (Cleve & Grunow) Houk & Klee	Dstelli	-0,857	-0,036
<i>Desmodesmus magnus</i> (Meyen) P.M.Tsarenko	Desmagnus	-0,233	0,271
<i>Eunotia camelus</i> Frenguelli	Eucame	-0,430	0,534
<i>Eunotia</i> cf. <i>flexuosa</i> (Bréb.) Kütz.	Euflexu	-0,372	-0,297
<i>Eunotia</i> cf. <i>pseudosudetica</i> Metzeltin	Eupseudo	-0,417	-0,125
<i>Eunotia</i> cf. <i>sudetica</i> O. F. Muller	Eusudetica	0,059	0,117
<i>Frustulia crassinervia</i> (Brébisson ex W.Smith) Lange-Bertalot & Krammer	Frucrass	-0,474	-0,317
<i>Gloeocystis</i> sp.	Gloesp	-0,364	0,000
<i>Gomphonema gracile</i> Ehrenberg	Ggraci	-0,634	-0,360
<i>Iconella guatimalensis</i> Ehrenberg	Igua	-0,595	0,181
<i>Iconella robusta</i> Ehrenberg	Irob	-0,583	0,291
<i>Navicula cryptotenella</i> var. <i>cryptotenella</i> Lange-Bert.	Navicrypto	-0,670	0,271
<i>Nitzschia linearis</i> W. Smith	Nitzlinearis	-0,072	0,125
<i>Oedogonium</i> sp.	Oedosp	0,705	-0,426
<i>Oscillatoria sancta</i> Kützing ex Gomont	Oscilsancta	-0,376	0,601
<i>Phacus</i> sp. 1	Phasp1	-0,460	0,657
<i>Pinnularia</i> cf. <i>gibba</i> Ehrenberg	Pgib	0,040	-0,781
<i>Pinnularia</i> cf. <i>viridis</i> (Nitzsch) Ehrenberg	Pinnuviridis	0,125	-0,502
<i>Pinnularia divergens</i> W. Smith	Pinnudiver	-0,063	-0,473
<i>Pseudanabaena galeata</i> Böcher	Pgale	-0,531	0,613
<i>Pseudanabaena</i> sp. 1	Pseudana	-0,304	0,264
<i>Stauroneis phoenicenteron</i> (Nitzsch) Ehrenberg	Stauphoeni	0,495	-0,546
<i>Trachelomonas abrupta</i> Svirenko	Tracheab	-0,254	0,300
<i>Trachelomonas armata</i> (Ehrenberg) F. Stein	Trachear	-0,254	0,300
<i>Trachelomonas volvocinopsis</i> Svirenko	Tvolv	0,211	0,345

3.2. Reservatório supereutrófico

3.2.1 Variáveis abióticas

A tabela 4 mostra o resumo dos resultados das variáveis ambientais analisadas no reservatório supereutrófico. A temperatura apresentou variação espacial e apresentou diferença significativa nas profundidades mais rasas (0,5 m e 1 m) com profundidades maiores (2 m, 3,5 m, 4 m e 4,5 m). O pH apresentou pouca variação espacial entre as profundidades, mas a diferença foi significativa entre a profundidade de 0,5 m e as demais profundidades ($F = 5,79$; $p = <0,001$). Os valores de CO_2 livre, PT e silicato foram mais elevados em 0,5m de profundidade do que nas demais profundidades, e apresentaram diferença significativa entre as profundidades ($F = 56,227$; $p = <0,001$; $F = 2,96$; $p = 0,027$; $F = 5,417$; $p = 0,001$, respectivamente). A alcalinidade e PDT apresentaram pouca variação espacial e não tiveram diferença significativa entre as profundidades. A concentração de P-PO_4 esteve sempre abaixo do limite de detecção do método ($4 \mu\text{g L}^{-1}$). Os valores de NID e a atenuação da luz (k) variaram espacialmente e, apresentaram uma variação espacial entre as diferentes profundidades ($F = 3,506$, $p = 0,013$; $F = 7,838$; $p = <0,001$). Zeu atingiu o sedimento nas profundidades de 0,5 a 1,5 metros e Zeu não ultrapassou 0,7 m (Tabela 7). A maior quantidade de PAR atingiu o sedimento no eutrófico, contudo, a coeficiente de atenuação da luz foi mais elevado nas menores profundidades. Considerando o gradiente de profundidade, a razão $Z_{\text{max}}/Z_{\text{ds}}$ aumentou com a profundidade e a PAR diminuiu, indicando a menor disponibilidade de luz no sedimento das maiores profundidades.

Tabela 6. Valores médios e desvio padrão das variáveis limnológicas (n=3) no gradiente de profundidade no reservatório das Garças (22/03/2022).

Profundidade	0,5m	1m	1,5m	2m	2,5m	3m	3,5m	4m	4,5m
Temperatura (°C) <i>Sup</i>	22,38 (±0,07)	23,85 (±0,73)	23,67 (±1,62)	25,21 (±1,69)	23,51 (±1,35)	23,60 (±0,23)	25,41 (±0,82)	25,12 (±0,34)	25,29 (±0,78)
Temperatura (°C) <i>"Fundo"</i>	22,33 (±0,03)	22,57 (±0,25)	23,09 (±0,37)	22,98 (±0,52)	22,70 (±0,22)	22,57 (±0,22)	23,53 (±0,29)	22,87 (±0,38)	23,00 (±0,56)
pH <i>"Superfície"</i>	5,80 (±0,12)	6,23 (±0,17)	6,26 (±0,05)	6,34 (±0,16)	6,06 (±0,07)	6,37 (±0,27)	6,47 (±0,33)	6,09 (±0,05)	6,52 (±0,48)
pH <i>"Fundo"</i>	5,89 (±0,06)	6,04 (±0,12)	6,20 (±0,10)	6,27 (±0,28)	6,13 (±0,38)	5,94 (±0,04)	6,17 (±0,10)	5,95 (±0,07)	6,01 (±0,20)
Condutividade (uS.cm ⁻¹) <i>"Superfície"</i>	218,33 (±1,15)	218,00 (±0,00)	220,67 (±3,06)	217,67 (±1,53)	219,67 (±3,06)	217,33 (±1,53)	217,67 (±1,53)	216,33 (±2,08)	217,67 (±1,15)
Condutividade (uS.cm ⁻¹) <i>"Fundo"</i>	305,7 (±151,9)	217,3 (±0,58)	217,0 (±2,00)	220,3 (±2,31)	224,0 (±8,72)	236,3 (±11,93)	233,3 (±12,6)	296,0 (±67,5)	318,67 (±151,7)
TDS - g/L <i>"Subsuperfície"</i>	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)
TDS - g/L <i>"Fundo"</i>	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,14 (±0,00)	0,15 (±0,01)	0,16 (±0,01)	0,15 (±0,01)	0,20 (±0,05)	0,25 (±0,08)
OD (mg.L ⁻¹) <i>"Subsuperfície"</i>	4,29 (±1,07)	4,81 (±1,38)	5,24 (±1,15)	7,67 (±1,58)	7,59 (±2,96)	6,77 (±0,03)	7,25 (±1,66)	7,34 (±0,82)	6,30 (±0,47)
OD (mg.L ⁻¹) <i>"Fundo"</i>	3,77 (±0,96)	3,84 (±0,55)	4,23 (±1,47)	3,39 (±3,05)	2,49 (±0,99)	7,87 (±2,41)	2,51 (±1,38)	2,73 (±1,97)	1,29 (±1,05)
CO ₂ Livre (mg .L ⁻¹)	146,18 (±38,99)	53,29 (±19,5)	49,52 (±11,10)	40,94 (±12,85)	74,25 (±15,59)	40,52 (±19,69)	32,76 (±18,0)	65,02 (±7,75)	35,30 (±31,47)
PT (µg .L ⁻¹)	74,22 (±16,59)	58,30 (±3,39)	46,40 (±7,12)	49,10 (±6,20)	57,21 (±12,81)	54,35 (±1,94)	57,73 (±13,2)	43,80 (±7,90)	47,23 (±5,64)
PDT (µg .L ⁻¹)	9,52 (±3,67)	12,09 (±1,20)	11,07 (±0,54)	11,38 (±0,93)	12,40 (±1,11)	11,32 (±0,67)	11,99 (±1,72)	12,71 (±1,75)	11,63 (±0,81)
Si (µg .L ⁻¹)	1,57 (±0,10)	1,29 (±0,06)	1,34 (±0,10)	1,30 (±0,01)	1,22 (±0,06)	1,23 (±0,13)	1,42 (±0,03)	1,27 (±0,03)	1,31 (±0,06)
NID (µg .L ⁻¹)	296,79 (±23,9)	262,55 (±38,7)	271,30 (±21,9)	305,97 (±21,0)	285,09 (±8,1)	324,80 (±27,8)	324,08 (±17,6)	268,93 (±9,0)	265,48 (±11,3)
Luz (%)	86,83 (±10,73)	82,10 (±6,19)	65,88 (±28,64)	82,32 (±14,66)	69,48 (±25,13)	83,17 (±15,54)	64,18 (±36,9)	83,07 (±7,01)	69,22 (±25,99)
Coeficiente de Atenuação da Luz (k)	5,21 (±2,09)	4,18 (±1,03)	2,54 (±0,14)	2,61 (±0,34)	2,49 (±0,37)	2,44 (±0,21)	2,84 (±0,48)	2,82 (±0,12)	2,61 (±0,53)

Tabela 7. Valores médios e desvio padrão das variáveis limnológicas (n=3) no gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico. Abreviação: Prof. – Profundidade; Transp. – Transparência.

