



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA - UEPB**  
***CAMPUS I***  
**CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE - CCBS**  
**CURSO DE LICENCIATURA EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

**RANIELLE DAIANA DOS SANTOS SILVA**

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE CIANOBACTÉRIAS E CIANOTOXINAS  
EM RESERVATÓRIOS NO TRÓPICO-SEMIÁRIDO.**

**CAMPINA GRANDE**  
**2017**

**RANIELLE DAIANA DOS SANTOS SILVA**

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE CIANOBACTÉRIAS E CIANOTOXINAS  
EM RESERVATÓRIOS NO TROPICO-SEMIÁRIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto ao Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Graduado em Licenciatura em Ciências Biológicas.

**Área de concentração:** Ecologia /Limnologia.

**Orientador:** Prof. Dr. José Etham de Lucena Barbosa (UEPB).

**Co-Orientadora:** Profa. Dr. Juliana dos Santos Severiano (IFPB).

**CAMPINA GRANDE  
2017**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586v Silva, Ranielle Daiana dos Santos.  
Variação espaço-temporal de cianobactérias e cianotoxinas em reservatórios no trópico-semiárido [manuscrito] : / Ranielle Daiana dos Santos Silva. - 2017.  
37 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, 2017.

"Orientação : Prof. Dr. José Etham de Lucena Barbosa, Coordenação de Curso de Biologia - CCBS."

"Coorientação: Profa. Dra. Juliana dos Santos Severiano, IFPB - Instituto Federal da Paraíba"

1. Biovolume. 2. Cianotoxinas. 3. Cianobactérias. 4. Reservatórios tropicais.

21. ed. CDD 577.7

**RANIELLE DAIANA DOS SANTOS SILVA**

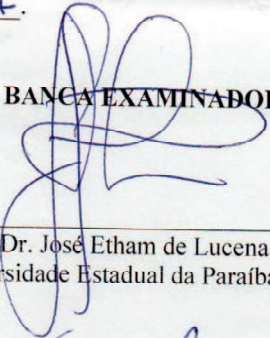
**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE CIANOBACTÉRIAS E  
CIANOTOXINAS EM RESERVATÓRIOS NO TRÓPICO-SEMIÁRIDO**

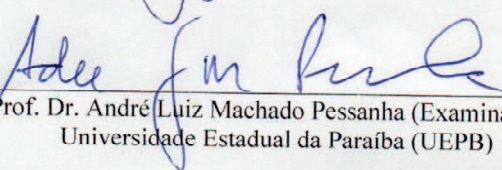
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado junto ao Curso de  
Licenciatura em Ciências Biológicas da  
Universidade Estadual da Paraíba, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Graduado em Licenciatura em Ciências  
Biológicas.

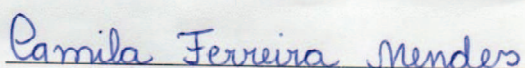
**Área de concentração:** Ecologia /  
Limnologia.

Aprovada em: 14/12/2017.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Etham de Lucena Barbosa  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. André Luiz Machado Pessanha (Examinadora)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

  
\_\_\_\_\_  
MSc. Camila Ferreira Mendes (Examinadora)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Aos meus pais e ao meu padrinho, por todo amor,  
apoio, carinho, compreensão e incentivo a sempre  
lutar pelos meus estudos e nunca desistir, **DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

*Um dia sonhei em ser bióloga, vivenciar o mundo da pesquisa e conhecer um pouco mais sobre esse universo tão complexo chamado vida! Esse sonho parecia muito distante... Eu era apenas uma menina sonhadora da Zona Rural de Barra de Santana. Passar no vestibular era mesmo um grande desafio a ser vencido e para meus pais uma grande conquista! Em 30 de abril de 2014 iniciou o meu grande sonho... Mas aquele foi apenas o primeiro passo! "Mas e agora? Como vou estudar se não tenho transporte, nem mesmo condições de morar em Campina?" Mas como tudo que acontece abaixo deste imenso céu só ocorre com a permissão dEle, comigo não foi diferente! Por isso, MEU DEUS eu te agradeço! Agradeço por me guiar mesmo quando os meus olhos não enxergavam o caminho; agradeço ter colocado tantos anjos em meu caminho; por me tornar forte e lutar com persistência por tudo que quero! Obrigada por me sustentar em tantos momentos que estive fraca e não tive forças para caminhar! A ti toda honra e glória!*

*Agradeço aos meus pais por todo amor, dedicação e cuidado. Obrigada por me ensinar a trilhar o caminho do bem, por todo incentivo a prosseguir com meus estudos. Por todas palavras de apoio, carinho e de um amor incondicional ocultas em seus conselhos! Mãinha o seu jeito inocente e doce me ensina a nunca perder a essência, e ter alma de criança mesmo já sendo uma mulher... E o Senhor Paiinho não sabes o quanto és sábio! Obrigada*

por sempre estar ao meu lado, e querer o meu melhor! Vocês são o reflexo mais lindo e sincero do que venha ser PAI e MÃE, obrigada por cuidar tão bem de mim, dos meus irmãos Welisson e Nayara, e sobrinhos Wesley e Kaio. Amo incondicionalmente vocês, minhas jóias preciosas! A Welisson e Nayara por compartilhar comigo tantos momentos especiais, conselhos, e palavras de conforto. Eu amo vocês! Aos meus sobrinhos Wesley e Kaio, meus amores, vocês são e sempre serão meus bebês!

Agradeço ao meu padrinho Vavá por todo amor e carinho. Agradeço padrinho poro senhor ter estendido a mão quando mais precisei, me ajudando financeiramente durante o curso. És para mim verdadeiramente um segundo pai! Obrigada por vibrar com minhas conquistas e apoiar meus sonhos. Obrigada por reclamar quando ando de moto-táxi, ou chego tarde a noite rsrs (sempre muito protetor), por se preocupar tanto com o meu bem-estar... Serei eternamente grata por tudo que fizestes e faz por mim!

A minhas amigas Larissa e Eliane que me acolheram na “casa das loucas” rsrs. Meus sinceros e profundos agradecimentos a você Larissa, pessoa que apenas “conhecia de vista”, jamais esquecerei o quanto me destes forças e estimulasse a cursar biologia. E você Eliane... nem mesmo te conhecia e você estava ali com um coração enorme disposta ajudar, sempre com conselhos tão sábios, obrigada por ter sido amiga, psicóloga e professora de matemática rsrsrs. Sem esquecer da minha companheira de quarto, a mais badalada da casa... Karina, obrigada “Quaquá” por compartilhar tantas risadas, estresses, revoltas, e bons momentos rsrs... pelos conselhos e

*mais ainda por matar as baratas no meio da noite para mim sem reclamar rsrsrsrsrs. Vocês foram três lindos anjos que Deus colocou em meu caminho, que hoje chamo de amigas.*

*Obrigada a você (Gilvan), meu esposo, meu amor. Por todos os momentos de compreensão e incentivo, por me motivar a nunca baixar a cabeça e sempre dar o meu melhor! Obrigada por estar presente em boa parte desta minha trajetória (dois anos de curso) e me fazer ser mais determinada e exigente com meus estudos, pois junto das responsabilidades do casamento veio também uma redução no tempo para me dedicar a universidade... Mas, este foi apenas um motivo que me fez ser mais esforçada e conseguir conciliar casamento, disciplinas, Pibic, monitoria conseguindo passar por tudo sem perder disciplinas ao longo do curso. Obrigada querido por todo companheirismo e amor!*

*Aos meus amigos de turma Juliana, Emanuelle, Eduardo, Paulinha, Alana, Léo, Iran, Rayssa, Martinho, Joeliton e Isa por todo carinho, e maravilhosos momentos. Especialmente a vocês meu primo Geniellyson e minha grande amiga Dayany, obrigada por vivenciar tantos perrengues unidos, um cuidando do outro, por todo cuidado e proteção de irmãos que vocês sempre tiveram comigo. Agradeço de todo coração a você Dayany, por ter sido companheira, cúmplice, por todos os conselhos, e amizade que construímos. Como diz paiinho, somos mais que amigas, somos como irmãs! Obrigada por tudo!*



*As amigas do laboratório de ecologia aquática (Leaq), Vanessa, Rosa, Morgana, Millena, Dani, Larissa, e aos técnicos Adriano e Clímélia, pela convivência diária, ensinamentos e bons momentos vividos. A Camila por ter me auxiliado inúmeras vezes com a identificação de espécies, e pelos bons momentos e ensinamentos durante as coletas. Aos meus grandes amigos Patrícia e Leandro, por toda amizade e conhecimento que vocês me passaram. Obrigada por acreditar no meu potencial, por todos os conselhos, por sempre quererem minha melhoria. Vocês foram muito importantes na minha vida, meus grandes professores e eternos amigos! Tenham certeza que jamais esquecerei de vocês e de todos ensinamentos, serei eternamente grata!*

*Ao meu orientador José Etham, por ter me proporcionado a oportunidade de fazer parte de seu grupo de pesquisa. Pelos os ensinamentos, dicas, sugestões que foram essenciais para meu crescimento acadêmico. Obrigada professor pela confiança, dedicação, respeito e compreensão. Agradeço por despertar em mim o encanto pela pesquisa, particularmente pela limnologia.*

*Agradeço a minha co-orientadora Juliana, por todos conhecimentos passados, por iluminar o caminho de minha pesquisa, me fazer enxergar os erros e a desenvolver da melhor forma. Obrigada pelos puxões de orelhas, pelas críticas que me fizeram crescer, por sua simplicidade e sinceridade, por almejar sempre o melhor, por entender os meus desafios e não deixar cair mesmo em frente aos problemas. Agradeço por suas palavras de compreensão e carinho principalmente nesta reta final. Aprendi*

*muito com você e sei que ainda tenho muito o que aprender, obrigada por toda disponibilidade e dedicação!*

