



A VARIABILIDADE AMBIENTAL INFLUENCIA A COMPOSIÇÃO E BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA DE UM RESERVATÓRIO NEOTROPICAL

Bárbara Marques dos Santos¹, Silvia Moreira dos Santos², Cláudia Alves de Souza², Carlos Roberto Alves dos Santos³ & Jascieli Carla Bortolini^{1}*

¹ Universidade Federal de Goiás, Instituto de Ciências Biológicas, Departamento de Botânica, Avenida Esperança, CEP 74690-900 Goiânia, GO, Brasil.

² Companhia Saneamento de Goiás S/A, Avenida Vereador José Monteiro, nº 1953, CEP 74650-300, Goiânia, GO, Brasil.

³ Companhia Saneamento de Goiás S/A, Avenida Comendador Negrão de Lima, nº 351, CEP 74650-030, Goiânia, GO, Brasil.

E-mails: barbara.marques103@gmail.com; silviamoreira@saneago.com.br; claudiasouza@saneago.com.br; crasanto@gmail.com; jcbortolini@ufg.br (*autor correspondente).

Resumo: O fitoplâncton é um importante modelo do funcionamento dos ambientes aquáticos, respondendo diretamente à variabilidade ambiental no espaço e no tempo. Por isso, representa uma excelente ferramenta para o monitoramento de reservatórios, que compreendem ecossistemas altamente heterogêneos longitudinalmente, influenciando na estrutura e distribuição das espécies fitoplanctônicas. O objetivo deste estudo foi investigar a variação da composição e biomassa fitoplanctônica em um reservatório no estado de Goiás, Brasil, e avaliar como estes organismos respondem a variabilidade ambiental ao longo da extensão espacial em períodos de seca e chuva. O fitoplâncton e variáveis ambientais foram coletados durante um período seco e outro chuvoso ao longo de sete locais de amostragem, distribuídos em regiões a jusante da barragem, lacustre, intermediária e lótica do reservatório. A composição e biomassa fitoplanctônica foram utilizadas como resposta à variabilidade ambiental espacial e temporal. Nós registramos uma variação espaço-temporal significativa da temperatura da água, turbidez, nutrientes e biomassa fitoplanctônica. Cianobactérias apresentaram a maior biomassa nas regiões lacustre e intermediária, enquanto as diatomáceas na região lótica, em ambos os períodos hidrológicos. A maior biomassa fitoplanctônica total foi registrada no período chuvoso. Ocorreu uma clara relação entre a comunidade fitoplanctônica e a variabilidade ambiental, sendo que temperatura da água, turbidez e ferro solúvel apresentaram a maior influência sobre a estruturação da biomassa. Deste modo, a composição e biomassa fitoplanctônica podem ser importantes métricas do funcionamento dos reservatórios, e, portanto, o estudo do fitoplâncton nestes ecossistemas é de interesse no seu monitoramento, desde que reservatórios possuem grande relevância ecológica, econômica ou de saúde pública.

Palavras-Chave: algas planctônicas; barragem; biovolume; cianobactérias; zonação longitudinal.

ENVIRONMENTAL VARIABILITY INFLUENCES THE PHYTOPLANKTON COMPOSITION AND BIOMASS OF A NEOTROPICAL RESERVOIR: Phytoplankton is an important model of the aquatic environments functioning, responding directly to environmental variability in space and time. Therefore, represents an excellent tool for the monitoring of reservoirs, which comprise highly heterogeneous ecosystems longitudinally, influencing the structure and distribution of phytoplankton

species. The objective of this study was to investigate the variation in the composition and biomass of the phytoplankton in a reservoir in the Goiás state, Brazil, and how these organisms respond to environmental variability along the reservoir spatial extent in dry and rainy periods. The phytoplankton and environmental variables were collected during one dry period and other rainy, over seven sampling sites, distributed in the regions downstream of the dam, lacustrine, intermediate and lotic of the reservoir. The composition and biomass of the phytoplankton community were measured as a response to the spatial and temporal environmental variability. We recorded a spatio-temporal variation in water temperature, light, nutrients, and phytoplankton biomass. Cyanobacteria had the highest biomass in the lacustrine and intermediate regions, while diatoms in the lotic region, in both periods. The highest phytoplankton total biomass was recorded in rainy period. We recorded a clear relation between the phytoplankton biomass and the environmental variability, being that water temperature, turbidity and soluble iron the ones that showed the biggest influence on the biomass structure. Thus, the composition and biomass of the phytoplankton community can be important metrics of reservoirs functioning and, therefore, the phytoplankton study in these ecosystems it's of interest in their monitoring, since reservoirs have great ecological, economic or public health relevance

Keywords: planktonic algae; dam; biovolume; cyanobacteria; longitudinal zonation.

INTRODUÇÃO

Ambientes aquáticos continentais possuem uma vasta biodiversidade, e constituem ecossistemas complexos e ricos em interações entre as comunidades biológicas e o meio abiótico. A comunidade fitoplanctônica, por exemplo, é uma das comunidades base das cadeias tróficas destes ecossistemas, sendo responsável por uma grande fração da produção primária que encaminha energia para os níveis tróficos seguintes (Reynolds 2012). O fitoplâncton pode ser controlado por diferentes fatores bióticos e abióticos, como predação, temperatura, disponibilidade de luz e nutrientes (Reynolds 2006, Brasil & Huszar 2011, Salmaso & Tolotti 2020).

O fitoplâncton é um grupo filogeneticamente diverso, com diferentes características funcionais morfológicas, fisiológicas, comportamentais e de história de vida, que refletem seus aspectos de reprodução, aquisição de recursos e prevenção da predação (Litchman & Klausmeier 2008). Além disso, devido a amplitude das características funcionais desta comunidade, relacionadas à produtividade, ciclo de vida, sensibilidade ao ambiente e produção de toxinas, estes organismos são considerados ótimos indicadores das mudanças ambientais em diferentes escalas (Kruk *et al.* 2017).

Em reservatórios tropicais e subtropicais, por exemplo, estudos têm mostrado a importância

da estrutura fitoplanctônica, especialmente da sua biomassa, como resposta a variabilidade ambiental espacial e temporal (Moreti *et al.* 2013, Souza *et al.* 2016, Santana *et al.* 2017, Sevindik *et al.* 2017, Rodrigues *et al.* 2018, Bortolini *et al.* 2020). Os represamentos são responsáveis pelo rompimento da conectividade longitudinal do rio ocasionando a fragmentação do ambiente que previamente era lótico, alterando a sua dinâmica (Stanford & Ward 2001). Assim, o surgimento de uma zonação longitudinal com regiões lacustres, intermediárias e fluviais, com diferentes velocidades de fluxo, carga de nutrientes e turbidez, influencia a biodiversidade local, como por exemplo, o fitoplâncton (Kimmel *et al.* 1990, Thorton *et al.* 1990).