Prof. (m)	Transp. (cm)		Luz sup. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		Luz fun. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		Coeficiente de atenuação da Luz (k)	
0.5	48,33	$\pm 3,79$	454,60	$\pm 321,34$	26,37	$\pm 14,81$	5,21	$\pm 2,09$
1	56,33	$\pm 1,53$	991,83	$\pm 92,88$	21,17	$\pm 21,29$	4,18	$\pm 1,03$
1.5	66,33	$\pm 1,02$	395,81	$\pm 514,20$	1,19	$\pm 13,96$	2,54	$\pm 0,14$
2	60,33	$\pm 3,51$	384,49	$\pm 522,73$	1,71	$\pm 1,82$	2,61	$\pm 0,34$
2.5	58,67	$\pm 5,77$	544,30	$\pm 620,25$	1,32	$\pm 1,28$	2,49	$\pm 0,37$
3	57,33	$\pm 3,06$	1115,57	$\pm 131,26$	0,84	$\pm 0,55$	2,44	$\pm 0,21$
3.5	58,67	$\pm 4,73$	515,16	$\pm 641,49$	0,02	$\pm 0,01$	2,84	$\pm 0,48$
4	59,67	$\pm 5,51$	993,13	$\pm 180,89$	0,01	$\pm 0,01$	2,82	$\pm 0,12$
4.5	61,00	$\pm 7,81$	823,35	$\pm 607,68$	0,01	$\pm 0,01$	2,61	$\pm 0,53$

Tabela 8. Resultados da one-way ANOVA dos dados abióticos da superfície da água no gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico. Abreviatura: sds, sem diferença significativa.

	F	P
CO ₂ livre	56,23	<0,001
Condutividade	sds	sds
Coeficiente de atenuação – k	7,84	<0,001
Luz	sds	sds
NID	3,51	0,013
NT	10,41	<0,001
OD	8,36	<0,001
PDT	sds	sds
pH	5,79	<0,001
PT	2,96	0,027
Sílica	5,42	0,001

Análise dos componentes principais (Figura 8): A análise dos componentes principais resumiu 83,2% da variabilidade total dos dados abióticos nos dois primeiros eixos. As profundidades de 0,5 m, 1 m, 1,5m foram ordenados do lado positivo do eixo 1 e foram correlacionadas com altas concentrações de CO₂ Livre ($r = 0,868$), Luz ($r = 0,919$) e NT ($r = 0,783$). No lado negativo do eixo 1, encontram-se as profundidades de 2,0 a 4,5 m, que foram correlacionados com altos valores de pH ($r = > -0,735$), temperatura ($r = > -0,741$), razão Z_{máx}/Z_d ($r = > -0,914$). Assim, as unidades amostrais foram ordenadas principalmente em função do gradiente de profundidade.

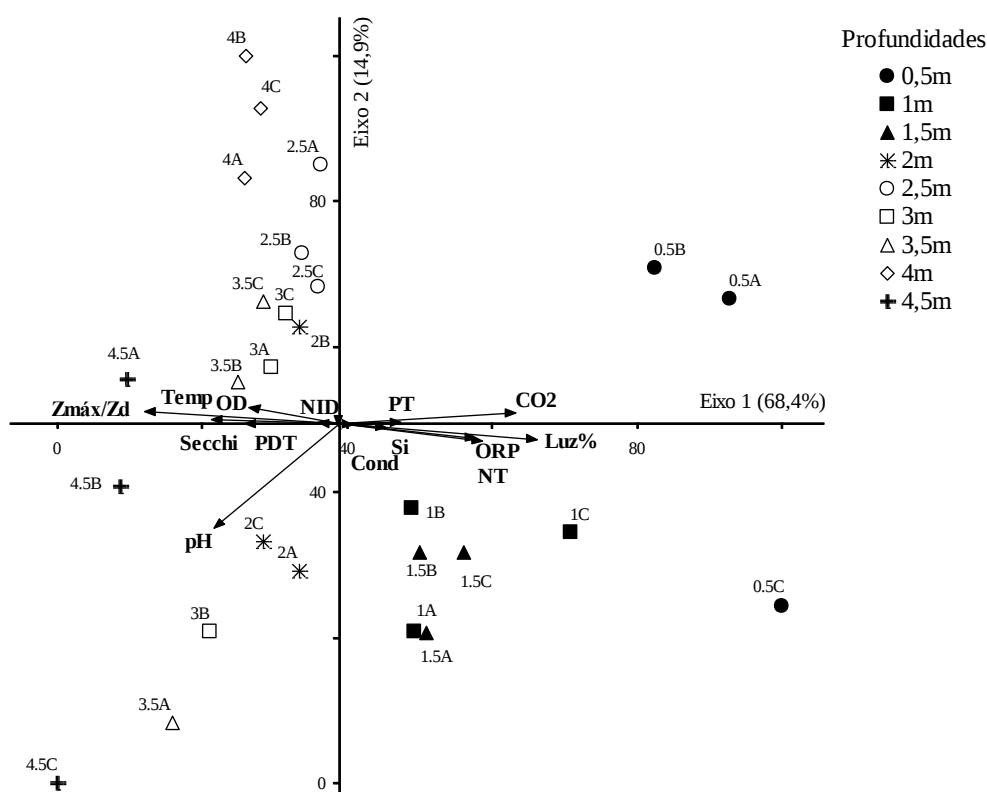


Figura 8. PCA das variáveis limnológicas das diferentes profundidades no reservatório supereutrófico estudado. Vetores: Luz% Coeficiente de atenuação da luz; CO₂ - CO₂ Livre; Cond – condutividade; NID nitrogênio inorgânico dissolvido; NT – nitrogênio total; OD – oxigênio dissolvido; ORP potencial oxi-redução; PDT – fósforo total dissolvido; PT – fósforo total; pH – pH; Secchi – disco de secchi; Si – silicato; Temp – temperatura; Z_{máx}/Z_{ds} – razão Z_{máx}/Z_{ds}.

3.2.2 Epipélon

Biomassa (clorofila-a, Massa Seca Livre de Cinzas e Biomassa total)

A clorofila-*a* e a massa seca livre de cinzas do epipélon apresentaram os maiores valores nas profundidades mais rasas, como 0,5 m e 1 m (Figura 9A-B). Contudo, nenhuma das duas variáveis apresentaram diferença significativa entre as profundidades. A biomassa total de algas e cianobactérias epipélicas variou espacialmente, sendo os maiores valores de clorofila-*a* encontrados nas profundidades de 0,5 m e 1 m e de biomassa total em 1 m e 3m (Figura 9C). A biomassa total apresentou diferença significativa entre as profundidades (ANOVA: $F = 5,782$; $p = <0,001$).

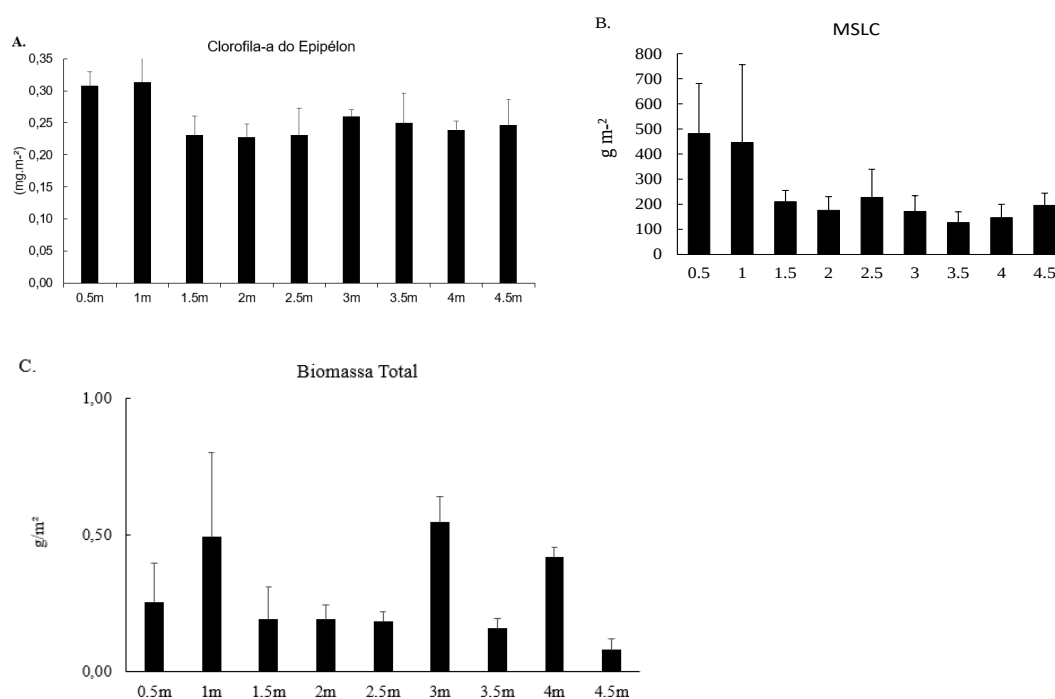


Figura 9. Variação dos valores médios e desvio padrão ($n=3$) da clorofila-*a* (A), massa seca livre de cinzas (MSLC, B) e biomassa total (C) do epipélon no gradiente de profundidade de um reservatório supereutrófico.