*Por fim, agradeço a todos os professores do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas da UEPB que contribuíram para minha formação e crescimento profissional.*

*E mesmo quando tudo parecia perdido, és que surge uma luz no final do túnel...*

*“Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu.... É sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu.”*

*(Ana Vilela)*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
2.1	Área de estudo.....	13
2.2	Coleta e análise dos dados.....	14
2.3	Análises estatísticas.....	16
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>17</b>
3.1	Variáveis físicas, químicas e Índice de Estado Trófico.....	17
3.2	Composição e Biovolume das cianobactérias.....	20
3.3	Cianotoxinas.....	23
3.4	Análise de redundância (RDA).....	25
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>

## VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE CIANOBACTÉRIAS E CIANOTOXINAS EM RESERVATÓRIOS NO TRÓPICO-SEMIÁRIDO

Ranielle Daiana dos Santos Silva<sup>1</sup>

### RESUMO

Florações de cianobactérias são frequentes em reservatórios tropicais, causando inúmeros problemas a estes ecossistemas aquáticos, devido a sua capacidade de sintetizar e liberar metabólitos secundários tóxicos conhecidos como cianotoxinas. O presente estudo analisou os fatores ambientais que explicam a variação temporal da biomassa das cianobactérias e das concentrações das cianotoxinas em reservatórios no trópico-semiárido. O estudo foi realizado nos reservatórios Boqueirão, Camalaú, Poções e Mucutú, situados na Bacia do Rio Paraíba, no Estado da Paraíba, Brasil. As amostras foram coletadas na subsuperfície, com frequência trimestral nos meses de outubro de 2016, fevereiro e junho de 2017. Neste estudo foram identificadas 28 espécies de cianobactérias, das quais 16 são potencialmente produtoras das cianotoxinas microcistinas, cilindrospermopsina e saxitoxina. As concentrações das cianotoxinas variaram em função de pelo menos uma espécie potencialmente produtora de toxinas, evidenciando que a abundância das cianobactérias esteve relacionada com as concentrações das cianotoxinas. As espécies potencialmente produtoras relacionadas com as concentrações de cianotoxinas são comumente formadoras de florações em ecossistemas aquáticos tropicais, exceto a espécie *Geitlerinema amphibium*. Foi verificado que as variáveis ambientais PT, pH e nutrientes nitrogenados explicaram a abundância das cianobactérias, tais variáveis também se mostraram relacionadas com as concentrações da cianotoxinas, desta forma o controle do aporte de nutrientes é uma importante ferramenta para regulação de florações de cianobactérias e concentrações de cianotoxinas em reservatórios tropicais.

**Palavras-Chave:** Biovolume. Cianotoxinas. Cianobactérias. Reservatórios tropicais.

### 1 INTRODUÇÃO

Florações de cianobactérias são frequentes em reservatórios tropicais, causando inúmeras consequências a estes ecossistemas aquáticos (BITTENCOURT-OLIVEIRA; SANTOS; MOURA, 2010; PAWLIK-SKOWORONSKA; TOPOROWSKA, 2016). Em reservatórios utilizados para abastecimento público, as cianobactérias constituem um sério problema para a saúde da população (TE e GIN, 2011), devido à capacidade em sintetizar e liberar metabólitos secundários tóxicos, conhecidos como cianotoxinas, as quais podem ter efeitos hepatotóxicos, neurotóxicos, citotóxicos e dermatotóxicos (CHIA et al., 2017).

---

<sup>1</sup> Aluno de Graduação em Ciências Biológicas na Universidade Estadual da Paraíba – Campus I.  
Email: ranielledaiana@hotmail.com.br

Diversos estudos têm discutido os fatores que causam a formação de florações de cianobactérias. Entre estes fatores estão as elevadas concentrações de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo (DOLMAN et al., 2012; FIGUEREDO et al., 2016; CHIA et al., 2017), elevada intensidade luminosa (KAEBERNICK e NEILAN, 2001; BITTENCOURT-OLIVEIRA; SANTOS; MOURA, 2010;), altas temperaturas (PAERL et al., 2013; CHA et al., 2017), baixa transparência da água e altos valores de pH (GAO; CORNWELL; STOECKER; OWENS, 2012). Além disso, outros fatores como a hidrodinâmica (eventos de turbulência e estratificação) (FORTIN et al., 2010) e interações bióticas como a competição e pastagem (GORET et al., 2010), podem regular as florações de cianobactérias.

As mudanças climáticas também são apontadas como fatores que causam aumento da biomassa das cianobactérias (O'NEIL; DAVIS; BURFORD; GLOBER, 2012; PAERL; PAUL, 2012; RECKNAGEL et al., 2017). Acredita-se que o aumento da temperatura favorece ainda mais o crescimento das cianobactérias (PAERL; HALL; CALANDRINO, 2011; MOURA; BITTENCOURT-OLIVEIRA; CHIA; SEVERIANO, 2015), induzindo a liberação de cianotoxinas na coluna d'água (CHRISTOFFERSEN; WINDING, 2002). Nos ambientes aquáticos tropicais, onde as temperaturas são elevadas durante todo o ano, as mudanças climáticas têm promovido maior dominância e intensificação das florações de cianobactérias (GER; HANSSON; LURLING, 2014).

Ainda não se sabe ao certo o papel das cianotoxinas (CARMICHAEL, 1992), mas acredita-se que a sua produção seja um dos mecanismos utilizados pelas cianobactérias para dominar ecossistemas aquáticos (GER; HANSSON; LURLING, 2014). As cianotoxinas podem atuar como mecanismo de defesa contra herbivoria (FREITAS; PINHEIRO; ROCHA; LOUREIRO, 2014) e causar efeitos alelopáticos em macrófitas e outras espécies fitoplanctônicas (ROJO; SEGURA; CORTÉS; RODRIGO, 2013; MOHAMED, 2017), diminuindo a competição por nutrientes e luminosidade. Se bioacumuladas na cadeia trófica, em organismos do zooplâncton e peixes (PAWLIK-SKOWRONSKA et al., 2013) as cianotoxinas podem causar efeitos deletérios a estes organismos.

A produção de cianotoxinas específicas depende da composição de espécies de cianobactérias, pois diferentes espécies podem produzir diferentes toxinas (DOLMAN et al., 2012), por outro lado, um tipo de toxina pode ser produzida por várias espécies (LEE; ROLLWAGEN-BOLLENS; FABER-HAMMOND, 2015). Nem todas as cianobactérias são tóxicas e algumas podem ser tóxicas durante apenas um período do ano, do mês ou da semana (MOLICA; AZEVEDO, 2017).

Acredita-se que maiores concentrações de cianotoxinas ocorram sob maiores biomassas de cianobactérias (PAWLIK-SKOWOROSKA; TOPOROWSKA, 2016), entretanto, de acordo com Beaulieu, Pick e Gregory-Eaves, (2013), as concentrações de cianotoxinas nem sempre aumentam com a abundância de cianobactérias, indicando que outros fatores podem desempenhar papel na produção de toxinas (WALL, et al., 2018).

O presente estudo teve o objetivo de verificar quais os fatores ambientais que explicam a variação espaço-temporal das cianobactérias e das cianotoxinas em reservatórios tropicais. Para isto, foram testadas as seguintes hipóteses: (1) o biovolume das cianobactérias tem relação direta com as concentrações de cianotoxinas; e (2) as variáveis ambientais que explicam a variação do biovolume das cianobactérias são as mesmas que explicam as cianotoxinas.

## 2 MATERIAIS E METÓDOS

### 2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido nos reservatórios Epitácio Pessoa (comumente denominado reservatório Boqueirão), Camalaú, Poções e Mucutú, localizados na Bacia do Rio Paraíba, no estado da Paraíba, Brasil. De acordo com a classificação de Köppen, a região apresenta o clima tropical (AW), com estação seca durante o período do inverno (PEEL et al., 2007).

Esses reservatórios são importantes fontes de água para o abastecimento e atividades de piscicultura, dessedentação animal, recreação e irrigação, porém o uso do solo ao longo da Bacia do Rio Paraíba é destinado, principalmente, a atividades de agricultura e pecuária.

Tabela 1. Reservatórios, municípios, coordenadas geográficas e capacidade máxima.

Reservatório	Município	Latitude	Longitude	Capacidade máxima (m <sup>3</sup> )
Boqueirão	Boqueirão	7°28'9''S	36°8'2''W	411.686.287
Camalaú	Camalaú	7°53'10''S	36°49'25''W	48.107.240
Poções	Monteiro	7°53'45''S	37°0'50''W	29.861.562
Mucutú	Juazeirinho	7°07'7,8''S	36°39'2,3''W	25.370.000