Além disso, eventos sazonais relacionados aos níveis de precipitação, podem influenciar as condições ambientais no reservatório e na estruturação da comunidade fitoplanctônica (Deus *et al.* 2013). Por exemplo, em períodos de menores precipitações, os fatores determinísticos como disponibilidade de luz e nutrientes podem atuar mais intensamente na seleção do fitoplâncton, enquanto em períodos de maiores precipitações, os mais altos níveis e fluxo de água poderiam mascarar os efeitos ambientais em função dos processos estocásticos, como a maior dispersão do fitoplâncton ao longo do gradiente espacial (Rodrigues *et al.* 2018). Portanto, períodos de seca e chuva ocasionam alterações no nível da

água levando à variação temporal dos aspectos físicos, químicos e biológicos no reservatório, influenciando diretamente na organização da comunidade fitoplanctônica (Pivato *et al.* 2006, Li *et al.* 2018).

Assim, a heterogeneidade das características ambientais influencia diretamente a distribuição espacial e temporal da composição e biomassa fitoplanctônica em reservatórios (Borges *et al.* 2008), selecionando os grupos de organismos de acordo com seus requerimentos (Reynolds *et al.* 2002, Padisák *et al.* 2009, Lv *et al.* 2014, Jati *et al.* 2017). Além disso, a perda ou incremento de biomassa fitoplanctônica pode estar relacionada ao nível da água, tempo de retenção, lavagem hidráulica e choque mecânico (Pivato *et al.* 2006).

Os reservatórios são um tipo cada vez mais comum de ecossistema aquático, e a compreensão do seu funcionamento é essencial para estabelecer estratégias de monitoramento e prioridades de uso (Carneiro & Bini 2020). Estes ecossistemas oferecem importantes serviços ecossistêmicos, como fornecimento de água, hidroeletricidade, irrigação, recreação, navegação (Tundisi *et al.* 2008). Por isso, compreender a estrutura fitoplanctônica nestes ecossistemas pode ser essencial neste monitoramento, para acessar os efeitos que as mudanças ambientais podem exercer sobre a biota aquática, uma vez que as teias tróficas de reservatórios dependem fortemente da dinâmica fitoplanctônica (Znachor *et al.* 2020).

O objetivo deste estudo foi investigar a variabilidade espacial e temporal da comunidade fitoplanctônica de um reservatório neotropical, desde que a composição e biomassa desta comunidade têm influência direta no funcionamento destes ecossistemas. Deste modo, nós esperamos que: i) ao longo da extensão espacial do reservatório, longitudinalmente dividido em regiões a jusante, lacustre, intermediária e lótica, ocorra maiores valores de biomassa nas regiões lacustre e intermediária, especialmente em função da hidrodinâmica lântica; ii) em relação aos períodos hidrológicos, ocorra maior biomassa fitoplanctônica no período seco, especialmente devido ao menor nível de água neste período e à disponibilidade de nutrientes, que favorecem o incremento de biomassa, enquanto no período chuvoso, devido

ao maior nível da água que favorece a maior dispersão estocástica das espécies, ocorra a menor biomassa fitoplanctônica.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido no reservatório de abastecimento João Leite (16° 33' 58.3"S; 49° 12' 45.6"O), localizado na bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite, no centro-oeste do Brasil. A região apresenta clima tropical sazonal com temperatura média para o estado de 23.44 °C (Cardoso *et al.* 2014), com período chuvoso entre outubro e março, e período seco entre abril a setembro, podendo a precipitação chegar a zero neste último período (Costa *et al.* 2012). O reservatório possui uma área de aproximadamente 10.4 km², extensão de aproximadamente 15 km e largura média de 800 m, chegando a uma profundidade próximo a barragem de aproximadamente 36 m (Carmo 2014). Foram estabelecidos sete locais de amostragem ao longo da extensão espacial do reservatório, que estiveram distribuídos da seguinte forma: S1 – a jusante da barragem do reservatório; S2, S3 e S4 – região lacustre do reservatório; S5 e S6 – região intermediária do reservatório; S7 – região lótica do reservatório (Figura 1).

Amostragem e análises das amostras

As amostragens biológicas e abióticas foram realizadas concomitantemente em dois períodos distintos do ciclo hidrológico, sendo uma no período seco (agosto de 2018, N = 7) e outra no período chuvoso (janeiro de 2019, N = 7). Foram mensurados temperatura da água (°C), pH, condutividade elétrica (µS cm) e turbidez (NTU) com potenciômetros digitais portáteis, enquanto o oxigênio dissolvido (mg L⁻¹) foi mensurado por meio do método de titulação (Apha 2017). Foram amostrados 1000 mL de água para a realização de análises de nutrientes, como as formas de nitrogênio (nitrito, nitrato e amônia, mg L⁻¹), fósforo total (mg L⁻¹), ferro total e ferro solúvel (mg L⁻¹) (Apha 2017). O nitrogênio inorgânico dissolvido (NID, mg L⁻¹) foi estimado a partir da soma de nitrito, nitrato e amônia. Dados de precipitação (mm) na área do reservatório foram