Comunidade de algas epipélicas

O maior valor da densidade total do epipélon foi observado em 4 m de profundidade e os menores valores em 4,5 m e 0,5 m (Figura 10A). A densidade total apresentou diferença significativa entre as profundidades (ANOVA: $F = 9,773$; $p < 0,001$). O teste de Tukey mostrou que a densidade encontrada em 4m foi diferente apenas das encontradas nas profundidades de 0,5 a 4,5m ($p < 0,001$).

A maior riqueza de espécies foi encontrada em 2,5 m e a menor em 4,5 m de profundidade (Figura 10B). Foi observado uma diferença significativa na riqueza de espécies do epipélon entre as profundidades (ANOVA: $F = 6,016$; $p < 0,001$). O teste de Tukey mostrou que a riqueza em 4,5 m foi diferente da encontrada em 1 m, 2,5 m e 4 m ($p < 0,031$) e a riqueza de 2,5 m foi diferente de 3,5 m ($p < 0,014$). No gráfico de diversidade do epipélon (Figura 10C), observou-se um maior valor na profundidade de 4 m. A correlação de Pearson entre a riqueza e diversidade de espécies as profundidades não foram significantes.

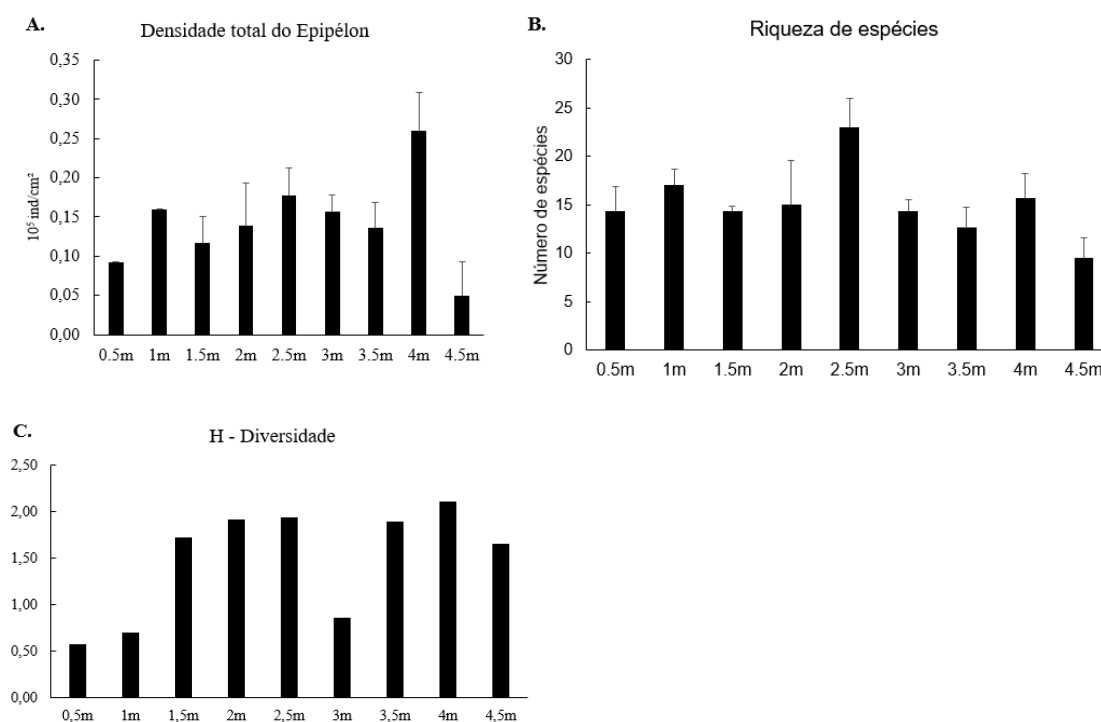


Figura 10. Variação dos valores médios e desvio padrão ($n = 3$) da densidade total (A), riqueza de espécies (B), diversidade (C) do epipélon no gradiente de profundidade de um reservatório supereutrófico.

Considerando as espécies descritoras, observou-se que a *Microcystis aeruginosa* Kützinger, *Fragilaria* sp.1 e *Pinnularia nobilis* var. *regularis* apresentaram alta contribuição para estrutura do epipélon no reservatório (Figura 11B). Em profundidades mais rasas, como 0,5 m e 1 m, a *Pinnularia nobilis* var. *regularis* apresentou a maior biomassa e não apareceu nas demais profundidades. Diferentemente, *Microcystis aeruginosa* apresentou a maior biomassa nas profundidades de 1,5 m; 2 m; 2,5 m e 3 m, *Fragilaria* sp. 1 em 3,5m e 4,5m, *Fragilaria* sp. 1, *Microcystis aeruginosa* e *Monactinus simplex* apresentaram elevada biomassa em 4 m de profundidade.

Em termos de biomassa relativa, *Pinnularia nobilis* var. *regularis* foi a espécie mais representativa da estrutura em 0,5 m e 1 m de profundidade com 89% e 55% da biomassa total, *Microcystis aeruginosa* foi dominante em 1,5 m, 2 m e 2,5 m, 3 m (35-81% da biomassa total), *Fragilaria* sp. 1 foi dominante em 3,5 m e 4,5 m (26% e 33% de biomassa total). Em 4 m, a

Microcystis aeruginosa (18%), a *Fragilaria* sp.1 (17%) e a *Monactinus simplex* (16%) apresentaram maior biomassa total.

Com base na biomassa das espécies de algas e cianobactérias epipéllicas, a PERMANOVA one-way revelou que há diferença estatisticamente significativa na estrutura da comunidade entre as profundidades ($F = 2,145$; $p = 0,0004$).

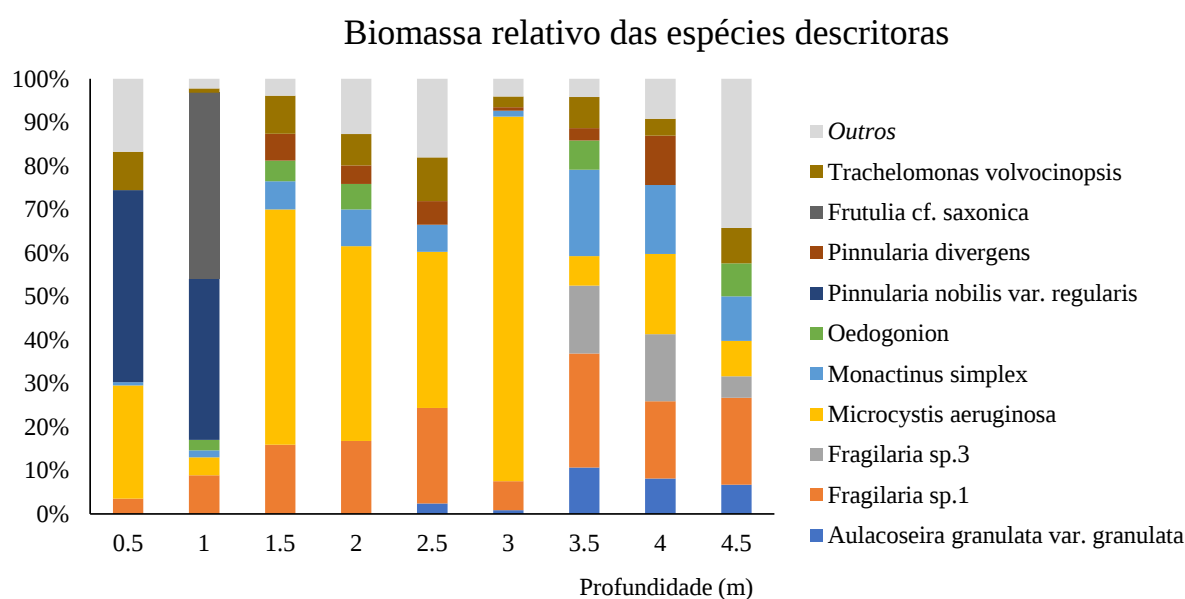


Figura 11. Biomassa relativa ($n = 3$) das espécies descritoras de algas e cianobactérias do epipélion no gradiente de profundidade de um reservatório supereutrófico.

Análise de redundância (RDA) - A análise conjunta de 32 espécies de algas epipéllicas e 5 variáveis ambientais foi realizada pela análise de redundância (RDA, Figura 12). Os autovalores do eixo 1 ($\lambda = 73,91$) e 2 ($\lambda = 40,54$) e a explicabilidade total dos dados foi de 28,3%. A correlação de Pearson espécie-preditora foi alto para o eixo 1 ($r = 0,928$) e para o eixo 2 ($r = 0,772$), o que indicou forte relação entre a ordenação das espécies e dos preditores ambientais.