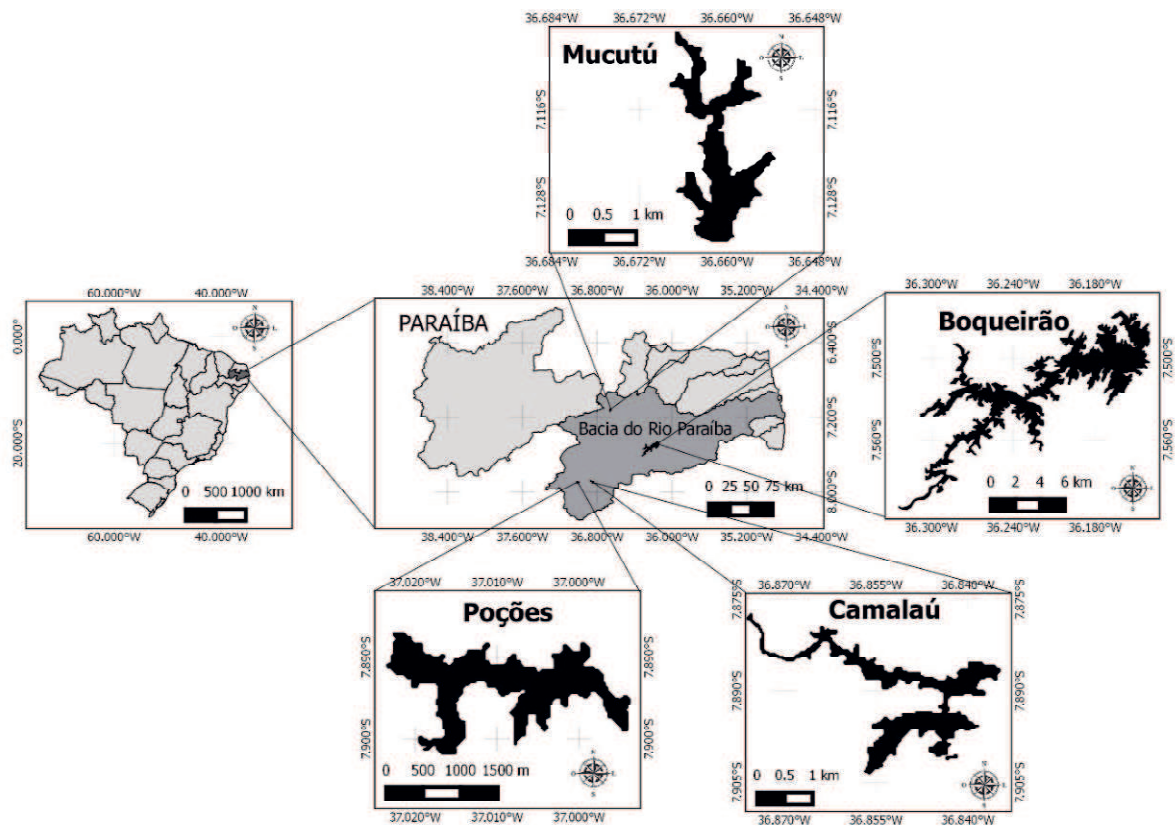


Figura 1. Bacia do Rio Paraíba, localização dos reservatórios Boqueirão, Camalaú, Poções e Mucutú.

## 2.2 Coletas e análise dos dados

### *Amostragem*

As coletas foram realizadas com frequência trimestral durante o período de outubro de 2016 a junho de 2017, em três estações de coletas, nas regiões lótica, de transição e lântica. Em cada estação de coleta, foi coletada uma amostra por mês. As amostras de água foram coletadas na subsuperfície, onde há 100% de penetração de incidência luminosa.

Os meses em que foram realizadas as amostragens foram considerados como, outubro/16 mês de seca, fevereiro/17 extrema seca, e o mês de junho período pós-transposição para os reservatórios Boqueirão, Camalaú e Poções. No reservatório Mucutú, o mês de junho/17 também foi considerado como um período de seca extrema.

A temperatura (°C), pH e turbidez (UNT) foram mensurados *in situ* com o auxílio da sonda multiparamétrica HORIBA© U-50. A transparência da água foi medida (cm), utilizando-se o disco de Secchi.

Amostras de água para a análise dos nutrientes, clorofila-a e cianobactérias foram coletadas diretamente do reservatório e armazenadas em frascos plásticos. As amostras de nutrientes e clorofila-a foram mantidas em isopor com gelo, e conduzidas ao laboratório,



enquanto as amostras para o estudo quali-quantitativa das cianobactérias foram preservadas com formol a 4% (qualitativa) e lugol a 1% (quantitativa).

Para a análise da concentração das cianotoxinas, trinta litros da água do reservatório foram filtrados e concentrados através da rede de plâncton com abertura de malha de 20 µm, armazenados em frascos com volume de 250 ml e conduzidos ao laboratório em isopor com gelo.

#### *Análise dos nutrientes e clorofila-a*

Foram analisadas as concentrações de amônia (N-NH<sub>4</sub>), nitrato (N-NH<sub>3</sub>), nitrito (N-NH<sub>2</sub>), nitrogênio inorgânico dissolvido (DIN), fósforo total (PT) e fósforo reativo solúvel (SRP), de acordo com as técnicas descritas no *Standard Methods Apha* (2012).

A clorofila-a foi extraída com etanol 96%, seguindo o método de Jerpersen e Christoffersen (1987), e determinada pelo método espectrofotométrico de Lorezen (1967).

#### *Índice de Estado Trófico (IET)*

Os dados de fósforo total e clorofila-a foram utilizados para calcular o Índice de Estado Trófico (IET), descrito por Carlson (1977) e modificado para ambientes tropicais por Toledo Jr. et al. (1983). A classificação trófica segue o seguinte critério: oligotrófico IET < 44, mesotrófico 44 < IET < 54 e eutrófico IET > 54.

#### *Análise quali-quantitativa das cianobactérias*

As espécies de cianobactérias foram identificadas através da confecção de lâminas semipermanentes e visualização em microscópio óptico da marca Zeiss (modelo Lab. A1), com o auxílio de chaves de identificação (KOMÁREK; ANAGNOSTIDIS, 1989; 1998; 2005; KOMÁREK et al., 2002).

A análise quantitativa foi realizada em microscópio invertido (Zeiss Axiovert 40 C) com o aumento de 400X, utilizando câmara de sedimentação, conforme descrito por Uthermöhl (1958). Foi utilizado o critério de contagem de, pelo menos, 100 indivíduos das espécies mais abundantes ou 100 campos em uma amostra. A densidade (cél/mL<sup>-1</sup>) foi obtida pela fórmula descrita por Ross (1979) e o biovolume (mm<sup>3</sup>L<sup>-1</sup>) foi estimado multiplicando-se as densidades de cada espécie pelo volume médio de suas células, considerando sempre que possível as dimensões médias de cerca de 20 indivíduos. O volume de cada célula foi calculado a partir de modelos geométricos aproximados à forma dos indivíduos - esferas, cilindros, cones, paralelepípedos, pirâmides, elipsóides e outros, conforme descrito por Hillebrand et al. (1999).

### *Análise das cianotoxinas*

Foram determinadas as concentrações totais ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de microcistina, saxitoxina e cilindrospermopsina pelo método *Enzyme-Linked Immuno Sorbent Assay* (ELISA) utilizando kits em placa Abraxis, Inc. (Warminster, Pa) específicos para cada toxina, seguindo as instruções do fabricante. As análises foram realizadas com o auxílio de um leitor de microplacas ASYS A-5301 (ASYS Hitech GmbH, Eugendorf, Áustria).

### **2.3 Análises estatísticas**

Para verificar as diferenças significativas nas variáveis físicas e químicas entre os meses e regiões de coleta (lótica, de transição e lântica), foram realizados a análise de variância um fator (ANOVA um fator) e teste Kruskal-Wallis, para dados paramétricos e não-paramétricos, respectivamente, seguidos do teste *post hoc* de Tukey. A normalidade e homocedasticidade dos dados foram avaliadas através dos testes Kolmogorov-Smirnov e Levene, respectivamente.

O teste de correlação de Pearson ( $r$ ) foi realizado para verificar a correlação entre as cianotoxinas analisadas e as espécies potencialmente produtoras. As espécies potencialmente produtoras de microcistina, saxitoxina e cilindrospermopsina foram determinadas de acordo com Pearson et al. (2010).

A análise de redundância (RDA) foi realizada para identificar a relação entre as variáveis físicas e químicas e as cianobactérias e cianotoxinas. O critério para seleção da RDA foi baseado no comprimento dos eixos da Análise de Correspondência Destendenciada (ACD) que ratifica a realização dessa análise quando o comprimento do eixo 1 for menor que 3 (Ter Braak e Prentice, 1998). Para testar se o modelo RDA foi significativo, foi realizado a Anova fatorial.

Foram realizadas duas RDAs, uma com cianobactérias e outra com as cianotoxinas na matriz de dados dependentes. A matriz com as variáveis abióticas foi padronizada utilizando *Standard Deviation* e para identificar as variáveis abióticas que fizeram contribuições independentes e significativas para a variação das cianobactérias e cianotoxinas, foi realizada seleção de variáveis por *stepwise*, utilizando testes de permutação, e, em seguida, seleção por fator de inflação da variância (VIF), a partir da inclusão das variáveis com  $VIF < 20$ . Na matriz de dados das cianobactérias, foram incluídas apenas as espécies que atingiram biovolume igual ou superior a 1% do biovolume fitoplanctônico total e os dados foram log transformados ( $\log[x+1]$ ).

As análises estatísticas foram realizadas considerando nível de significância de 5% e utilizando o programa *R Software* para *Windows*.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Variáveis físicas, químicas e Índice de estado trófico

As características físicas e químicas dos reservatórios estudados estão apresentadas nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

O estado trófico dos reservatórios variou entre mesotrófico e eutrófico. Foi verificado que o reservatório Boqueirão apresentou condições mesotróficas na região lótica, em fevereiro de 2017, e região lântica, em junho do mesmo ano, e condições eutróficas nas demais regiões durante o estudo. Os reservatórios Camalaú e Poções mostraram condições eutróficas em todas regiões e meses do estudo. O reservatório Mucutú apresentou condições eutróficas em todas regiões do período estudado, exceto na região lótica no mês de fevereiro/17, em que o ambiente mostrou condições mesotróficas.

Diferenças significativas nas variáveis físicas e químicas foram observadas entre os meses amostrados, porém não houve diferença entre as estações de coleta (zonas lótica, de transição e lântica). No reservatório Boqueirão, foi observado que a transparência da água e a temperatura foram significativamente maiores em fevereiro/17 ( $F=5,815$ ;  $p=0,0394$  e  $F=34,59$ ;  $p=0,0005$ , respectivamente), o nitrato ( $F=6,04$ ;  $p=0,00365$ ) e fósforo total ( $F=3,884$ ;  $p=0,0428$ ) foram significativamente maiores no mês de junho/17, enquanto o pH ( $F=29,79$ ;  $p=0,0007$ ), foi significativamente menor neste mês (Tabela 2).