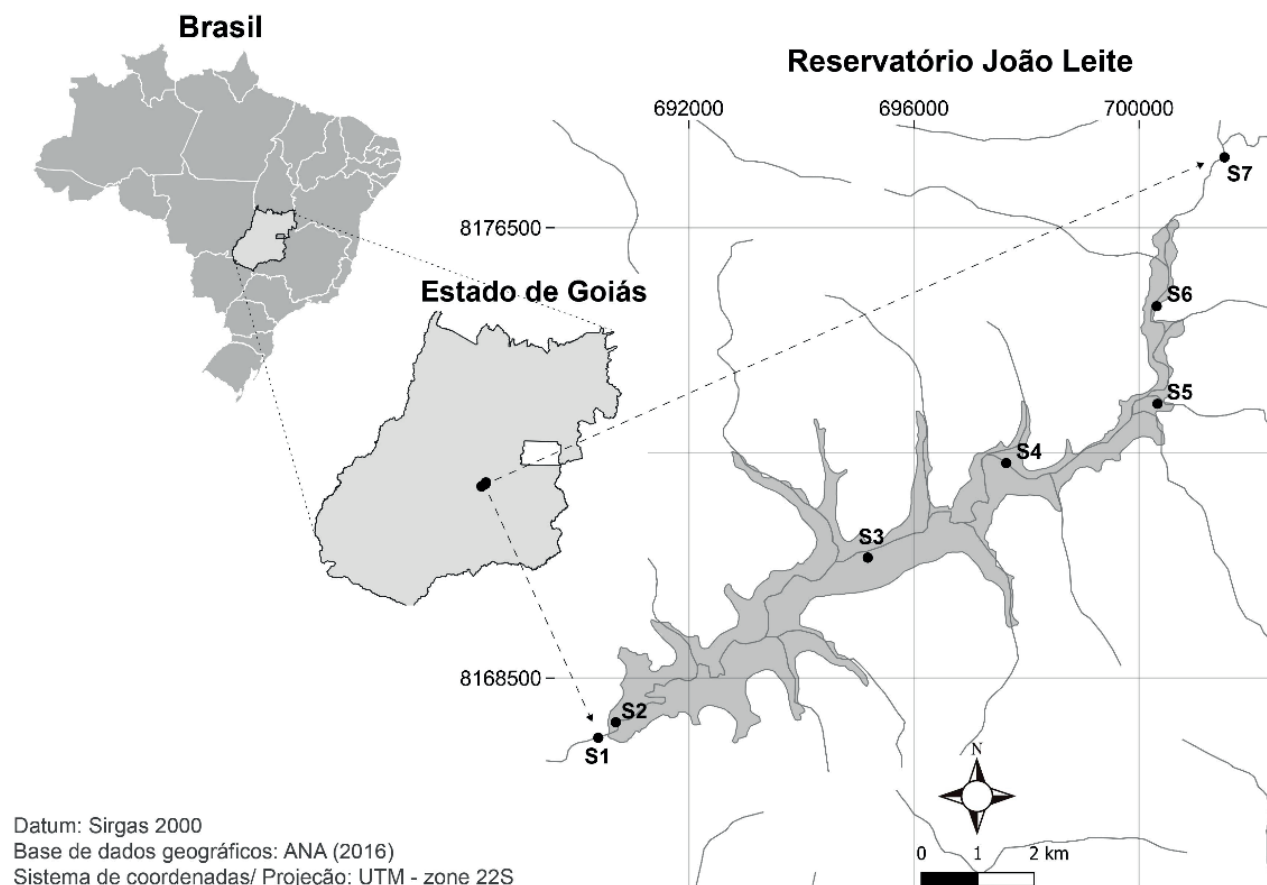


Figura 1. Mapa de localização do reservatório João Leite, GO, Brasil, e locais de amostragem (S1 – jusante; S2, S3 e S4 – região lacustre; S5 e S6 – região intermediária; S7 – região lótica).

Figure 1. Location map of the João Leite reservoir, GO, Brazil, and sampling sites (S1 - downstream; S2, S3 and S4 - lacustrine region; S5 and S6 - intermediate region; S7 - lotic region).

fornecidos pela Companhia Saneamento de Goiás S/A (Saneago).

Amostragens do fitoplâncton foram realizadas diretamente com frascos tipo âmbar com capacidade de 1000 mL à subsuperfície na região limnética de cada local e fixadas *in situ* com solução de lugol acético 1 % (Bicudo & Menezes 2017). A densidade fitoplanctônica foi estimada com um microscópio invertido (modelo Olympus CKX41 em 400x de magnificação), com contagem de 100 campos aleatórios, segundo o método de Utermöhl (1958). A padronização da contagem do número de campos levou em consideração que, embora seja indicado concentrar esforços na identificação das espécies dominantes (Lund *et al.* 1958), não deve ser descartada a enumeração dos organismos raros, para que não seja perdida informações sobre a riqueza específica da comunidade fitoplanctônica (Huszar & Giani 2007).

A densidade fitoplanctônica foi expressa

em indivíduos (células, cenóbios, colônias ou filamentos) por mililitro (ind mL^{-1}), considerando as formas que os organismos ocorrem na natureza. Como riqueza de espécies foi considerado o número total de táxons presentes em cada amostra. A biomassa fitoplanctônica foi estimada a partir do biovolume ($\text{mm}^3 \text{L}^{-1}$), multiplicando-se a densidade de cada táxon pelo seu respectivo volume celular. O volume celular foi determinado a partir de modelos geométricos aproximados as suas respectivas formas celulares, como esferas, cilindros, cones, pirâmides, elipses e outros (Sun & Liu 2003). Sempre que possível, foram medidos no mínimo cinco indivíduos por táxon.

Os táxons identificados foram agrupados em: cianobactérias (Cyanophyceae) – organismos procariontes unicelulares, filamentosos ou coloniais, com potencial de produção de toxinas, e favorecidos principalmente em ambientes com altas concentrações de nutrientes e baixa mistura; algas verdes (Chlorophyceae, Trebouxiophyceae,

Pedinophyceae, Nephrophyceae e Prasinophyceae) – organismos eucariontes unicelulares, coloniais ou filamentosos, favorecidos principalmente em ambientes com alta disponibilidade luminosa; diatomáceas (Bacillariophyceae, Coscinodiscophyceae e Mediophyceae) – organismos eucariontes, muitos unicelulares, com parede celular de sílica e resistentes a alta turbulência; flagelados mixotróficos (Cryptophyceae, Crysoophyceae, Euglenophyceae e Dinophyceae) – organismos eucariontes, unicelulares flagelados, autotróficos ou heterotróficos, favorecidos em baixa disponibilidade luminosa e altas concentrações de matéria orgânica; desmídeas (Zygnematales) – organismos eucariontes, principalmente unicelulares, característicos de ambientes oligotróficos, ligeiramente ácidos e distróficos (Bellinger & Sigeo 2011). As classes taxonômicas mencionadas estão de acordo com Bicudo & Menezes (2017).

Análise de dados

Para avaliar a variabilidade ambiental, nós calculamos os coeficientes de variação (CV em %) de cada variável obtida em cada local e período hidrológico. Além disso, nós também testamos as diferenças das variáveis ambientais entre regiões do reservatório (jusante, lacustre, intermediária e lótica) e períodos hidrológicos (seca e chuva) utilizando uma Análise de Variância Permutacional Multivariada Não-Paramétrica (função *adonis*), desde que esta análise utiliza métodos baseados em permutação e permite testar dados multivariados com maior rigor (Permanova; Anderson 2001). Nós também utilizamos a Permanova para testar diferenças na biomassa fitoplanctônica entre as regiões do reservatório e períodos hidrológicos. Para investigar a relação do fitoplâncton com a variabilidade ambiental, foi realizada uma Análise de Redundância (RDA), utilizando a biomassa como variável resposta e as variáveis ambientais mensuradas como variáveis preditoras. Para a matriz resposta foi aplicada a transformação de Hellinger (função *decostand*) uma vez que a RDA é um método linear, além de diminuir o efeito de duplos zeros como similaridades entre locais (Boccard *et al.* 2011). Na matriz ambiental foi aplicado o fator de

inflação de variância (VIF > 10) para verificar a existência de multicolinearidade entre as variáveis. A seleção das variáveis preditoras de maior significância foi realizada utilizando o método *forward* ($p < 0,05$; 999 permutações; função *ordistep*). As análises foram realizadas no ambiente R (R Development Core Team 2017) com pacote *vegan* (Oksanen *et al.* 2019).

RESULTADOS

Variabilidade ambiental no reservatório

Nós registramos uma precipitação média de 0,33 mm e acumulado de 10,3 mm no período seco, enquanto no período chuvoso a precipitação média foi de 1,65 mm e acumulado de 51,3 mm. Os valores de pH foram maiores na região lacustre, em ambos os períodos. A maior turbidez foi registrada no período chuvoso, especialmente na região lótica, enquanto a menor turbidez foi registrada nas regiões lacustre e a jusante, em ambos os períodos. A condutividade elétrica apresentou os maiores valores na região lótica, e os menores nas regiões lacustre e jusante, em ambos os períodos. O oxigênio dissolvido apresentou os menores valores na região lótica, e os maiores nas regiões lacustre e jusante, em ambos os períodos. As maiores concentrações de nutrientes foram registradas no período seco, especialmente nas regiões lacustre, intermediária e lótica (Tabela 1).