As profundidades de 2,5 a 4,5 m foram ordenadas no lado positivo do eixo 1 e foram correlacionados com altos valores de razão $Z_{\text{máx}}/Z_d$ ($r = 0,960$) e pH ($r = 0,368$). As profundidades de 0,5 m a 2,0 foram ordenadas no lado negativo do eixo 1 e foram correlacionados com altos valores de NT ($r = -0,877$), luz ($r = -0,774$) e CO_2 livre ($r = -0,2447$). Considerando o lado positivo do eixo 1, as espécies mais correlacionadas com os escores do eixo 1 foram *Aulacoseira granulata* var. *granulata* ($r = 0,914$), *Fragilaria* sp.1 ($r = 0,536$) e a *Fragilaria* sp.3 ($r = 0,678$). As espécies mais correlacionadas com os escores do lado negativo do eixo 1 foram *Frustulia* cf. *saxonica* ($r = -0,499$), *Monoraphidium circinale* ($r = -0,536$) e a *Pinnularia nobilis* var. *regularis* ($r = -0,562$).

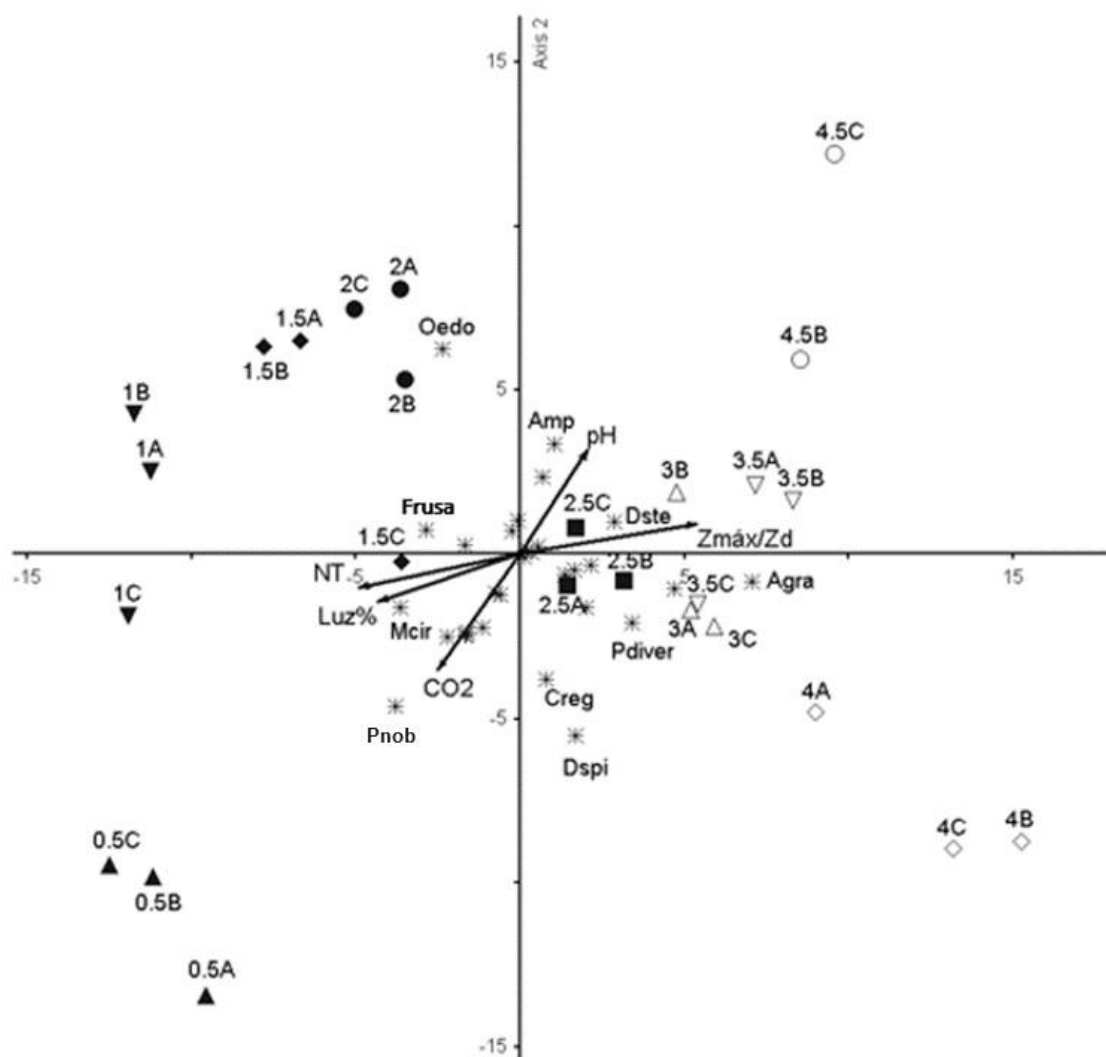


Figura 12. RDA da biomassa das espécies de algas descritoras do epipélton e 6 variáveis ambientais em réplicas (A, B e C) no gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico estudado. Unidade amostral: o número indica a profundidade (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5) e a letra indica a amostra (A, B, C). Vetores: CO₂ – CO₂ Livre; Luz% - luz; NT – nitrogênio total; pH - pH; Zmáx/Zds – razão Zmáx/Zds. Correlação das espécies com os eixos 1 e 2 e seus respectivos códigos encontram-se na tabela 2.

Tabela 9. Correlação de Pearson do biovolume das algas epipéllicas (r) com os eixos 1 e 2 da RDA e seus respectivos códigos. As espécies com maior correlação com eixo 1 encontram-se em negrito ($>0,5$ e $>-0,5$).

Táxons	Códigos	Eixo 1	Eixo 2
<i>Achnantheidium catenatum</i> (Bily & Marvan) Lange-Bertalot	AchCate	0,034	-0,031
<i>Achnantheidium minutissimum</i> (Kützing) Czarnecki	AchMinu	0,158	0,396
<i>Amphora</i> sp	Amp	0,143	0,347
<i>Ankistrodesmus fusiformis</i> Corda	AnkFusi	0,034	-0,031
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Ralfs var. <i>granulata</i>	Agra	0,914	-0,082
<i>Closterium diana</i> Ehrenberg	CloDia	0,197	0,052
<i>Cosmarium contractum</i> var. <i>minutum</i> (Delponte) Coesel	CosCo	-0,405	-0,447
<i>Cosmarium majae</i> Ström	CosMajae	0,095	-0,150
<i>Cosmarium regnellii</i> Wille	Creg	0,130	-0,472
<i>Cymbella</i> sp	Cymb	0,438	-0,052
<i>Desmodemus spinosus</i> (Chodat) E.Hegewald	DesSpi	0,237	-0,574
<i>Desmodesmus magnus</i> (Meyen) P.M.Tsarenko	DesMag	-0,015	0,195
<i>Discostella stelligera</i> (Cleve & Grunow) Houk & Klee	Dste	0,398	0,101
<i>Fragilaria</i> sp. 1	Frasp1	0,536	0,175
<i>Fragilaria</i> sp. 3	Frasp3	0,678	-0,114
<i>Iconella guatimalensis</i> (Ehrenberg) Ruck e Nakov	SuriGua	0,385	-0,231
<i>Merismopedia glauca</i> (Ehrenberg) Kützing	Mgla	-0,245	0,027
<i>Merismopedia trolleri</i> H.Bachm.	Mthro	-0,349	-0,293
<i>Microcystis aeruginosa</i> Kützing	MicroAeru	-0,260	-0,373
<i>Monactinus simplex</i> (Meyen) Corda	MonSim	0,115	0,020
<i>Monoraphidium circinale</i> Nygaard	Mcir	-0,536	-0,180
<i>Oedogonium</i> sp.	Oedo	-0,304	0,595
<i>Pinnularia nobilis</i> var. <i>regularis</i> Krammer	Pigent	-0,562	-0,513
<i>Pinnularia divergens</i> W. Smith	Pdiver	0,446	-0,203
<i>Planktothrix agardhii</i> (Gomont) Anagn. & Komárek	PlankAga	-0,083	0,170
<i>Scenedesmus acuminatus</i> (Lagerheim) Chodat	SceAcumi	0,213	-0,076
<i>Frustulia</i> cf. <i>saxonica</i> Rabenhorst	Frusa	-0,499	0,094
<i>Trachelomonas armata</i> (Ehrenberg) Stein	TracheAr	-0,265	-0,315
<i>Trachelomonas curta</i> A.M.Cunha	TrachCur	-0,405	-0,447
<i>Trachelomonas volvocinopsis</i> Swirenko	TrachVol	0,390	-0,088

Comparação espacial da biomassa total do epipélon nas diferentes trofias

A maior biomassa total de algas e cianobactérias no reservatório supereutrófico foi observada nas profundidades de 1 m e 3 m, e no reservatório mesotrófico nas maiores profundidades (1,5 m até 3 m) (Figura 12A-B).

Considerando as profundidades de até 3 m nos dois reservatórios, foi observada diferença significativa da biomassa total entre os reservatórios de diferentes trofias (ANOVA: $F = 43,72$; $p < 0,001$). Houve diferença significativa da biomassa entre profundidades (ANOVA: $F = 3,98$; $p = 0,009$). A interação entre os fatores profundidade e trofia foi significativa (ANOVA: $F = 16,675$; $p < 0,001$). A comparação múltipla de médias considerando o fator trofia mostrou que houve diferença significativa da biomassa entre todas as profundidades, exceto entre 0,5 m e 1m (Tukey: $p < 0,027$).