No reservatório Camalaú, houve diferenças significativas entre os meses de coleta para a transparência da água, com maiores valores sendo observados em outubro/16 ( $F=3999,9$ ;  $p<0,0001$ ). No mês de junho/17, foram observados valores significativamente menores para as variáveis pH ( $F=36,52$ ;  $p=0,000437$ ), enquanto o nitrato ( $F=7,262$ ;  $p=0,025$ ) e o fósforo total mostraram-se significativamente maiores ( $F= 5,412$ ;  $p=0,0454$ ) (Tabela 3).

No reservatório Poções, a transparência da água mostrou valores menores em fevereiro/17 ( $F=78,42$ ;  $p<0,0001$ ), enquanto a temperatura ( $F=78,42$ ;  $p< 0,0001$ ), turbidez

( $F=18,17$ ;  $p=0,002$ ) e fósforo total ( $F=13,36$ ;  $p=0,006$ ) foram significativamente maiores. O pH reduziu significativamente em junho/17 ( $F=17,64$ ;  $p=0,0007$ ) (Tabela 4).

No reservatório Mucutú, a turbidez foi menor em outubro/16 ( $F=30,59$ ;  $p=0,0007$ ). No mês de junho, as variáveis ambientais amônia ( $F=95,07$ ;  $p<0,0001$ ), nitrito ( $F=291,6$ ;  $p=0,0001$ ), DIN ( $F=6,406$ ;  $p=0,0324$ ) e fósforo total ( $F=62,74$ ;  $p<0,0001$ ) mostraram valores significativamente maiores. O nitrato ( $F=6,406$ ;  $p=0,032$ ) foi menor no mês de fevereiro/17 (Tabela: 5).

Tabela 2. Variáveis ambientais Reservatório Boqueirão, em outubro de 2016 e fevereiro e junho de 2017. Secchi, transparência da água; Temp, temperatura da água; Turb, turbidez;  $NH_4$ , amônia;  $NO_2$ , nitrito;  $NO_3$ , nitrato; DIN, nitrogênio inorgânico dissolvido; SRP, fósforo reativo solúvel; PT, fósforo total; IET, índice de estado trófico.

<b>Variáveis abióticas</b>	<b>Secchi (cm)</b>	<b>Temp (C°)</b>	<b>pH</b>	<b>Turb (UNT)</b>	<b><math>NH_4</math> (<math>\mu g/L</math>)</b>	<b><math>NO_2</math> (<math>\mu g/L</math>)</b>	<b><math>NO_3</math> (<math>\mu g/L</math>)</b>	<b>DIN (<math>\mu g/L</math>)</b>	<b>SRP (<math>\mu g/L</math>)</b>	<b>PT (<math>\mu g/L</math>)</b>	<b>IET</b>
<b>Outubro/2016</b>											
Lótica	1,39	24,57	8,91	18,5	248	5,6	96,34	349,94	33	160,33	66,80
Transição	1,5	24,92	8,54	16,8	12,69	0	25,43	38,12	43	120	58,01
Lêntica	1,08	24,57	8,64	7,65	198,2	2,24	24,22	224,66	13	53,66	56,41
<b>Fevereiro/2017</b>											
Lótica	1,4	25,95	8,47	2,36	23,97	0	33,91	57,88	3,0	43,66	51,54
Transição	1,19	26,57	8,52	36,1	13,39	15,67	8,48	37,54	28	33,66	58,55
Lêntica	1,78	26,23	8,49	18,5	6,34	7,84	14,53	28,71	28	60,33	58,04
<b>Junho/2017</b>											
Lótica	0,4	24,71	7,45	194	47,24	25,75	193,79	266,78	83	300,33	73,07
Transição	0,45	24,8	7,56	9,5	43,71	24,63	218,01	286,35	93	340,33	79,66
Lêntica	1,1	25,14	7,91	228	40,19	4,48	69,04	113,71	3	80,33	52,12

Tabela 3. Variáveis ambientais Reservatório Camalaú, em outubro de 2016 e fevereiro e junho de 2017. Secchi, transparência da água; Temp, temperatura da água; Turb, turbidez; NH<sub>4</sub>, amônia; NO<sub>2</sub>, nitrito; NO<sub>3</sub>, nitrato; DIN, nitrogênio inorgânico dissolvido; SRP, fósforo reativo solúvel; PT, fósforo total; IET, índice de estado trófico.

<b>Variáveis abióticas</b>	<b>Secchi (cm)</b>	<b>Temp (C°)</b>	<b>Ph</b>	<b>Turb (UNT)</b>	<b>NH<sub>4</sub> (µg/L)</b>	<b>NO<sub>2</sub> (µg/L)</b>	<b>NO<sub>3</sub> (µg/L)</b>	<b>DIN (µg/L)</b>	<b>SRP (µg/L)</b>	<b>PT (µg/L)</b>	<b>IET</b>
<b>Outubro/2016</b>											
Lótica	1,46	24,81	9,2	19	64,87	97,39	190,16	352,42	153	273,66	73,58
Transição		24,52	8,8	34,8	11,98	12,24	24,22	48,44	23	304	66,80
Lêntica		23,86	8,69	29,7	14,8	0	53,29	68,09	18	67	60,03
<b>Fevereiro/2017</b>											
Lótica	0,65	26,2	8,97	136	9,87	4,48	13,22	27,57	38	57	58,89
Transição	0,78	25,53	8,92	116	2,82	14,55	10,9	28,27	28	57	57,39
Lêntica	0,81	25,13	8,55	37,4	7,75	5,6	6,05	19,4	28	60,33	57,25
<b>Junho/2017</b>											
Lótica	0,34	22,79	7,64	178	47,94	42,54	171,99	262,47	73	633,66	76,82
Transição	0,34	24,65	7,42	90	25,38	3,36	164,72	193,46	143	370,33	77,55
Lêntica	0,34	25,09	7,61	79,8	46,53	0	171,99	218,52	43	253,66	71,42

Tabela 4. Variáveis ambientais reservatório Poções, em outubro de 2016 e fevereiro e junho de 2017. Secchi, transparência da água; Temp, temperatura da água; Turb, turbidez; NH<sub>4</sub>, amônia; NO<sub>2</sub>, nitrito; NO<sub>3</sub>, nitrato; DIN, nitrogênio inorgânico dissolvido; SRP, fósforo reativo solúvel; PT, fósforo total; IET, índice de estado trófico.

<b>Variáveis abióticas</b>	<b>Secchi (cm)</b>	<b>Temp (C°)</b>	<b>pH</b>	<b>Turb (UNT)</b>	<b>NH<sub>4</sub> (µg/L)</b>	<b>NO<sub>2</sub> (µg/L)</b>	<b>NO<sub>3</sub> (µg/L)</b>	<b>DIN (µg/L)</b>	<b>SRP (µg/L)</b>	<b>PT (µg/L)</b>	<b>IET</b>
<b>Outubro/2016</b>											
Lótica	0,47	25,97	7,6	48,9	456	0	20,59	476,59	5	318	64,60
Transição	0,39	24,8	8,39	54,8	24,67	8,96	47,24	80,87	38,2	207	67,85
Lêntica	0,41	25,66	8,28	50,5	50,6	14,1	80,6	145,3	158	638,78	69,83
<b>Fevereiro/2017</b>											
Lótica	0,1	29,65	8,46	325	14,1	11,19	16,96	42,25	913	883,66	83,14
Transição	0,16	29,75	8,7	394	62,06	320,15	218,01	600,22	633	1070,33	81,57
Lêntica	0,16	27,12	8,71	297	239,74	226,12	186,52	652,38	638	870,33	78,80
<b>Junho/2017</b>											
Lótica	0,41	25,51	7,43	12,5	98,71	53,73	147,76	262,47	300,2	377	76,76
Transição	0,41	25,14	7,35	190	45,83	10,07	125,96	193,46	181,86	243,66	73,04
Lêntica	0,41	24,37	7,23	151	86,02	8,96	140,5	218,52	235,48	443,66	75,56

Tabela 5. Variáveis ambientais reservatório Mucutú, em outubro de 2016 e fevereiro e junho de 2017. Secchi, transparência da água; Temp, temperatura da água; Turb, turbidez; NH<sub>4</sub>, amônia; NO<sub>2</sub>, nitrito; NO<sub>3</sub>, nitrato; DIN, nitrogênio inorgânico dissolvido; SRP, fósforo reativo solúvel; PT, fósforo total; IET, índice de estado trófico.

<b>Variáveis abióticas</b>	<b>Secchi (cm)</b>	<b>Temp (C°)</b>	<b>Ph</b>	<b>Turb (UNT)</b>	<b>NH<sub>4</sub> (µg/L)</b>	<b>NO<sub>2</sub> (µg/L)</b>	<b>NO<sub>3</sub> (µg/L)</b>	<b>DIN (µg/L)</b>	<b>SPR (µg/L)</b>	<b>PT (µg/L)</b>	<b>IET</b>
<b>Outubro/2017</b>											
Lótica	0,24	23,6	8,26	29,1	110,7	5,6	60,65	176,95	28	180,33	56,55
Transição	0,63	19,7	6,7	6,3	14,78	4,48	24,89	44,15	38	98	58,43
Lêntica	0,5	25,07	8,36	4,4	16,21	4,48	29,07	49,76	63	173,66	63,55
<b>Fevereiro/2017</b>											
Lótica	0,27	25,3	7,99	136	703,21	0	10,9	714,11	3	157	51,04
Transição	0,31	25,51	7,61	56	626,15	3,36	8,48	637,99	18	133,66	58,09
Lêntica	0,31	25,71	7,73	62,8	731,21	0	4,84	736,05	58	167	64,02
<b>Junho/2017</b>											
Lótica	0,23	23,16	7,41	231	1107,05	23,51	31,49	1162,05	193	423,65	70,35
Transição	0,23	23,61	7,67	188	1170,51	23,51	41,18	1235,2	183	377	71,09
Lêntica	0,23	23,85	7,57	192	906,97	24,63	42,39	973,99	188	397	69,81

### 3.2 Composição e Biovolume das cianobactérias

Foram identificadas 28 espécies de cianobactérias nos reservatórios estudados, das quais 16 são potencialmente produtores de cianotoxinas, pertencentes as ordens Chroococales, Oscillatoriales, Nostocales e Synechococales (Tabela 6).