Foram registradas diferenças espaciais para temperatura da água ($p = 0,007$), turbidez ($p = 0,014$), ferro solúvel ($p = 0,019$) e ferro total ($p = 0,006$). Diferenças temporais foram registradas para temperatura da água ($p = 0,002$), ferro total ($p = 0,006$) e nitrogênio inorgânico dissolvido ($p = 0,018$).

Composição e biomassa da comunidade fitoplanctônica

Foram registrados 110 táxons fitoplanctônicos nos dois períodos hidrológicos, que estiveram distribuídos em cianobactérias (31), algas verdes (30), diatomáceas (31), flagelados mixotróficos (15) e desmídeas (3) (Tabela S1). Do total de táxons, 27 foram exclusivos do período seco, 43 exclusivos do período chuvoso e 40 registrados em ambos os períodos (Figura 2).

Foram registrados valores de biomassa menores que $2 \text{ mm}^3 \text{ L}^{-1}$ nos locais amostrados

Tabela 1. Valores, coeficiente de variação (CV em %) e resultados da Permanova (L: locais; P: períodos hidrológicos; valor significativo: $p < 0,05$, em negrito) para cada variável ambiental mensurada nos locais e períodos hidrológicos (S1: jusante; S2, S3 e S4: região lacustre; S5 e S6: região intermediária; S7: região lótica; TA: temperatura da água; TUR: turbidez; FS: ferro solúvel; FT: ferro total; PT: fósforo total; NID: nitrogênio inorgânico dissolvido; CE: condutividade elétrica; OD: oxigênio dissolvido).

Table 1. Values, coefficient of variation (CV in %) and Permanova results (L: sites; P: hydrological periods; significant value: $p < 0,05$, in bold) for each environmental variable measured in the sites and hydrological periods (S1: downstream; S2, S3 and S4: lacustrine region; S5 and S6: intermediate region; S7: lotic region; TA: water temperature; TUR: turbidity; FS: soluble iron; FT: total iron; PT: total phosphorus; NID: dissolved inorganic nitrogen; CE: electrical conductivity; OD: dissolved oxygen).

	Período Seco							Período Chuvoso							Permanova			
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	CV	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	CV	L	P
TA	23,45	23,35	23,30	23,21	23,35	22,02	19,27	6,80	29,06	28,41	28,27	28,20	28,40	25,10	23,76	7,40	0,007	0,002
TUR	1,80	2	1,40	3,20	4,60	18	9	105	2,40	1,7	2	2,90	5,10	4,50	31	150	0,014	0,759
pH	7,06	7,31	7,33	7,71	7,63	6,77	6,69	5,50	7,41	7,67	7,49	7,58	7,57	7,16	7,26	2,40	0,202	0,253
FS	0,06	0,12	0,08	0,07	0,60	1,26	0,36	153	0,01	0,04	0,01	0,01	0,24	0,28	0,85	149	0,019	0,050
FT	0,24	0,16	0,14	0,21	0,33	2,33	1,13	126	0,05	0,05	0,02	0,08	0,34	0,63	2,46	170	0,006	0,045
PT	0,03	0,06	0,05	0,01	0,10	0,04	0,09	55	0,001	0,02	0,07	0,04	0,02	0,005	0,02	94	0,402	0,058
NIDD	0,41	0,29	0,22	0,34	0,35	0,80	0,62	47	0,05	0,17	0,08	0,03	0,10	0,36	0,345	82	0,296	0,018
CE	112,4	111,9	112	112,2	111,7	120	122	3,8	110	110	110	110	112	112	120,6	3,40	0,050	0,106
OD	7,81	7,95	8,14	8,26	8,18	4,43	4,91	23	7,65	7,72	7,55	7,76	8	7,55	7,27	2,90	0,298	0,415

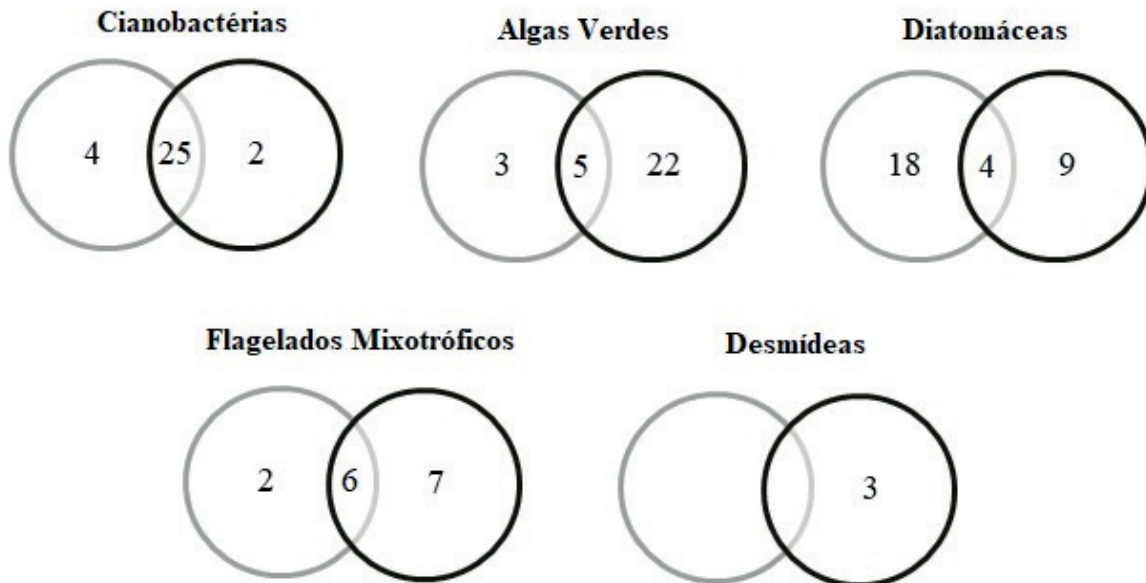


Figura 2. Diagramas de Venn (Autor B.M.S.) com o número de táxons exclusivos e compartilhados no período seco (círculo cinza) e chuvoso (círculo preto) no reservatório João Leite, GO, Brasil.

Figure 2. Venn diagrams (Author B. M. S.) with the number of exclusive and shared taxa in dry (gray circle) and rainy period (black circle) in the João Leite reservoir, GO, Brazil.

na seca e chuva, exceto em S3 ($3,02 \text{ mm}^3 \text{ L}^{-1}$) e S4 ($2,33 \text{ mm}^3 \text{ L}^{-1}$) no período chuvoso, enquanto os menores valores foram registrados na S7 ($0,07 \text{ mm}^3 \text{ L}^{-1}$) também no período chuvoso (Figura 3). De acordo com a Permanova foram registradas diferenças significativas da biomassa fitoplanctônica entre as regiões do reservatório ($p = 0,001$) e entre os períodos hidrológicos ($p = 0,001$).