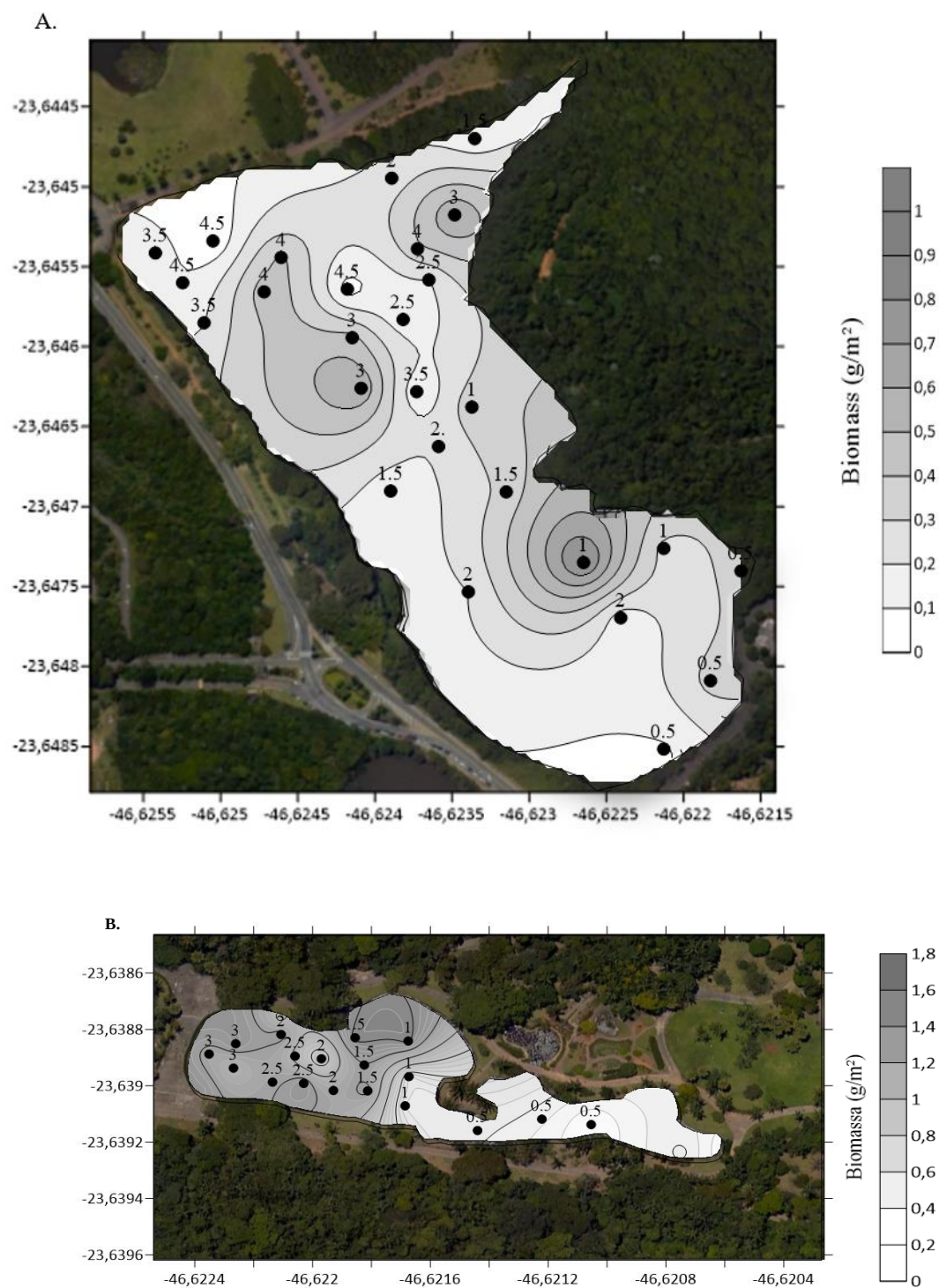


Figura 13. Mapas dos reservatórios supereutrófico (A) e mesotrófico (B) com os valores de biomassa total de algas e cianobactérias nos pontos de amostragem georreferenciados.

4. Discussão

Reservatório Mesotrófico

A avaliação conjunta da biomassa das espécies descritoras do epipélon e das variáveis ambientais mostrou que a disponibilidade de luz e nutrientes da água foram determinantes para a distribuição espacial do epipélon dentro do gradiente de profundidade no reservatório mesotrófico estudado. A profundidade é um fator chave para crescimento e estrutura do epipélon, pois pode determinar a intensidade da luz, a disponibilidade de nutrientes e o regime de perturbação que atua sobre a comunidade (Vadeboncoeur et al. 2014). Com base na PCA, verificou-se espacialmente a presença de duas zonas limnológicas distintas, sendo uma variando de 0,5 m a 1,5 m de profundidade e outra de 2 m a 3 m. A zona limnológica de 0,5m a 1m de profundidade foi correlacionada com os altos valores de NT e a zona de 1,5 a 3 m de profundidade com razão disponibilidade de luz, transparência e amônio, evidenciando que as condições abióticas variaram espacialmente. Em relação à disponibilidade de nutrientes dentro do gradiente de profundidade, os resultados mostraram que as maiores concentrações de NT foram encontradas em 0,5 m e 1 m de profundidade, de amônio em 1,5 m até 3 m e de fósforo total em 0,5 m, 2,5 m e 3 m de profundidade. Uma importante característica do reservatório mesotrófico estudado é a presença de uma elevada cobertura da comunidade de macrófitas aquáticas, especialmente no verão (Souza et al. 2015), o que pode influenciar na variação espacial das condições abióticas.

Os resultados indicaram que a zona bêntica com maior produção de biomassa epipélica (clorofila-a, MSLC, biomassa total) foi encontrada nas maiores profundidades, tendo o maior valor na profundidade de 1,5 m e a menor em 0,5 m (Questionamento 1). Conforme Santos et al. (2020), a maior biomassa algal no epipélon foi observada na zona pelágica, mas a quantidade de biomassa variou entre as diferentes as zonas e épocas do ano. Assim, a produção de biomassa algal no ambiente bentônico varia temporalmente, como observado por Santos et al. (2020), e no gradiente de profundidade, como observado no presente estudo.

Considerando a variação espacial da riqueza e diversidade de espécies de algas e cianobactérias (questionamento 2), a zona bentônica de 0,5 m a 1,5 m caracterizou-se pelos maiores valores, especialmente em 0,5 m. Estudos relatam que a profundidade tem forte influência sobre a variação espacial da comunidade epipélica (Vadeboncoeur et al. 2014), incluindo no reservatório mesotrófico estudado (Santos & Ferragut 2019). Dentre os atributos da estrutura, a riqueza e a diversidade de espécies foram os mais associados com o gradiente de profundidade, pois à medida que a profundidade aumentou, a riqueza de espécies diminuiu gradualmente. Houve uma redução na diversidade das algas epipélicas com aumento da profundidade. Em oposição, a zona bentônica de 2,0 m a 3,0 m caracterizou-se pela maior densidade de algas e cianobactérias (3m) e baixos valores de riqueza e diversidade de espécies.

Considerando a participação das espécies descritoras na estrutura do epipélon (RDA) no gradiente de profundidade, constatou-se que algas e cianobactérias foram distribuídos em função da profundidade e em zonas bentônicas (questionamento 3). A primeira zona bentônica (0,5 m a 1,5 m) apresentou alta correlação com duas espécies, *Oedogonium* sp. e *Cosmarium contractum*. As espécies com maior associação com a segunda zona bentônica (2,0 m a 3,0 m) foram *Discostella stelligera*, *Navicula cryptotenella* var. *cryptotenella*, *Iconella guatimalensis* e *Iconella robusta*. Assim, além da biomassa, riqueza e diversidade, as espécies descritoras encontram-se distribuídas em zonas no reservatório mesotrófico estudado. Considerando a média anual, Santos & Ferragut (2020) reportaram que a profundidade foi o fator mais importante para a determinação da biomassa das espécies descritoras, *Aphanocapsa grevillei* e *Geitlerinema unigranulatum*, as quais foram associadas ao sedimento da zona litorânea, já as espécies *Trachelomonas volvocinopsis* foram associadas ao da zona pelágica no reservatório mesotrófico estudado. Portanto, ambos os estudos evidenciaram a zonação da comunidade de algas no epipélon, separada especialmente em função da profundidade. A compreensão de como as algas e cianobactérias epipélicas variam com a profundidade permite o melhor entendimento de como os processos ecossistêmicos podem ser influenciados pela variação espacial dos

produtores primários bentônicos (Woodruff et al. 1999; Vadeboncoeur et al. 2001; Bartoli et al. 2003; Spears et al. 2006).