No reservatório Boqueirão, verificou-se uma tendência do aumento das cianobactérias da região lótica para a lêntica durante todos os meses do estudo. Maiores biovolumes foram registrados em outubro/2016, na região lêntica, com maior participação das espécies *Plankthotrix agardhi*, *Pseudanabaena galeata*, *P. isotrix*, *Artrospira platensis* e *Dolichospermum solitarium*.

No reservatório Camalaú, maior biovolume foi registrado em fevereiro/17 considerado como mês de extrema seca, na região de transição, com maior participação da espécie *Dolichospermum solitarium*. Em junho do mesmo ano, observou-se uma redução no biovolume das cianobactérias neste reservatório.

Tabela 6. Espécies de cianobactérias identificadas nos reservatórios estudados e respectivas cianotoxinas potencialmente produzidas. Mic, microcistina; Sax, Saxitoxina; Cil, cilindrospermopsina; -, não há registro de toxicidade.

<b>Espécie</b>	<b>Cianotoxina produzida</b>
<b>Chroococcales</b>	
<i>Asterocapsa submersa</i>	-
<i>Chroococcus dispersus</i>	-
<i>Chroococcus limneticus</i>	-
<i>Chroococcus minutus</i>	-
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Mic
<i>Microcystis pulchella</i>	Mic
<b>Oscillatoriales</b>	
<i>Arthospira platensis</i>	Mic
<i>Getlerinema amphibium</i>	Sax
<i>Komvophoron schimidlei</i>	-
<i>Plankthotrix agardhi</i>	Mic
<i>Plankthotrix isotrix</i>	Mic
<b>Nostocales</b>	
<i>Aphanizmenon gracile</i>	Cili/Sax
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	Cili/Sax
<i>Cuspidothrix tropicalis</i>	Sax
<i>Dolichospermum solitarium</i>	Mic/Sax
<i>D. circinalis</i>	Mic/Sax
<b>Synechococcales</b>	
<i>Aphanocapsa annulata</i>	-
<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	-
<i>Aphanocapsa incerta</i>	-
<i>Coelomoron tropicale</i>	-
<i>Eucapis densa</i>	-
<i>Limnococcus limneticus</i>	-
<i>Merismopedia glauca</i>	-
<i>Merismopedia tenuissima</i>	Mic
<i>Pseudanabaena catenata</i>	Mic
<i>Pseudanabaena galeata</i>	Mic
<i>Synechocystis aquatilis</i>	Mic
<i>Snowella lacustres</i>	Mic

No reservatório Poções, maior biovolume ocorreu durante o mês de fevereiro/17 (extrema seca). A espécie *Snowella lacustres* foi responsável pelo elevado biovolume na região lótica e região de transição. Na região lântica, a espécie *Coelomoron tropicale* mostrou maior biovolume. Em junho, período pós-transposição, assim como no reservatório Camalaú, ocorreu redução no biovolume das cianobactérias.

No reservatório Mucutú, maior biovolume ocorreu em outubro/16, particularmente na região lótica, representada pela espécie *Plankthotrix agardhi*, em seguida o biovolume mostrou-se maior em junho de 2017 (extrema seca), resultante do alto biovolume da espécie *Geitlerinema amphibium* em todas as regiões do reservatório.

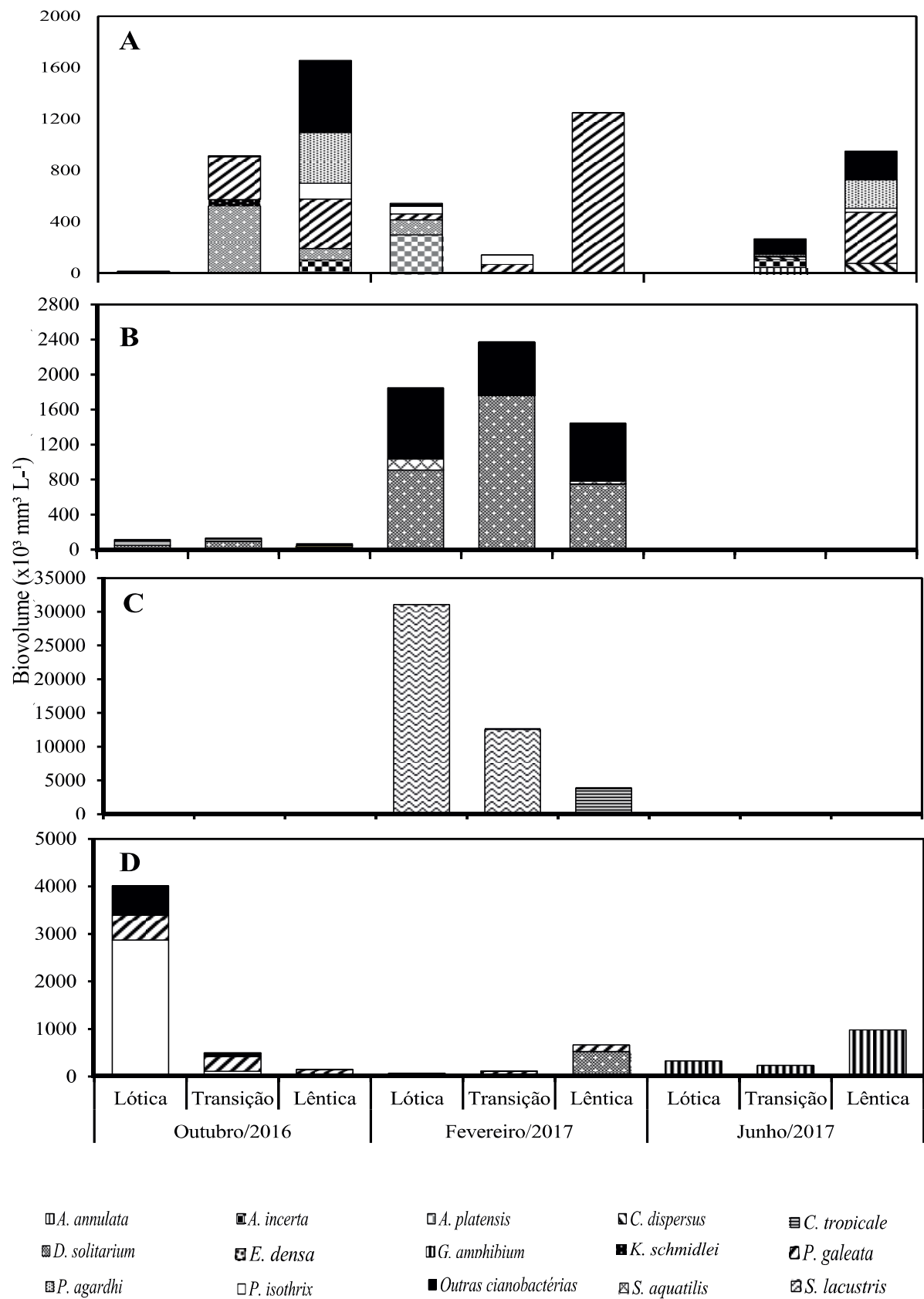


Figura 2. Biovolume das cianobactérias nos reservatórios Boqueirão (A), Camalaú (B), Poções (C) e Mucutú (D), em outubro de 2016 e fevereiro e junho de 2017.



### 3.3 Cianotoxinas

As cianotoxinas microcistina, saxitoxina e cilindrospermopsina estiveram presentes nos reservatórios Boqueirão, Camalaú, Poções e Mucutú durante todos os meses e zonas amostradas. Não houve diferenças significativas nas concentrações de cianotoxinas entre as zonas lótica, de transição e lântica, porém entre os meses amostrados foram observadas diferenças significativas.

No reservatório Boqueirão, observou-se que as concentrações de saxitoxina foram maiores na região de transição, em fevereiro/17, enquanto que a maior concentração de microcistina ocorreu na região lântica de junho/17 e de cilindrospermopsina na região lântica, em outubro/16.

No reservatório Camalaú, as cianotoxinas saxitoxina e microcistina apresentaram concentrações inferiores a  $1,5 \mu\text{g L}^{-1}$  em todas as regiões para todos os meses de coleta. Neste reservatório, a cianotoxina cilindrospermopsina apresentou concentrações mais elevadas, sendo maior na região lântica em fevereiro/17. A cilindrospermopsina teve diferença significativa ( $F=4,32$ ;  $p=0,068$ ) entre os meses, sendo especialmente menor em junho/17 ( $F=0,067$ ).

No reservatório Poções, as mais elevadas concentrações de cianotoxinas foram da microcistina na região de lântica em outubro/16 e cilindrospermopsina região transição em junho/17.

No reservatório Mucutú, a saxitoxina mostrou diferença significativa entre os meses ( $F=87,36$ ;  $p<0,0001$ ), sendo altamente significativa em junho/17 ( $p=0,0001$ ). Neste reservatório as maiores concentrações de cianotoxinas foram, respectivamente, microcistina na região de transição de outubro/16 e cilindrospermopsina na região lótica em junho/17.

A correlação de Pearson mostrou que das cianobactérias potencialmente tóxicas identificadas nos reservatórios, as espécies *Dolichospermum solitarium*, *Gleitlerinema amphibium* e *Cylindrospermopsis raciborskii* mostraram correlação positiva e significativa com microcistina, saxitoxina e cilindrospermopsina, respectivamente (Figura 4).