As cianobactérias contribuíram com a maior biomassa nos períodos seco e chuvoso, especialmente com *Planktolyngbya limnetica* Komárková-Legnerová & Cronberg, *Snowella atomus* Komárek & Hindák e *Cyanodictyon imperfectum* Cronberg & Weibull. No entanto, durante o período chuvoso, as algas verdes e os flagelados mixotróficos também contribuíram para a biomassa nas regiões lacustre e intermediária. As algas verdes com maior contribuição foram *Coenococcus planctonicus* Korshikov e *Oocystis lacustris* Chodat, enquanto *Dinobryon bavaricum* Imhof, *Dinobryon sertularia* Ehrenberg e *Cryptomonas brasiliensis* A. Castro, C. Bicudo & D. Bicudo contribuíram para a biomassa dos flagelados mixotróficos. As diatomáceas apresentaram contribuição especialmente na região lótica (S7) nos dois períodos hidrológicos,

porém com maior biomassa no período seco. As desmídeas apresentaram baixa contribuição para a biomassa, sendo registradas apenas no período chuvoso.

Biomassa fitoplanctônica e relação com variáveis ambientais

A RDA evidenciou uma separação espacial e temporal da biomassa fitoplanctônica, especialmente em relação a região lótica (S7), demonstrando a influência da variabilidade ambiental sobre a comunidade ($\text{adj } R^2 = 0,52$, $p = 0,005$). O eixo 1 (36 %, $p = 0,007$) e eixo 2 (18 %, $p = 0,005$) demonstraram uma clara distinção dos grupos taxonômicos entre os locais e períodos amostrados. A direita do diagrama foi demonstrada a relação das maiores concentrações de ferro solúvel ($p = 0,007$) e maior turbidez ($p = 0,012$) associada à região lótica e a biomassa das diatomáceas, enquanto a esquerda, as regiões intermediária, lacustre e jusante de ambos os períodos estiveram associadas às maiores temperaturas ($p = 0,003$), e com grande parte da biomassa das cianobactérias, flagelados mixotróficos, algas verdes e desmídeas (Figura 4).

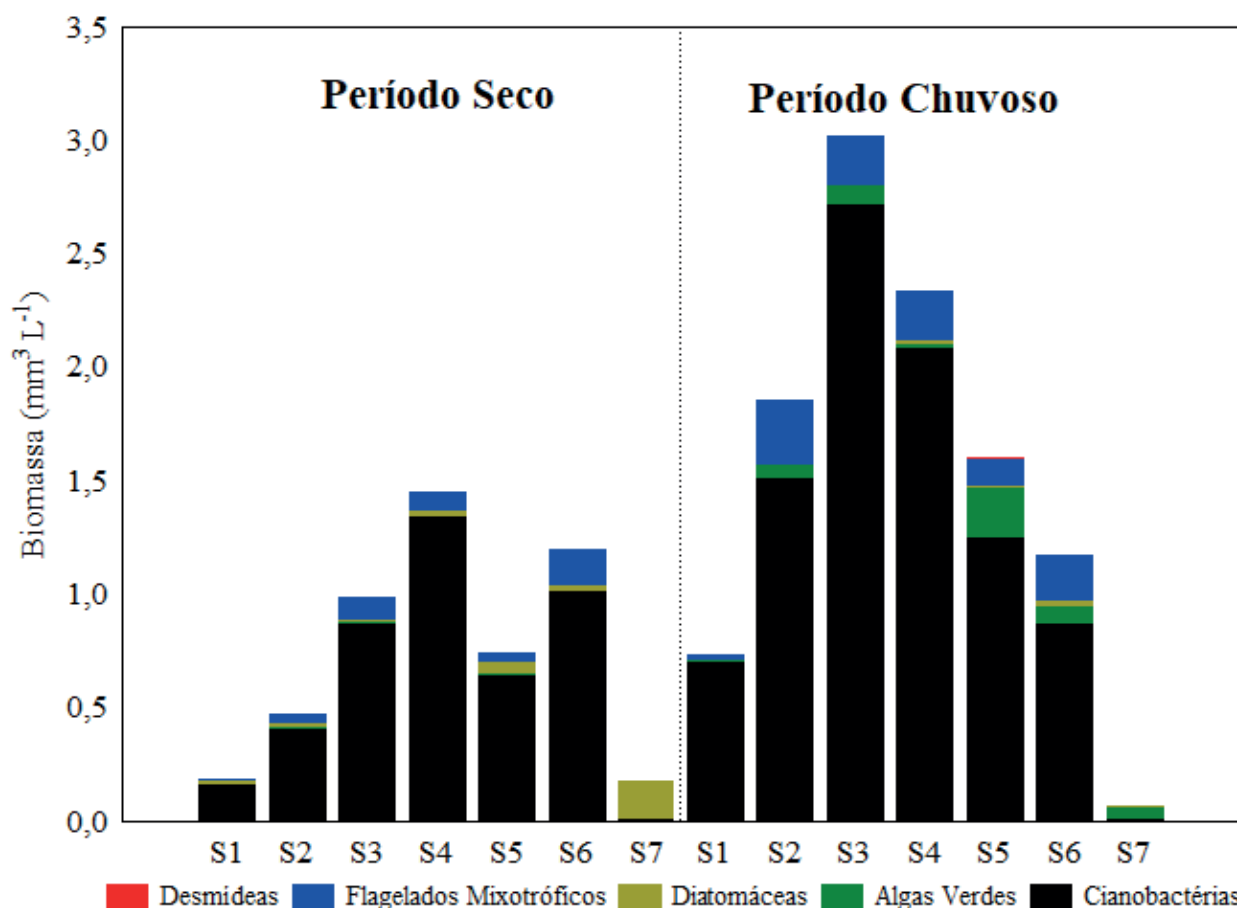


Figura 3. Distribuição espacial e temporal da biomassa fitoplanctônica no reservatório João Leite, GO, Brasil, no período seco e chuvoso.

Figure 3. Spatial and temporal distribution of phytoplankton biomass in the João Leite reservoir, GO, Brazil, in dry and rainy periods.

DISCUSSÃO

Nossos resultados demonstraram a clara variabilidade da composição e biomassa fitoplanctônica ao longo da extensão longitudinal do reservatório assim como entre os períodos hidrológicos. Nós registramos uma variabilidade espacial e temporal no reservatório associada especialmente com a temperatura da água, turbidez e concentrações de nutrientes, como ferro e nitrogênio inorgânico dissolvido. Assim, além da regionalização espacial do reservatório (Kimmel *et al.* 1990), a variabilidade dos períodos hidrológicos que, no centro-oeste são marcantes, especialmente em relação a diferenças de umidade do ar e de precipitação (Costa *et al.* 2012), parecem ser importantes fatores direcionadores da composição e biomassa fitoplanctônica.

Na extensão espacial, nós registramos diferenças de biomassa entre as regiões do

reservatório, com maiores valores nos locais da região lacustre e intermediária do reservatório, e os menores na região lótica e jusante. A variabilidade espacial nestes ecossistemas está diretamente associada às variações no fluxo da água e no tempo de retenção de cada zona (Thornton *et al.* 1990), além da disponibilidade luminosa e nutrientes que afetam diretamente o fitoplâncton. Deste modo, a resposta da comunidade ao ambiente define a distribuição das espécies e a variação na sua estrutura (Rodrigues *et al.* 2018), como verificado em nosso estudo.