Apesar de associada às profundidades da zona bentônica 2, a alga verde filamentosa *Oedogonium* sp. apresentou elevada biomassa em todas as profundidades e foi a única espécie que chegou à dominância em duas (1 m e 2,5 m). Assim, esta espécie apresentou elevada contribuição para a estrutura da comunidade de algas epipéllicas. De acordo com Elkis & Bicudo (2006), *Oedogonium* sp. é encontrada em períodos com a temperatura mais amena, como no outono (final de maio e começo de junho) e primavera (final de agosto e começo de setembro), e desaparecem completamente em épocas mais quentes, principalmente no verão (final de novembro a começo de maio). No presente estudo, *Oedogonium* sp. foi abundante nas duas zonas bentônicas no final do verão, quando as temperaturas estão, geralmente, mais amenas e com elevada precipitação. No período chuvoso, espécies deste gênero podem formar tapetes espessos, que protegem as células das algas durante uma posterior fase seca (Wehr & Sheath 2003). As espécies do gênero *Oedogonium* possuem rizoides que permitem permanecer presos nos substratos em condições turbulentas, pode crescer em águas de diferentes trofias, muitas vezes eutróficas, e em uma ampla gama de habitats (água parada ou corrente) e, ainda, formas maiores podem servir de substratos para outras algas (Wehr & Sheath 2003). Portanto, este gênero possui estratégias adaptativas eficientes para crescer no ambiente bentônico. Destaca-se que algas filamentosas, como o *Oedogonium*, podem causar os problemas nos sistemas aquáticos, principalmente, devido à sua capacidade de formar grande e densos tapetes. Conforme Vadeboncoeur et al. (2021), proliferações inexplicáveis de algas filamentosas nos lagos rasos oligo-mesotróficos têm sido relatadas nos últimos anos, as quais podem estar associadas à poluição de nutrientes nas águas subterrâneas, mudanças climáticas, transporte de nutrientes, hidrodinâmica do lago e estrutura da cadeia alimentar.

Além da distribuição espacial heterogênea no reservatório, a concentração de nitrogênio total, fósforo total e luz foram determinantes da variabilidade das espécies descritoras da

comunidade de algas epipéllicas dentro do gradiente de profundidade (Questionamento 4). A disponibilidade de nutrientes pode influenciar a distribuição das espécies de algas epipéllicas (Pouličková et al. 2014). Contudo, o fósforo e o nitrogênio total incluem o material particulado, o qual podem causar sombreamento quando em excesso (Tavares et al. 2019). Conforme Vadeboncoeur & Lodge (2000), a disponibilidade de nutrientes pode ser um fator determinante na distribuição espacial do epipélon, porém a atenuação da luz desempenha papel importante na distribuição das espécies de algas. De acordo com Dodds (2003), o sedimento tem estoque de nutrientes, mas a luz é geralmente o fator limitante (Vadeboncoeur et al. 2014; Pouličková et al. 2014), como demonstrado experimentalmente por Tavares et al. (2019). Uma importante característica do reservatório estudado é a presença de uma elevada cobertura de macrófitas aquáticas, especialmente no verão (Souza et al. 2015), que pode influenciar a estrutura do fitoplâncton (Fonseca & Bicudo 2011) e do perifíton (Pelegrini & Ferragut 2018), incluindo o epipélon (Santos et al. 2020). Os resultados sugerem que a cobertura de macrófitas na zona litorânea pode ter causado um sombreamento no epipélon, influenciando a composição de espécies.

Em suma, a disponibilidade de luz e nutrientes (NID, PT) foi maior na zona mais profunda (2m até 3m), a qual foi considerada a zona bentônica com maior produção de biomassa epipéllica. Em contraste, a maior riqueza e diversidade de espécies foi encontrada na zona bentônica mais rasa (0,5 a 1m), onde as macrófitas aquáticas podem ter favorecido devido à sua complexidade estrutural. Assim, a mudança espacial na biomassa e a estrutura do epipélon foram associadas ao gradiente de profundidade, o qual foi determinado pela disponibilidade de luz e nutrientes para comunidade.

Reservatório Supereutrófico

No reservatório supereutrófico estudado, observou-se que a disponibilidade de nutrientes, principalmente NT e PT, foi maior nas profundidades de 0,5 m e 1 m, onde a

disponibilidade de luz foi maior para a comunidade epipélica do que nas demais profundidades. As menores concentrações de oxigênio dissolvido e disponibilidade de luz foram observadas nas profundidades de 4 m e 4,5 m. Conforme estudo de longa duração no ponto mais profundo do reservatório (Crossetti et al. 2019), a luz no fundo é praticamente ausente e as concentrações de OD são muito baixas (quase sempre anóxica). Os resultados mostraram que o pH e a condutividade apresentaram pouca variação espacial, porém a concentração de nutrientes e luz variaram entre as profundidades. Com base na PCA, evidenciou-se a presença de duas zonas abióticas, sendo uma de 0,5m a 1,5 m e outra de 2,0 m a 4,5 m, sendo a primeira correlacionada com altos valores de NT, luz e CO₂ Livre e a segunda por altos valores de razão $Z_{máx}/Z_d$ e pH. Desta forma, foi possível identificar zonas abióticas dentro do gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico. Dentro da variação espacial das condições abióticas, a comunidade epipélica foi avaliada.

Os resultados indicaram que a zona bêntica com maior produção de biomassa total foi encontrada nas profundidades de 1 m e 3 m, já a clorofila-a e MSLC foram maiores em 0,5 m e 1 m profundidade, onde detectou-se a maior disponibilidade de luz e nutrientes (questionamento 1). É importante destacar que os pontos de amostragem de 0,5 m e 1 m são impactados diretamente pela entrada do efluente do tratamento secundário do esgoto (sem etapa de remoção de nutrientes) e pela conexão entre os lagos hipereutróficos à montante (Costa-Böddeker et al. 2012; Bicudo et al. 2020). No presente estudo, a maior concentração de nutrientes (N e P) foi observada próximo à entrada do efluente (Mendes & Ferragut 2021). Nas demais profundidades, o sombreamento da floração do fitoplâncton pode ter causado o crescimento das algas epipélicas, conforme demonstrado por Vadeboncoeur et al. (2014).

Considerando a variação espacial da riqueza e diversidade de espécies (questionamento 2), observou-se que esses atributos da comunidade variaram no gradiente de profundidade, sendo os valores diferentes entre as profundidades. Embora a distribuição espacial da riqueza e diversidade tenham sido heterogêneas, não houve uma correlação entre esses atributos e as

profundidades. De fato, observou-se uma flutuação dos valores dentro do gradiente de profundidade.

Considerando a RDA, constatou-se que distribuição das espécies descritoras da comunidade de algas e cianobactérias epipélicas foi organizada em função da profundidade e em duas zonas (questionamento 3). Dentro do gradiente de profundidade, a primeira zona bentônica compreendeu as profundidades de 0,5 m a 2,0 m, onde as espécies de maior associação foram *Frustulia* cf. *saxonica*, *Monoraphidium circinale* e *Pinnularia nobilis* var. *regularis*. A segunda zona bentônica de distribuição das espécies compreendeu as profundidades de 2,5 m a 4,5 m e apresentou três espécies de maior correlação (*Aulacoseira granulata* var. *granulata*, *Fragilaria* sp. 3, *Pinnularia divergens*). Assim, a profundidade foi um importante fator para estrutura da comunidade de algas epipélicas.

Considerando a biomassa das espécies descritoras no gradiente de profundidade, a *Pinnularia nobilis* var. *regularis* foi uma espécie dominante na zona bentônica 0,5 m e 1 m, contribuindo muito para a estrutura da comunidade epipélica. Além disso, esta espécie foi bastante associada à 0,5 m de profundidade. Apesar da *Pinnularia* ser um gênero normalmente encontrada em águas doces com baixa condutividade e pH levemente ácidos (Wehr & Sheath 2003), estudo recente encontrou várias espécies em uma ampla gama de condições físico-químicas, incluindo lagos alcalinos e eutróficos (Potapova et al. 2023). Outra importante espécie para a estrutura do epipélon foi *Microcystis aeruginosa* que esteve presente na maioria das profundidades e foi dominante em 3 m (81%). A *Microcystis aeruginosa* é uma espécie que constantemente está relacionada à ambientes eutrofizados (Jeong et al. 2003), em nível mundial, incluindo no presente reservatório (Bicudo et al. 2007; Crossetti & Bicudo 2008). É uma espécie considerada cosmopolita e amplamente distribuída em corpos d'água brasileiros (Bittencourt-Oliveira 2000, Sant'Anna & Azevedo 2000). Estudos sugerem, que a *Microcystis aeruginosa* permanecem no sedimento durante períodos de baixa temperatura e voltam para a coluna da água com a chegada das estações mais quentes, como na primavera (Preston et al., 1980;

Reynolds et al., 1981; Brunberg e Blomqvist, 2003). O maior entendimento sobre o aumento da temperatura e a distribuição da *Microcystis aeruginosa* no sedimento pode ser essencial para previsão de florações (Guo et. al. 2023).

Os resultados mostraram que a concentração de NT, disponibilidade de luz e a razão $Z_{\text{máx}}/Z_{\text{ds}}$ foram as variáveis de maior peso na distribuição das algas e cianobactérias epipélicas dentro do gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico (questionamento 4). Nutrientes, como nitrogênio total e fósforo total, podem influenciar a distribuição das espécies de algas epipélicas (Pouličková et al. 2014). A disponibilidade de nutrientes pode ser um fator determinante para a distribuição espacial do epipélon, mas a atenuação da luz também desempenha um papel importante nessa distribuição (Vadeboncoeur & Lodge 2000). Estudos relataram que os nutrientes do sedimento são mais importantes para as algas epipélicas do que os nutrientes na coluna de água (Hansson 1992; Vinebrooke & Leavitt 1999). No caso do reservatório em estudo, o sedimento contém elevada concentração de nutrientes devido ao processo de eutrofização. Um estudo paleolimnológico no reservatório estudado mostrou que a concentração de fósforo e nitrogênio total no sedimento aumentou no decorrer dos anos, evidenciando o aumento da eutrofização (Costa-Böddeker et al. 2012). Como o sedimento estoca nutrientes, a luz pode ser um fator mais limitante para a comunidade epipélica que a disponibilidade de nutrientes (Dodds 2003, Vadeboncoeur et al. 2014; Pouličková et al. 2014), o que deve ocorrer no presente reservatório supereutrófico. No presente estudo, os resultados sugerem que a disponibilidade de luz também tenha influência sobre o epipélon, visto que a maior produção de biomassa de algas e cianobactérias foi observada nas profundidades de 0,5 m e 1,0 m, onde há uma maior disponibilidade de luz em relação ao gradiente de profundidade. Além disso, a disponibilidade de luz e a razão $Z_{\text{máx}}/Z_{\text{ds}}$ foram determinantes da zonação das espécies descritoras. Assim, os resultados sugerem que a disponibilidade foi mais importante do que a de nutrientes para a distribuição das algas epipélicas dentro do gradiente de profundidade.