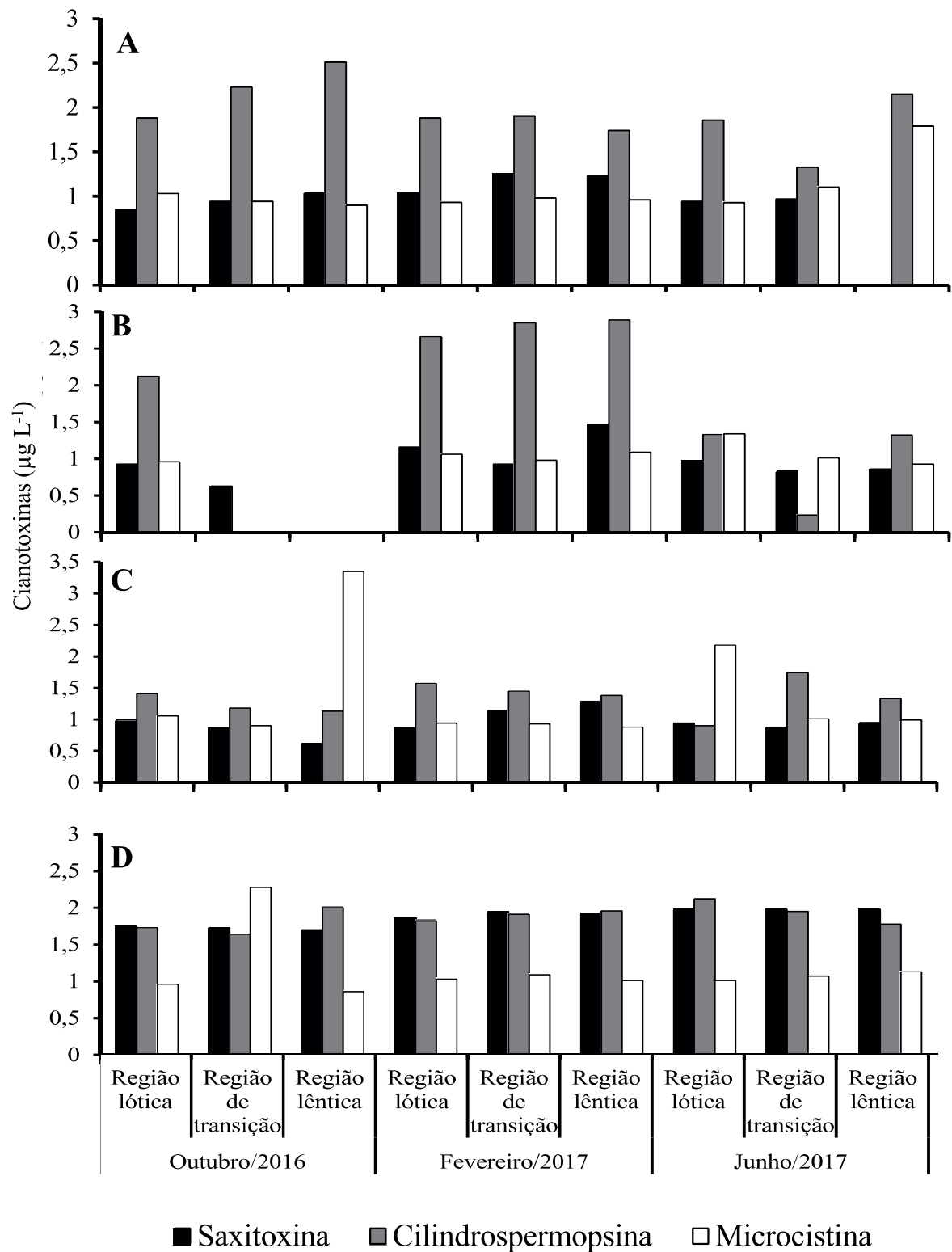


Figura 3. Concentrações de cianotoxinas ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) nos reservatórios Boqueirão (A), Camalaú (B), Poções (C) e Mucutú (D), em outubro de 2016 e fevereiro e junho de 2017.

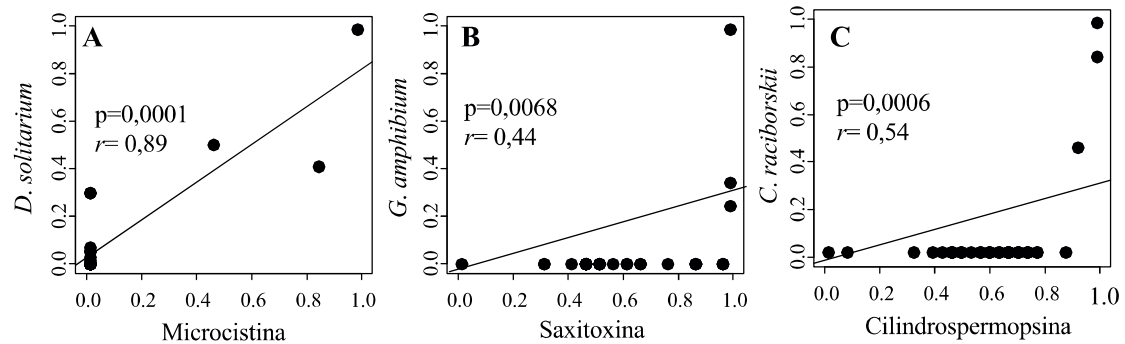


Figura 4. Correlação linear de Pearson ( $r$ ) entre *Dolichospermum solitarium* e microcistina (A), *Geitlerinema amphibium* e saxitoxina (B) e *Cylindrospermopsis raciborskii* e cilindrospermopsina (C).

### 3.4 Análise de redundância (RDA)

A RDA para as variáveis físicas e químicas e as espécies de cianobactérias foi significativa ( $F= p<0,0001$ ) e explicou 53,72%, sendo 85,52% da variabilidade explicada pelos eixos 1 e 2. Na ordenação, foi observada a formação de 4 (quatro) grupos distintos constituídos pelos reservatórios estudados (Figura 5 A). A espécie *P. isotrix* esteve inversamente relacionada com o fósforo total, outras cianobactérias estiveram fortemente relacionadas com o pH. Enquanto a presença das espécies *S. lacustres*, *E. densa* e *C. tropicale* foram relacionadas com o fósforo total. Além disso, verificou-se que o crescimento da espécie *G. amphibium* foi diretamente relacionado com o DIN.

A RDA para as variáveis físico-químicas e as cianotoxinas foi significativa ( $F=15,749$ ;  $p=0,001$ ) e explicou 70,98% da variabilidade observada (Figura 5 B). Os eixos 1 e 2 explicaram juntos 96,81% dessa variabilidade. Os reservatórios continuaram formando grupos distintos na ordenação formada. A cilindrospermopsina esteve relacionada com o pH, a microcistina com o fósforo total e a saxitoxina foi positivamente relacionada com a amônia.