Diferentemente do que esperávamos, o período chuvoso apresentou a maior biomassa, principalmente nos locais das regiões jusante, lacustre e intermediária do reservatório. Este fato pode ter relação com a maior dispersão estocástica devido ao aumento do fluxo de água neste período, que ocasiona lavagem hidráulica. Além disso, a maior contribuição na composição taxonômica e

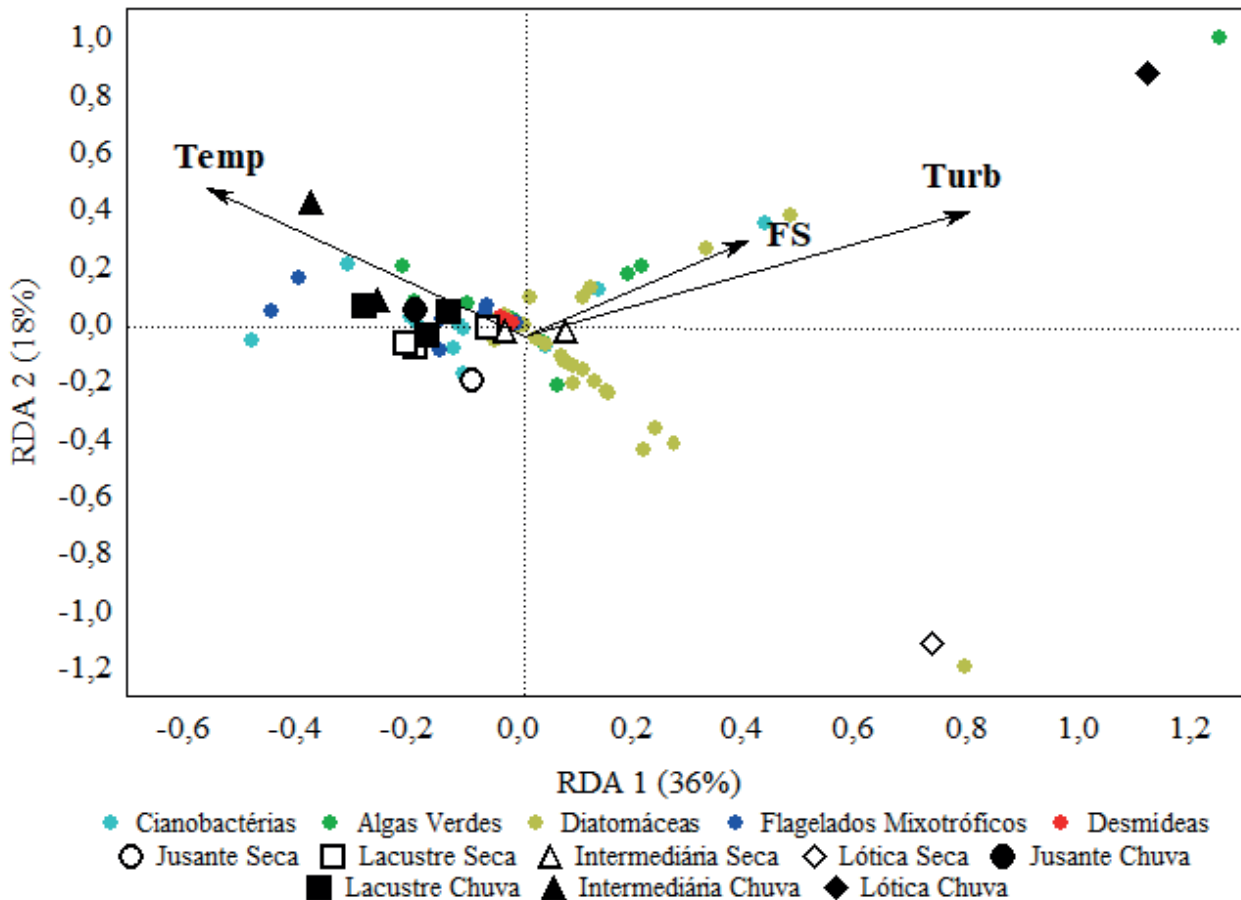


Figura 4. Análise de redundância realizada com a biomassa fitoplanctônica, variáveis ambientais (são apresentadas apenas as variáveis selecionadas e significativas) e locais amostrados nos períodos seco e chuvoso no reservatório João Leite, GO, Brasil (Temp – temperatura da água; FS – ferro solúvel; Turb – turbidez).

Figure 4. Redundancy analysis performed with phytoplankton biomass, environmental variables (only selected and significant variables are shown) and sampling sites in the dry and rainy periods in the João Leite reservoir, GO, Brazil (Temp - water temperature; FS - soluble iron; Turb - turbidity).

biomassa de algas verdes e flagelados mixotróficos neste período, pode corroborar este fato. Apesar da menor biomassa verificada durante o período seco, tal situação pode estar relacionada não ao fato de existir baixa abundância de organismos, mas sim às características morfológicas dos táxons, que em sua maioria foram constituídos de cianobactérias de baixo volume e tamanho celular, como *P. limnetica*, *S. atomus* e *C. imperfectum* (Kruk & Segura 2012).

As cianobactérias foram os principais representantes no fitoplâncton em ambos os períodos hidrológicos e na maioria dos locais, associadas especialmente à temperatura da água, como verificado pela RDA. A temperatura tem sido apontada como um importante fator no desenvolvimento das cianobactérias (Cha *et*

al. 2017, Dalu & Wasserman 2018). Além disso, a sua proliferação e persistência estão diretamente relacionadas com o carreamento de nutrientes no ecossistema e alterações hidrodinâmicas (Burford *et al.* 2020, Znachor *et al.* 2020). De fato, a entrada de nutrientes pelos tributários que sustentam o reservatório estudado devido as intensas atividades agropecuárias na região (Carneiro *et al.* 2010), sugerem que pode haver influência positiva sobre a biomassa das cianobactérias, e, portanto, é essencial a necessidade de monitoramento, especialmente pela potencialidade da produção de toxinas de muitos táxons (Bittencourt-Oliveira *et al.* 2014). Os táxons de importante contribuição em biomassa em nosso estudo apresentam uma amplitude de suporte ambiental que pode variar desde ambientes rasos a profundos, e oligo a

eutróficos (Reynolds *et al.* 2002, Padisák *et al.* 2009).

As diatomáceas apresentaram maior contribuição para a biomassa na região lótica do reservatório, especialmente no período seco. A predominância de diatomáceas neste local pode estar relacionada com a preferência por ambientes aquáticos de elevada turbidez e alta mistura da coluna de água (Reynolds *et al.* 2002). Embora as diatomáceas também tenham sido registradas nas regiões intermediárias, lacustre e jusante, o que pode estar associado a facilitação da dispersão devido a conectividade entre os locais, os valores de biomassa foram muito inferiores aos verificados na região lótica. Já no período chuvoso, em que a contribuição de diatomáceas para a biomassa foi menor, pode estar associada a expansão do ambiente, decorrente da temporada de chuvas, ocasionando um decréscimo na biomassa do grupo devido à lavagem hidráulica (Pivato *et al.* 2006).