Em suma, com base na biomassa algal do epipélon, o reservatório estudado foi separado em duas zonas bênticas, as profundidades de 0,5 m e 1 m constituíram a zona bêntica de maior produção de biomassa no reservatório, onde ocorreu a maior disponibilidade de luz e nitrogênio. Neste estudo, ainda foi possível observar que a disponibilidade de luz (transparência, luz) teve o maior peso na separação das zonas abióticas, além de ser determinante para a distribuição espacial e variação da estrutura do epipélon. Em conclusão, as mudanças espaciais na biomassa e a estrutura do epipélon foram associadas ao gradiente de profundidade no reservatório supereutrófico.

Considerações sobre a variação do epipelon no gradiente de profundidade em diferentes trofias

Comparando os atributos do epipélon entre o reservatório supereutrófico e mesotrófico, constatou-se algumas diferenças e semelhanças na variação espacial da comunidade.

Dentro do gradiente de profundidade, o valor máximo da biomassa fotossintética (clorofila-a) e a biomassa total das algas e cianobactérias foi similar entre os reservatórios de diferentes trofias. Contudo, apenas a biomassa total evidenciou mais claramente a zonação do epipélon nos dois reservatórios. Observou-se diferenças na zonação, sendo os maiores valores de biomassa apresentando uma flutuação entre as diferentes profundidades no supereutrófico e no reservatório mesotrófico foi observado maiores valores de biomassa nas maiores profundidades. Estes resultados mostram que a trofia tem influência a distribuição espacial do epipélon.

Evidenciou-se também que a maior riqueza e a diversidade de espécies de algas e cianobactérias epipélicas foi encontrada no reservatório mesotrófico, sendo os maiores valores em 0,5 m de profundidade. No reservatório supereutrófico, o maior valor de riqueza foi encontrado em 2,5 m de profundidade e a diversidade em 4 m. Apesar da flutuação espacial dos valores, os resultados mostram que a eutrofização atua negativamente sobre a riqueza e

diversidade de espécies do epipélon. Estudo relata que a eutrofização pode homogeneizar a estrutura das comunidades perifíticas (Dunck et al. 2019) e reduzir a diversidade (Ferragut & Bicudo 2010). Machado et al. (2023) reportaram que os índices de diversidade podem ser indicadores mais sensíveis da eutrofização quando comparado aos indicadores abióticos, composição de espécies e grupos funcionais do fitoplâncton.

As espécies descritoras apresentaram uma distribuição espacial heterogênea dentro do gradiente de profundidade nos dois reservatórios. Contudo, a composição das espécies foi diferente e associadas a trofia de cada reservatório, como *Oedogonium* sp. e no reservatório mesotrófico e *Microcystis aeruginosa* no reservatório supereutrófico. Além disso, espécies foram associadas às diferentes profundidades (RDA) nos dois reservatórios, sugerindo que as algas epipélicas podem indicadoras da zonação e da trofia.

Em suma, a distribuição estrutura da comunidade de algas e cianobactérias epipélicas foi organizada em função da profundidade e em zonas nos dois reservatórios, sendo a distribuição heterogênea em termos de biomassa e composição de espécies. Por outro lado, a zona bentônica de maior produção de biomassa ocorreu em profundidades diferentes (mesotrófico: zona pelágica; supereutrófico: flutuação entre as profundidades, mostrando a influência da trofia sob a zonação. Apesar das diferenças na zonação do epipélon nos reservatórios de diferentes trofias, alguns aspectos foram semelhantes, como a influência da disponibilidade de luz sobre a variação espacial do epipélon. Assim, a luz foi considerada muito importante para o crescimento da comunidade epipélica e pode ser um fator limitante para epipélon, independentemente da trofia.

Referências Bibliográficas

- Aberle, N., & Wiltshire, K. H. 2006. Seasonality and diversity patterns of microphytobenthos in a mesotrophic lake. *Archiv für Hydrobiologie* 167(1-4), 447-465.
- Amaral L.M., Castilho M.C.A., Henry R. & Ferragut C. 2020. Epipelon, phytoplankton and zooplankton responses to the experimental oligotrophication in a eutrophic shallow reservoir. *Environmental Pollution* 263, 114603.
- Andersen, T. K., Nielsen, A., Jeppesen, E., Hu, F., Bolding, K., Liu, Z. & Trolle, D. 2020. Predicting ecosystem state changes in shallow lakes using an aquatic ecosystem model: Lake Hinge, Denmark, an example. *Ecological Applications* 30, e02160.
- APHA, AWWA. & WEF. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21st ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Bartoli, M., Nizzoli D. & Viaroli, P. 2003. Microphytobenthos activity and fluxes at the sediment-water interface: interactions and spatial variability. *Aquatic Ecology* 37, 341–349.
- Bicudo, C. E. M.; Menezes, M. 2006. Gêneros de Algas de Águas Continentais do Brasil: chave para identificação e descrições. 3ª ed.
- Bicudo, C.E.M., Carmo, C.F., Bicudo, D.C., Henry, R., Piao, A.C.S., Santos, C.M. & Lopes, M.R.M. 2002. Morfologia e morfometria de três reservatórios do PEFI. In: D.C. Bicudo, M.C. Forti, & C.E.M. Bicudo (eds.). Parque Estadual das Fontes do Ipiranga: unidade de conservação ameaçada pela urbanização de São Paulo. Editora Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo, pp. 141-158.
- Bicudo, D.C., Forti, M.C.; Bicudo, C.E.M. (orgs.). 2002. Parque Estadual das Fontes do Ipiranga: unidade de conservação ameaçada pela urbanização de São Paulo. São Paulo: Editora Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, p. 141-158.
- Bicudo, D. C., Fonseca, B. M., Bini, L. M., Crossetti, L. O., Bicudo, C. E. M. & Jesus A. T. 2007. Undesirable side-effects of water hyacinth control in a shallow tropical reservoir. *Freshwater Biology* 52, 1120-1133.
- Biggs, B.J., Stevenson, R.J., & Lowe, R.L. 1998. A habitat matrix conceptual model for stream periphyton. *Archiv fur Hydrobiologie* 143, 21-56.
- Bittencourt-Oliveira, M.C. 2000. Development of *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz. (Cyanophyceae/Cyanobacteria) under cultivation and its taxonomic implications. *Algological Studies* 99, 29-37.

- Bottrell, H. H., Duncan, A., & Gliwicz, Z. M. 1991. Empirical relationships between zooplanktonic (Cladocera) and phytoplanktonic (Chlorophyceae) indicators of lake trophic state. *Freshwater Biology*, 26(1), 45-55.
- Bottrell, H.H., Duncan, A., Gliwicz, Z.M., Grygierek, E., Herzig, A., Hillbricht-Ilkowska, A., Kurasawa, H., Larsson, P., Weglenska, T., e Wojton, A. 1991. A review of some problems in zooplankton production studies. *North-Western Journal of Zoology* 39(4), 367-416
- Conti, J.B. & Furlan, S.A. 2003. Geoecologia: o clima, os solos e a biota. In: *Geografia do Brasil*. (Ed J.L. Ross), pp. 67-207. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cano, M., Casco M., Claps, M. 2016. Epipelon dynamics in a shallow lake through a turbid- and a clear- water regime. *Journal of Limnology* 75(2), 355-368.
- Conti, J.B. & Furlan, S.A. 2003. Geoecologia: o clima, os solos e a biota. In: *Geografia do Brasil*. (Ed J.L. Ross), pp. 67-207. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Costa, R.A. & Ferragut, C. 2023. Epipelon biomass responses to different restoration techniques in a eutrophic environment. *Environmental Management* 72, 505–518.
- Crossetti, L.O. & Bicudo, C.E.M. 2008. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garças Pond): the assemblage index application. *Hydrobiologia* 610, 161-173.
- Crossetti, L.O., de Campos Bicudo, D., Bini, L.M., Dala-Corte, R.B., Ferragut, C. & Bicudo, C.E.M. 2019. Phytoplankton species interactions and invasion by *Ceratium furcoides* are influenced by extreme drought and water-hyacinth removal in a shallow tropical reservoir. *Hydrobiologia* 831, 71-85.
- Carneiro, R.O. & Ferragut, C. 2023. Simulating oligotrophication in a eutrophic shallow lake to assess the effect of periphyton bioreactor on phytoplankton and epipelon. *Environmental Science and Pollution Research* 30, 26545–26558.
- Dodds, W.K. 2003. The role of periphyton in phosphorus retention in shallow freshwater aquatic systems. *Journal of Phycology* 39, 840-849.
- Dodds, W. K. 2006. Eutrophication and trophic state in rivers and streams. *Limnology and Oceanography*, 51(1part2), 671-680.
- Dunck, B., Felisberto, S. A., & de Souza Nogueira, I. 2019. Effects of freshwater eutrophication on species and functional beta diversity of periphytic algae. *Hydrobiologia*, 837, 195-204.
- Dunck, B., Algarte, V.M., Cianciaruso, M.V. & Rodrigues, L. 2016. Functional diversity and trait–environment relationships of periphytic algae in subtropical floodplain lakes. *Ecological Indicators* 67, 257-266.
- Elkis, I.C., & Bicudo, C.E.M. 2006. Criptógamos do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga, São Paulo, SP. *Hoehnea*, 33(4), 511-520.