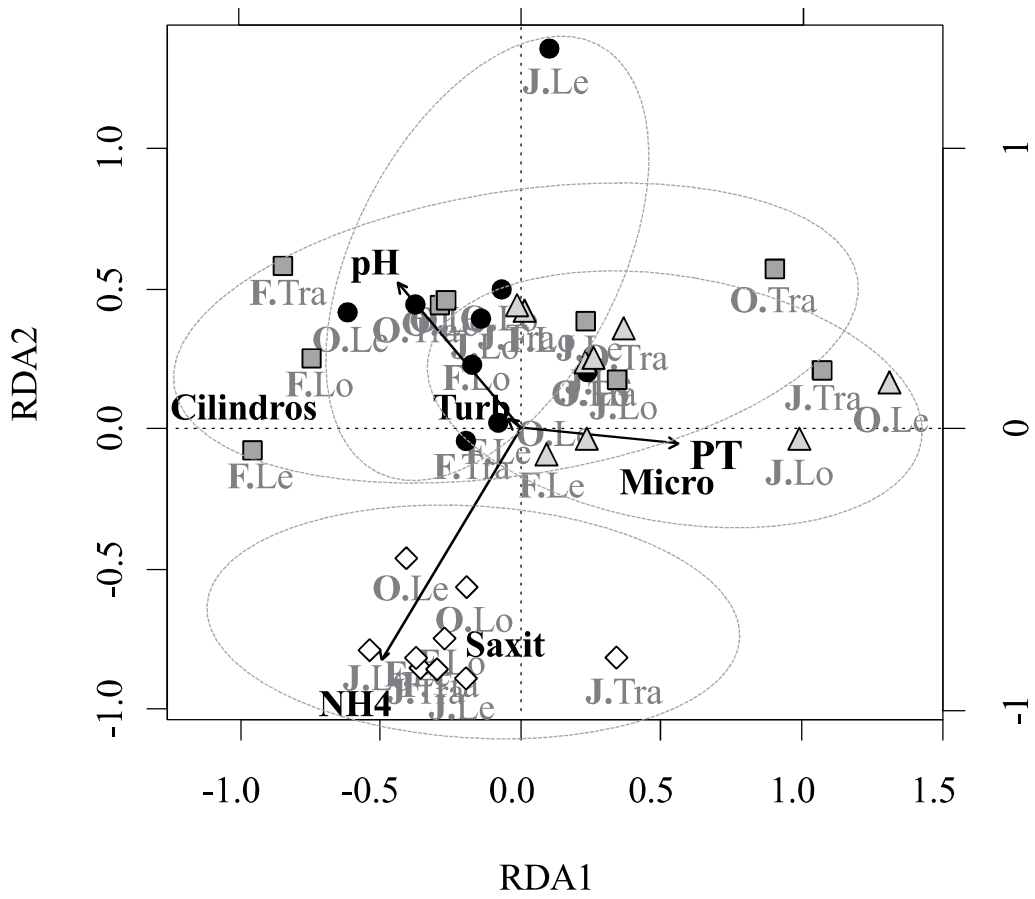
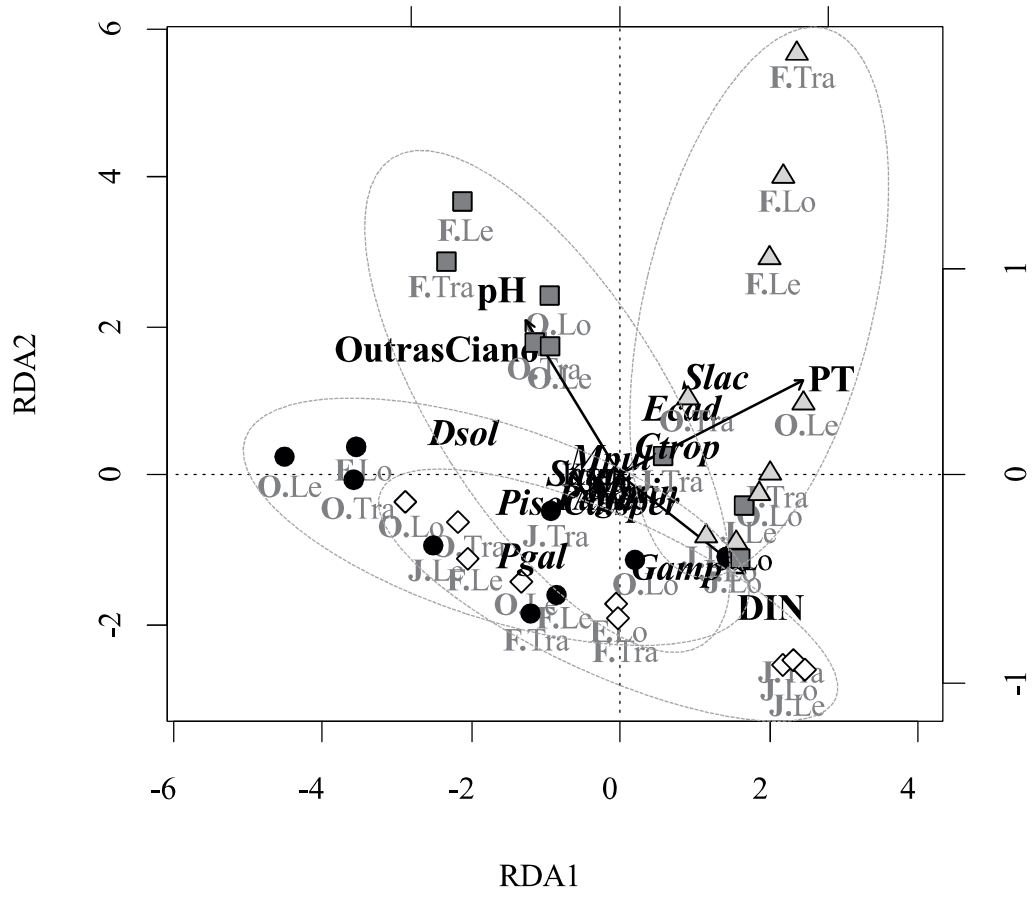


Figura 5. Análise de redundância (RDA) com as variáveis físico-químicas e as cianobactérias (A) e as cianotoxinas (B). Reservatório Boqueirão (●); Reservatório Camalaú (■); Reservatório Poções (▲); Reservatório Mucutú (◇). *Ctrop*= *Coelomoron tropicale*; *Crac*= *Cylindrospermopsis raciborskii*; *Dsol*= *Dolichospermum solitarium*; *Ecad*= *Eucapis densa*; *Gamp*= *Geitlerinema amphibium*; *Pgal*= *Pseudanabaena galeata*; *Piso*= *Plankthotrix isotrix*; Outras Ciano= Cianobactérias com biovolume <1% do total; *Sla*= *Snowella lacustres*; Micro= Microcistina; Cilindros= cilindrospermopsina; Saxit= saxitoxina; O.Lo= Outubro/Região Lótica; O.Tra= Outubro/Região de Transição; O.Le= Outubro/Região Lêntica; F.Lo= Fevereiro/Região Lótica; F.Tra= Fevereiro/Região de Transição; F.Le= Fevereiro/Região Lêntica; J.Lo= Junho/Região Lótica; J.Tra= Junho/Região de Transição; J.L= Junho/Região Lêntica; pH; PT= fósforo total; DIN= nitrogênio inorgânico dissolvido; Turb= turbidez; NH<sub>4</sub>= amônia.

#### 4 Discussão

No presente estudo, foi observado que o biovolume das cianobactérias esteve relacionado com as concentrações de cianotoxinas de algumas cianobactérias, comprovando a primeira hipótese proposta. Esse resultado é condizente com o estudo realizado por Hudon et al., (2016), em que a concentração de cianotoxinas esteve relacionada com a biomassa de, pelo menos, uma espécie potencialmente produtora de toxina. Similarmente, Horst et al., (2014) verificaram que as concentrações de cianotoxinas variaram em função da biomassa das espécies produtoras.

A espécie *Dolichospermum solitarium* mostrou correlação positiva com a concentração de microcistina, enquanto *Geitlerinema amphibium* explicou a saxitoxina e *Cylindrospermopsis raciborskii* a cilindrospermopsina. *Dolichospermum* e *Cylindrospermopsis* são formadoras de florações tóxicas (O'NEIL; DAVIS; BURFORD; GLOBER, 2012; TE; GIN, 2011; GER; HANSSON; LURLIG, 2014), as quais vem ocorrendo de forma cada vez mais frequentes e intensas em consequência da eutrofização e alterações climáticas (GER; HANSSON; LURLIG, 2014). O gênero *Geitlerinema* são cianobactérias potencialmente produtoras de toxinas, típicas de ecossistemas de água doce, porém não são encontradas comumente formando florações (TUCCI et al., 2006). A ocorrência da espécie *Geitlerinema amphibium* foi registrada em reservatórios brasileiros de abastecimento público (DOGO et al., 2011; MOURA; BITTENCOURT-OLIVEIRA; CHIA; SEVERIANO, 2015).

Temperatura, luz e nutrientes têm sido os principais fatores apontados como causadores das florações de cianobactérias (PELACHATA; PELACHATY; PUCKACZ, 2016). Estudos

relatam a existência de um efeito sinérgico entre o excesso de nutrientes e a temperatura atuando na frequência, intensidade e toxicidade das florações de cianobactérias (PAERL et al., 2016). No presente estudo, a temperatura não foi um fator chave na explicação da dinâmica das cianobactérias e esse resultado, certamente, é devido à condição climática na região dos reservatórios estudados, a qual apresenta temperatura sempre alta (acima de 20 °C), mostrada por Havens, Beaver, Fulto III e Teacher (2017) como ideal para o crescimento das cianobactérias.

No presente trabalho, a análise de redundância mostrou relação significativa entre o biovolume das cianobactérias e as variáveis ambientais PT, DIN, turbidez e pH. Excessivas cargas de nutrientes provocam alterações no estado trófico e, conseqüentemente, aumentam a biomassa de algas (CAO et al., 2016). A relação das cianobactérias com o pH é justificada pelo mecanismo de concentração de carbono durante a fotossíntese, este mecanismo permite aumentar a quantidade de CO<sub>2</sub> no local da enzima rubisco no ciclo de Calvin, tornando assim as condições do pH alcalino (MARTINEZ; WEBER; GRIMM, 2016). O pH é um importante fator no estabelecimento, diversidade e desenvolvimento do biovolume das cianobactérias (DESCY et al., 2016), geralmente o crescimento se dá em condições de pH neutro a ligeiramente alcalino. Ambientes com pH acima de oito promove o domínio das cianobactérias sobre as algas eucarióticas (PAERL 1996).

A relação entre as cianobactérias e o fósforo, corroboram com o trabalho de Tian, Dei, Hu e Xie (2012), em que foi verificado que o fósforo afetou significativamente a abundância das cianobactérias em períodos quentes. O fósforo total e o SPR são considerados importantes parâmetros para a determinação das florações de cianobactérias (DESCY et al., 2016). O nitrogênio vem sendo descrito como uns dos elementos principais para formação de florações algais, desencadeando o aumento da biomassa de cianobactérias potencialmente produtoras de toxinas (GLOBER et al., 2016).

Nos reservatórios Boqueirão, Camalaú e Poções, o aumento das concentrações de nutrientes e redução do pH em junho de 2017 foi causado, certamente, pelo carreamento e bioturbação dos sedimentos promovidos pela entrada das águas advindas da transposição do Rio São Francisco. Os distúrbios ocasionados pela transposição podem estar diretamente ligados a redução do biovolume das cianobactérias nestes reservatórios durante junho/17, decorrentes do fato de algumas cianobactérias reduzirem as taxas de divisão celular em resposta a condições de pH mais baixos (CZERNY; BARCELOS e RAMOS; RIEBESSELL, 2009).

Além das condições ambientais, as cianobactérias contam com diversos traços ecofisiológicos como a regulação da flutuabilidade e formação de colônias que favorecem a sua

dominância em ecossistemas aquáticos eutróficos (DOKULIEU; TEUBNER, 2000). Vesículas de gás presentes em algumas cianobactérias permite a sua flutuabilidade na coluna de água (Reynolds, 1987), este mecanismo pode ser influenciado por altas temperaturas, as quais podem diminuir a viscosidade da água, fornecendo maior vantagem competitiva as cianobactérias em relação a outras espécies fitoplanctônicas (O'NEIL; DAVIS; BURFORD; GLOBER, 2012). A temperatura, bem como a luminosidade e os nutrientes são importantes fatores para ativação dos acinetos, células que permitem maior sobrevivência a longo prazo a populações de cianobactérias. O sucesso competitivo das cianobactérias pode ainda estar associado à capacidade de estocar fósforo, sendo dominantes em condições de altas e baixas concentrações de fósforo (CAREY et al., 2012), e fixar nitrogênio atmosférico através dos heterócitos, desta forma, permitem a obtenção de nitrogênio mesmo quando este nutriente estiver escasso (WOOD; PRENTICÊ; SMITH; HAMILTO, 2010). Essas características estão diretamente relacionadas ao uso eficiente dos nutrientes pelas cianobactérias.