As algas verdes estiveram presentes na maioria dos locais, em ambos os períodos, com maior biomassa na região intermediária no período chuvoso. Este grupo é altamente cosmopolita e recorrente em águas tropicais, respondendo à variadas concentrações de nutrientes, temperaturas, disponibilidade luminosa, dentre outros (Kruk & Segura 2012). Já os organismos mixotróficos apresentaram contribuições para a biomassa em todos os locais, tanto no período seco quanto no chuvoso, exceto na região lótica. Algas mixotróficas além de serem oportunistas, possuem alta resiliência e resistência à diferentes condições ambientais (Burkholder *et al.* 2008). A estratégia mixotrófica pode ser uma vantagem competitiva sobre os autotróficos estritos, indicando que o ciclo microbiano pode ter um papel importante no fluxo de energia e carbono para níveis tróficos mais altos da cadeia alimentar de um reservatório (Jati *et al.* 2017). Embora a contribuição para a biomassa não tenha sido tão elevada quando em comparação a outros grupos, estas algas foram registradas ao longo de todo o estudo.

Já as desmídeas, contribuíram com apenas três táxons durante o período chuvoso. As desmídeas são associadas principalmente ao perifíton, que por sua vez, pode estar relacionado à distintas regiões de um reservatório, ao período sazonal, à

menor velocidade de corrente, a maior temperatura e transparência (Felisberto *et al.* 2014). Deste modo, nós especulamos que o aumento do fluxo da água ocasionado pelas chuvas pode ter ocasionado o desprendimento dos organismos dos seus substratos carregando-os para a região pelágica, uma vez que os mesmos apresentaram baixa biomassa em nosso estudo.

Nossos resultados mostram, portanto, que a variabilidade ambiental ocasionada pela regionalização espacial do reservatório e da sazonalidade do ciclo hidrológico, são importantes direcionadores da composição e biomassa fitoplanctônica. Portanto, nossa primeira predição, sobre a variação da biomassa entre os locais amostrados, com expectativas de ocorrência de maiores valores nas regiões intermediária e lacustre do reservatório, foi corroborada, indicando a influência positiva das condições ambientais destas regiões sobre o fitoplâncton. Em relação a nossa segunda predição, a biomassa total da comunidade foi maior no período chuvoso, não corroborando, portanto, a nossa segunda expectativa. Embora nós esperássemos uma maior dispersão estocástica durante o período chuvoso, o que de fato parece ter acontecido, este processo favoreceu também a ocorrência de táxons de maior biovolume, contribuindo para a maior biomassa da comunidade neste período. Portanto, a comunidade fitoplanctônica, é um importante modelo do funcionamento de reservatórios, respondendo diretamente à variabilidade ambiental, e, assim sendo, o seu estudo nestes ecossistemas é importante no monitoramento ambiental, desde que os reservatórios possuem grande relevância ecológica, econômica ou de saúde pública.

AGRADECIMENTOS

Nós agradecemos a Companhia Saneamento de Goiás S/A (SANEAGO) pelo auxílio na coleta das amostras de fitoplâncton e fornecimento dos dados abióticos. Nós também agradecemos aos revisores anônimos pelas importantes sugestões realizadas em nosso manuscrito.

REFERÊNCIAS

Apha. 2017. Standard Methods for the Examination

- of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Anderson, M. J. 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26(1), 32–46. DOI: 10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x
- Bellinger, E. G., & Sigeo, D. C. 2011. *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell: p. 290.
- Bicudo, C. E. M. & Menezes, M. 2017. Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições. 3ª Ed. São Carlos: RiMa Editora: p. 508.
- Bittencourt-Oliveira, M. C., Piccin-Santos, V., Moura, A. N., Aragão-Tavares, N. K. C., & Cordeiro-Araújo, M. K. 2014. Cyanobacteria, microcystins and cylindrospermopsin in public drinking supply reservoirs of Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(1), 297–309. DOI: 10.1590/0001-3765201302512
- Boccard, D., Gillet, F., & Legendre, P. 2011. *Numerical Ecology with R*. New York: Springer.
- Borges, P. A. F., Train, S., & Rodrigues, L. C. 2008. Spatial and temporal variation of phytoplankton in two subtropical Brazilian reservoirs. *Hydrobiologia*, 607(1), 63–74. DOI: 10.1007/s10750-008-9367-3
- Bortolini, J. C., Silva, P. R. L., Baumgartner, G., & Bueno, N. C. 2020. Environmental filters influencing phytoplankton taxonomic structure in cascade reservoirs. *Brazilian Journal of Botany*, 43, 405–412. DOI: 10.1007/s40415-020-00604-9
- Brasil, J., & Huszar, V. L. M. 2011. O papel dos traços funcionais na ecologia do fitoplâncton continental. *Oecologia Australis*, 15(4), 799–834. DOI: 10.4257/oeco.2011.1504.04
- Burford, M. A., Carey, C. C., Hamilton, D. P., Huisman, J., Paerl, H. W., Wood, S. A., & Wulf, A. 2020. Perspective: Advancing the research agenda for improving understanding of cyanobacteria in a future of global change. *Harmful Algae*, 91, 101601. DOI: 10.1016/j.hal.2019.04.004
- Burkholder, J. M., Glibert, P. M., & Skelton, H. M. 2008. Mixotrophy, a major mode of nutrition for harmful algal species in eutrophic waters. *Harmful algae*, 8(1), 77–93. DOI: 10.1016/j.hal.2008.08.010
- Cardoso M. R. D., Marcuzzo, F. F. N., & Barros, J. R. 2014. Classificação climática de Köppen Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. *Acta Geográfica*, 8(16), 40–55. DOI: 10.5654/acta.v8i16.1384
- Carmo, E. J. S. 2014. *Cianobactérias planctônicas do reservatório do Ribeirão João Leite (Goiás) durante a fase de enchimento: florística e floração*. Dissertação de mestrado. Departamento de Botânica da Universidade Federal de Goiás. p.119.
- Carneiro, F. M., Bini, L. M., & Rodrigues, L. C. 2010. Influence of taxonomic and numerical resolution on the analysis of temporal changes in phytoplankton communities. *Ecological Indicators*, 10(2), 249–255. DOI: 10.1016/j.ecolind.2009.05.004
- Carneiro, F. M., & Bini, L. M. 2020. Revisiting the concept of longitudinal gradients in reservoirs. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 32, e8. DOI: 10.1590/S2179-975X1319
- Cha, Y., Cho, K. H., Lee, H., Kang, T., & Kim, J. H. 2017. The relative importance of water temperature and residence time in predicting cyanobacteria abundance in regulated rivers. *Water Research*, 124, 11–19. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.040
- Costa, H. C., Marcuzzo, F. F. N., Ferreira, O. M., & Andrade, L. R. 2012. Espacialização e sazonalidade da precipitação pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 01(1), 87–100.
- Dalu, T., & Wasserman, R. J. 2018. Cyanobacteria dynamics in a small tropical reservoir: understanding spatio-temporal variability and influence of environmental variables. *Science of the total environment*, 643, 835–841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.256
- Deus, R., Brito, D., Kenov, I. A., Lima, M., Costa, V., Medeiros, A., Neves, R., & Alves, C. N. 2013. Three-dimensional model for analysis of spatial and temporal patterns of phytoplankton in Tucuruí reservoir, Pará, Brazil. *Ecological Modelling*, 253, 28–43. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.10.013
- Felisberto, S. A., Rodrigues, L., & Santos, H. S. 2014. Taxonomical and ecological characteristics of the desmids placoderms in reservoir: analyzing the spatial and temporal distribution. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 26(4), 392–403. DOI: 10.1590/S2179-975X2014000400007