- Ferragut, C., & de Campos Bicudo, D. 2010. Periphytic algal community adaptive strategies in N and P enriched experiments in a tropical oligotrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 646, 295-309.
- Ferragut, C., Lopes, M. R. M., Bicudo, D. D. C., Bicudo, C. D. M., & Vercellino, I. S. 2005. Ficoflórula perifítica e planctônica (exceto Bacillariophyceae) de um reservatório oligotrófico raso (Lago do IAG, São Paulo). *Hoehnea*, 32(2), 137-184.
- Fonseca, B.M., Ferragut, C., Tucci, A., Crossetti, L.O., Ferrari, F., Bicudo, D.C., Sant'Anna, C.L. & Bicudo, C.E.M. 2014. Biovolume de cianobactérias e algas de reservatórios tropicais do Brasil com diferentes estados tróficos. *Hoehnea* 41(1), 9-30.
- Fonseca, B. M., & Bicudo, C. E. 2011. Phytoplankton seasonal and vertical variations in a tropical shallow reservoir with abundant macrophytes (Ninféias Pond, Brazil). *Hydrobiologia* 665, 229-245.
- Genkai-Kato, M., Vadeboncoeur, Y. Liboriussen, L. & Jeppesen, E. 2012. Benthic-planktonic coupling, regime shifts, and whole-lake primary production in shallow lakes. *Ecology* 93: 619–631.
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol Electronica* 4(1), 9.
- Hansson, L.A. 1992. Factors regulating periphytic algal biomass. *Limnology and Oceanography* 37, 322-328.
- Hillebrand, H., Durselen, C. D., Kirschtel, D., Pollingher, U. & Zohary, T. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology* 35, 403–424.
- Jansson M., 1980. Role of benthic algae in transport of nitrogen from sediment to lake water in a shallow clearwater lake. *Archiv für Hydrobiologie* 89, 101-109.
- Kingsbury, M.V., Laird, K.R. & Cumming, B.F. 2012. Consistent patterns in diatom assemblages and diversity measures across water-depth gradients from eight Boreal lakes from north-western Ontario (Canada). *Freshwater Biology* 57, 1151–1165.
- Komárek, J. & Fott, B. 1983. Chlorophyceae (grünalgen) Ordnung: Chlorococcales. In: Huber-G. Pestalozzi (org.). *Das Phytoplankton des Süßwassers: Systematic und Biologie*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart. v. 7(1).
- Lami, A., Musazzi, S., Marchetto, A., Buchaca, T., Kernan, M., Jeppesen, E. & Guilizzoni, P. 2009. Sedimentary pigments in 308 alpine lakes and their relation to environmental gradients. *Advances in Limnology* 62, 247-268.
- Libouriussen L. & Jeppesen E. 2006. Structure, biomass, production and depth distribution of periphyton on artificial substratum in shallow lakes with contrasting nutrient concentrations. *Freshwater Biology* 51, 95-109.

- Liu, G., Zhu, L., Liu, J., & Xi, H. 2016. The dynamics of epipelon community in relation to nutrient availability and coexisting algae in a mesotrophic lake in China. *Ecological Indicators*, vol. 69, pp. 408-414.
- MacIntyre, S., & Melack, J. M. 1995. Vertical and horizontal transport in lakes: linking littoral, benthic, and pelagic habitats. *Journal of the North American Benthological Society* 14(4), 599-615.
- Machado, K. B., Bini, L. M., Melo, A. S., Andrade, A. T. D., Almeida, M. F. D., Carvalho, P. & Nabout, J. C. (2023). Functional and taxonomic diversities are better early indicators of eutrophication than composition of freshwater phytoplankton. *Hydrobiologia*, 850(6), 1393-1411
- McCune B. & Mefford M.J. 2011. PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data.
- Sant'Anna, C.L. & Azevedo, M.T.P. 2000. Contribution to the knowledge of potentially toxic Cyanobacteria from Brazil. *Nova Hedwigia* 71, 359-385.
- Potapova, M. G., Kersey, M. H., & Aycok, L. L. 2023. Diversity and distribution of spine-bearing species of *Pinnularia* in eastern North America. *Diatom Research*, 1-21.
- Pouličková, A., Dvořák, P., Mazalová, P., & Hašler, P. 2014. Epipellic microphototrophs: an overlooked assemblage in lake ecosystems. *Freshwater Science* 33, 513-523.
- Santos, T.R., Ferragut, C. 2019. Environmental predictors of algal community structure of plankton, epipelon and epiphyton in a shallow tropical reservoir. *Brazilian Journal of Botany* 42, 689–699.
- Santos, T. R., Castilho, M. C., Henry, R., & Ferragut, C. 2020. Relationship between epipelon, epiphyton and phytoplankton in two limnological phases in a shallow tropical reservoir with high Nymphaea coverage. *Hydrobiologia*, 847, 1121-1137.
- Sartory, D.P. & Grobbelaar, J.U. 1984. Extraction of chlorophyll a from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis. *Hydrobiologia* 114: 177-187.
- Schindler, D. W. 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1746), 4322-4333.
- Smith, V. H. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environmental Science & Pollution Research*, 10(2), 126-139.
- Søndegaard, M., Jensen, J.P. & Jeppesen, E. 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia* 506-509, 135-145.
- Spears, B.M., Carvalho, L., Perkins, R., Kirika A. & Paterson, D.M. 2006. Spatial and historical variation in sediment phosphorus fractions and mobility in a large shallow lake. *Water Research* 40, 383-391.

- Spears, B.M., Carvalho, L., Perkins, R., O'Malley, M.B. & Paterson, D.M. 2010. The contribution of epipelton to total sediment microalgae a shallow temperate eutrophic loch (Loch Leven, Scotland). *Hydrobiologia* 646, 281-293
- Tavares, D.A., Lambrecht, R.W., de Almeida Castilho, M.C. et al. 2019. Epipelton responses to N and P enrichment and the relationships with phytoplankton and zooplankton in a mesotrophic reservoir. *Aquatic Ecology* 53, 303–314.
- Tucci, A., Leite, C., Gentil, R., & Azevedo, M. 2006. Fitoplâncton do Lago das Garças, São Paulo, Brasil: Um reservatório urbano eutrófico. *Hoehnea*. 33.
- Tucci, A., Sant'Anna, C.L., Azevedo, M.T.P., Malone, C.F.S., Werner, V.R., Rosini, E.F., Gama, W.A., Hentschke, G.S., Osti, J.A.S.; Dias, A.S. Jacinavicius, F.R., & Santos, K.R.S. 2019. Atlas de Cianobactérias e Microalgas de Águas Continentais Brasileiras. Publicação eletrônica, Instituto de Botânica, Núcleo de Pesquisa em Ficologia. Disponível em www.ibot.sp.gov.br
- Vadeboncoeur, Y. & Lodge, D.M. 2000. Periphyton production on wood and sediment: substratum-specific response to laboratory and whole-lake nutrient manipulations. *Journal of the North American Benthological Society* 19, 68–81.
- Vadeboncoeur, Y. & Steinman, A.D. 2002. Periphyton Function in Lake Ecosystems. *The Scientific World Journal* 2, 1-20.
- Vadeboncoeur, Y., Lodge, D.M., & Carpenter, S.R. 2001. Whole-lake fertilization effects on distribution of primary production between benthic and pelagic habitats. *Ecology* 82, 1065-1077.
- Vadeboncoeur Y., Devlin S.P., McIntyre P.B. & Vander Zanden M.J. 2014. Is there light after depth? Distribution of periphyton chlorophyll and productivity in lake littoral zones. *Freshwater Science* 33, 524-536
- Vadeboncoeur, Y., Jeppesen, E., Zanden, M. J. V., Schierup, H. H., Christoffersen, K., & Lodge, D. M. (2003). From Greenland to green lakes: cultural eutrophication and the loss of benthic pathways in lakes. *Limnology and Oceanography*, 48(4), 1408-1418.
- Vinebrooke, R. D., & Leavitt, P. R. 1999. Phytobenthos and phytoplankton as potential indicators of climate change in mountain lakes and ponds: a HPLC-based pigment approach. *Journal of North American Benthological Society* 18, 14–32.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: lake and river ecosystems*. Academic Press.
- Wehr, J.D. & Sheath, R.G. 2003. *Freshwater algae of North America: ecology and classification*. Academic Press, San Diego.
- Woodruff, S.L., House, W.A., Callow, M.E. & Leadbeater, B.S.C. 1999. The effects of biofilms on chemical processes in surficial sediments. *Freshwater Biology* 41, 73-89.