- Huszar, V. L. M., & Giani, A. 2007. Amostragem da comunidade fitoplanctônica em águas continentais: reconhecimento de padrões espaciais e temporais. In: C. E. M. Bicudo & D. C. Bicudo (Eds.), *Amostragem em Limnologia*. pp. 133–147. São Carlos: Rima.
- Kimmel, B. L., Lind, O. T., & Paulson, L. J. 1990. Reservoir primary production. In: K. W. Thornton, B. L. Kimmel & F. E. Payne (Eds.), *Reservoir limnology: ecological perspectives*. pp. 133–193. New York: John Wiley & Sons.
- Kruk, C., & Segura, A. M. 2012. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups. *Hydrobiologia*, 698, 191–202. DOI 10.1007/s10750-012-1072-6
- Kruk, C., Devercelli, M., Huszar, V. L., Hernández, E., Beamud, G., Diaz, M., Silva, L. H. S., & Segura, A. M. 2017. Classification of Reynolds phytoplankton functional groups using individual traits and machine learning techniques. *Freshwater Biology*, 62(10), 1681–1692. DOI: 10.1111/fwb.12968
- Jati, S., Bortolini, J. C., & Train, S. 2017. Mixotrophic species influencing phytoplankton community structuring during the filling phase of a subtropical reservoir. *Brazilian Journal of Botany*, 40(4), 933–941. DOI: 10.1007/s40415-017-0407-y
- Li, Q., Xiao, J., Ou, T., Han, M., Wang, J., Chen, J., Li, Y., & Salmaso, N. 2018. Impact of water level fluctuations on the development of phytoplankton in a large subtropical reservoir: implications for the management of cyanobacteria. *Environmental Science Pollution Research*, 25, 1306–1318. DOI: 10.1007/s11356-017-0502-4
- Litchman, E., & Klausmeier, C. A. 2008. Trait-Based Community Ecology of Phytoplankton. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39, 615–39. DOI: 1543-592X/08/1201-0615\$20.00
- Lv, H., Yang, J., Liu, L., Yu, X., Yu, Z., & Chiang, P. Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China. *Environmental Science Pollution Research*, 21, 5917–5928. DOI 10.1007/s11356-014-2534-3
- Moreti, L. O. R., Martos, L., Bovo-Scomparin, V. M., & Rodrigues, L. C. 2013. Spatial and temporal fluctuation of phytoplankton functional groups in a tropical reservoir. *Acta Scientiarum Biological Sciences*, 35(3), 359–366. DOI: 10.4025/actascibiolsci.v35i3.12988
- Oksanen J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlenn, D., Minchin, P. R., O’Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, H., & Wagner, H. 2019. *Vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-6. Disponível em <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Padisák, J., Crossetti, L. O., & Naselli-Flores, L. 2009. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, 621(1), 1–19. DOI: 10.1007/s10750-008-9645-0
- Pivato, B. M., Train, S., & Rodrigues, L. C. 2006. Dinâmica nictemeral das assembleias fitoplanctônicas em um reservatório tropical (reservatório de Corumbá, Estado de Goiás, Brasil), em dois períodos do ciclo hidrológico. *Acta Scientiarum Biological Sciences*, 28(1), 19–29.
- R Development Core Team, 2017. *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em <http://www.R-project.org/>
- Reynolds, C. S. 2006. *Ecology of Phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Reynolds C. S., Huszar V. L. M., Kruk, C., Naselli-Flores, L., & Melo, S. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 24(5), 417–428. DOI: 10.1093/plankt/24.5.417
- Reynolds, C. 2012. Environmental requirements and habitat preferences of phytoplankton: chance and certainty in species selection. *Botanica Marina*, 55(1), 1–17. DOI: 10.1515/bot.2011.121
- Rodrigues L. C., Pivato, B. M., Vieira L. C. G., Bovo-Scomparin V. M., Bortolini, J. C., Pineda, A., & Train, S. 2018. Use of phytoplankton functional groups as a model of spatial and temporal patterns in reservoirs: a case study in a reservoir of central Brazil. *Hydrobiologia*, 805(1): 147–161. DOI: 10.1007/s10750-017-3289-x
- Salmaso, N., & Tolotti, M. 2020. Phytoplankton and anthropogenic changes in pelagic environments. *Hydrobiologia*. DOI: 10.1007/s10750-020-04323-w

- Santana, L. M., Weithoff, G., & Ferragut, C. 2017. Seasonal and spatial functional shifts in phytoplankton communities of five tropical reservoirs. *Aquatic Ecology*, 51(4): 531–543. DOI: 10.1007/s10452-017-9634-3.
- Sevindik, T. O., Çelik, K., & Naselli-Flores, L. 2017. Spatial heterogeneity and seasonal succession of phytoplankton functional groups along the vertical gradient in a mesotrophic reservoir. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 53, 129–141. DOI: 10.1051/limn/2016040
- Souza, D. G., Bueno, N. C., Bortolini, J. C., Rodrigues, L. C., Bovo-Scomparin, V. M., & Franco, G. M. S. 2016. Phytoplankton functional groups in a subtropical Brazilian reservoir: responses to impoundment. *Hydrobiologia*, 779(1), 47–57. DOI: 10.1007/s10750-016-2798-3
- Stanford, J. A., & Ward, J. V. 2001. Revisiting the serial discontinuity concept. *Regulated Rivers: Research & Management*, 17, 303–310. DOI: 10.1002/rrr.659
- Sun, J., & Liu, D. 2003. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 25(11), 1331–1346. DOI: 10.1093/plankt/fbg096
- Thornton, K. W. 1990. Sedimentary processes. In: K. W. Thornton, B. L. Kimmel, F. E. Payne (Eds.), *Reservoir limnology: ecological perspectives*, New York: Wiley & Sons.
- Tundisi, J. G., Matsumura-Tundisi, T., & Tundisi, J. E. M. 2008. Reservoirs and human well being: new challenges for evaluating impacts and benefits in the neotropics. *Brazilian Journal of Biology*, 68(4-Suppl.), 1133–1135.
- Utermöhl, H. 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen phytoplankton-methodic. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 9(1), 1–39.
- Znachor, P., Nedoma, J., Hejzlar, J., Sedá, J., Komárková, J., Kolář, V., Mrkvička, T., & Boukal, D. S. 2020. Changing environmental conditions underpin long-term patterns of phytoplankton in a freshwater reservoir. *Science of the Total Environment*, 710, 135626. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135626

Material Suplementar:

Tabela S1. Composição taxonômica do fitoplâncton registrada no reservatório João Leite, Goiás, Brasil (círculo preto - presença; traço – ausência).

Table S1. *Phytoplankton taxonomic composition recorded in the João Leite reservoir, Goiás, Brazil (black circle - presence; dash - absence).*

Submitted: 22 April 2020

Accepted: 17 September 2020

Published on line: 05 October 2020

Associate Editor: Babara Dunck