As variáveis ambientais que explicaram o biovolume das cianobactérias foram as mesmas que explicaram as concentrações das cianotoxinas e estes resultados corroboram a segunda hipótese proposta no presente trabalho. A relação entre a saxitoxina e a amônia fortalecem os resultados encontrados por Hudon et al., (2016), o qual evidenciou relação positiva entre a saxitoxina e o teor de nitrogênio. Em estudo, Brentano et al., (2016) associaram a variação na concentração de saxitoxina na Lagoa de Peri com fatores abióticos, e verificaram que entre estes fatores, a condutividade e a concentração do nitrogênio inorgânico (DIN) forneceram maior explicação para a concentração de saxitoxina.

O gênero *Dolichospermum* foi um dos principais responsáveis por produzir microcistinas em estudo realizado por Loftin et al., (2016) em 95 lagos no Estados Unidos. No presente trabalho, a espécie *Dolichospermum solitarium* esteve diretamente relacionada com a produção de microcistina, estes estiveram regulados pelas concentrações de fósforo. O fósforo pode desempenhar importante papel no domínio da *Cylindrospermopsis raciborskii* e produção de cilindrospermopsina (O'NEIL; DAVIS; BURFORD; GLOBER, 2012), entretanto, neste estudo constatamos que o biovolume desta espécie e as concentrações da cilindrospermopsina estiveram influenciadas pelas condições do pH.

Apesar das cianobactérias também estarem presentes em lagos de águas oligotróficas, a maioria das cianobactérias estão relacionadas com ambientes eutrofizados (PELACHATA; PELACHATY; PUCKACZ, 2016). O processo de eutrofização provoca alterações nos sistemas como aumento de nutrientes e turbidez da água podendo resultar em dominância de algumas

cianobactérias fortemente competitivas e tóxicas (YANG et al., 2016), como as que foram registradas neste estudo.

## **5 Conclusões**

Os resultados deste trabalho mostraram que abundância de algumas cianobactérias esteve diretamente relacionada com as concentrações das cianotoxinas. As espécies potencialmente produtoras de cianotoxinas relacionadas com as concentrações das cianotoxinas nestes reservatórios são comumente formadoras de florações em ecossistemas tropicais. Verificou-se que as variáveis ambientais pH, turbidez e as concentrações de nutrientes nitrogenados e fosfatados explicaram a ocorrência das cianobactérias e as concentrações das cianotoxinas, desta forma o controle do aporte de nutrientes em ecossistemas tropicais de abastecimento público é uma importante ferramenta para regulação das florações de cianobactérias e concentrações de cianotoxinas nestes ecossistemas.



## ABSTRACT

Cyanobacterial flora are frequent in tropical reservoirs, causing numerous problems to these aquatic ecosystems due to their ability to synthesize and release toxic secondary metabolites known as cyanotoxins. The present study analyzed the environmental factors that explain the temporal variation of cyanobacteria biomass and cyanotoxin concentrations in reservoirs in the tropic-semiarid region. The study was carried out in the Boqueirão, Camalaú, Poções and Mucutú reservoirs located in the Paraíba River Basin, in the State of Paraíba, Brazil. The samples were collected in the subsurface, with quarterly frequency in the months of October 2016, February and June of 2017. In this study 28 species of cyanobacteria were identified, of which 16 are potentially producers of microcystin cyanotoxins, cylindrospermopsin and saxitoxin. The concentrations of cyanotoxins varied according to at least one potential toxin-producing species, showing that the abundance of cyanobacteria was related to cyanotoxin concentrations. Potentially producing species related to cyanotoxin concentrations are commonly found in tropical aquatic ecosystems, except the species *Geitlerinema amphibium*. It was verified that the environmental variables PT, pH and nitrogen nutrients explained the abundance of cyanobacteria, these variables were also related to cyanotoxin concentrations, in this way the control of nutrient supply is an important tool for regulating cyanobacteria blooms and concentrations of cyanotoxins in tropical reservoirs.

**Keywords:** Biovolume. Cyanotoxins. Cyanobacteria. Tropical reservoirs.

## REFERÊNCIAS

- BEALIEU, M.; PICK, F.; GREGORY-EAVES, I. Nutrients and water temperature are significant predictors of cyanobacterial biomass in 1147 lake set. **Limnology and Oceanography**, v.58, p. 1736-1746. 2013.
- BRENTANO, D. M.; GIEHL, E. L. H.; PETRUCIO, M. M. Abiotic variables affect stx concentration in a meso-oligotrophic subtropical coastal lake dominated by *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanophyceae). **Harmful Algae**, v.56, p. 22-28. 2016.
- BITTENCOURT-OLIVEIRA, M.C.; SANTOS, D. M. S.; MOURA, N. A. Toxic cyanobacteria in reservoirs in northeastern Brazil: Detection using a molecular method. **Brazilian Journal of Biology**, v.70, n.4, p. 1005-1010. 2010.
- CAO, X.; WANG, J.; LIAO, J.; SUN, J.; HUANG, Y. The threshold response of phytoplankton community to nutrient gradient in a shallow eutrophic Chinese lake. **Ecological Indicators**, v.61, p.258-267. 2016.
- CAREY, C. C.; IBELINGS, B. W.; HOFFMANN, E. P.; HAMILTON, D. P.; BROOKES, J. D. Eco-physiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate. **Water Research**, v.46, p.1394-1407. 2012.
- CARLSON, R. E. Trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, v.22 (2), p.361-369. 1977.
- CARMICHAEL, W. W. Cyanobacteria secondary metabolites – the cyanotoxins. **Journal of Applied Bacteriology**, v.72, p.445-459. 1992.
- CHIA, M. A.; CORDEIRO-ARAÚJO, M. K.; LORENZI, A. S.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M.C. Cylindrospermopsin induced changes in growth, toxin production and antioxidant response of *Acutodesmus acuminatus* and *Microcystis aeruginosa* under differing light and nitrogen conditions. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.142, p.189-199. 2017.
- CHRISTOFFERSEN, K. S.; WINDING, A. Microbial activity and bacterial community structure during degradation of microcystins. **Aquatic Microbial Ecology**, v.27, p.125-136. 2002.

CZERNY, J.; BARCELOS e RAMOS, J.; RIEBESELL, V. Influence of eluated CO<sub>2</sub> concentrations on cell division and nitrogen fixation retes in the bloom- forming cyanobacterium *Nodularia spumigene*. **Biogeosciences**, v.6, p.1865-1875. 2009.

DESCY, J. P.; LEPRIEUR, F.; PIRLOT, S.; LEPORCQ, B.; VAN WICHELEN, J.; PERETYATKP, A.; TEISSIER, S.; CODD, G. A.; TRIEST, L.; VYVERMAN, W.; WILMOTTE, A. Identifying the factors diterming blooms of cyanobacteria in a set of shallow lakes. **Ecological Informatics**, v.34, p.129-138. 2016.

DOLMAN, A. M.; RÜCKER, J.; PICK, F. R.; FASTNER, J.; ROHRLACK, T.; MISHKE, U.; WIEDNER, C. Cyanobacteria and Cyanotoxins: The Influence of nitrogen versus Phosphorus. **Plos One**, v. 7(6): e38757. **Journal.pone**.

DOGO, C. R.; BRUNI, F. M.; ELIAS, F.; RANGEL, M.; PANTOJA, P. A.; SANT'ANNA, C. L.; LIMA, C.; LOPES-FERREIRA, M.; CARVALHO, L. R. Inflammatory effects of the toxic cyanobacterium *Getlerinema amphibium*. **Toxicon**, v. 58, p.464-470. 2011.

DOKULIL, M. T.; TEUBNER, K. Cyanobacterial dominance in lakes. **Hydrobiologia**, v.438, p. 1-12. 2000.

FIGUEREDO, C. C.; PINTO-COELHO, R. M.; LOPES, A, M, M. B.; LIMA, P. H. O.; GÜCKER, A.G. From intermitente to persistent cyanobacterial blooms: Identifying the main drivers in na urban tropical reservoir. **Journal of Limnology**, v.75, p.445-454. 2016.

FREITAS, E. C.; PINHEIRO, C.; ROCHA, O.; LOUREIRO, S. Can mixtures of cyanotoxins represent a risk to the zooplankton? The case study of *Daphnia magna* Straus exposed to hepatotoxic and neurotoxic cyanobacterial extracts. **Harmful Algae**, v.31, p.143-152. 2014.

FORTIN, N.; ARANDA-RODRIGUEZ, R.; JING, H.; PICK, F.; BIRD, D.; GREER, C. W. Detection of microcystin – producing cyanobacteria in Missiquoi Bay, Quebec, Canada, using quantitative PCR. **Applied and Environmental Microbiology**, v.76, p.5105-5112. 2010.

GAO, Y.; CORNWELL, J. C.; STOECKER, D. K.; OWENS, M. S. Effects of cyanobacterial-driven pH increases on sediment nutriente fluxes and coupled nitrification-denitrification in shallow fresh water estuary. **Biogeosciences**, v.9, p.2697-2710. 2012.

GRAHAM, J. L.; LOFTIN, K. A.; MEYER, M. T.; ZIEGLER, A. C. Cyanotoxin Mixtures and Taste-and-Odor compounds in Cyanobacterial Bloms from the Midwestern United States. **Environmental Science & Tecnology**, v.44, p.7361-7368. 2010.

GER, K. A.; HANSSON, L. A.; LURLING. Understanding cyanobacteria-zooplankton interactions in a more eutrophic world. **Freshwater Biology**, v.59, p.1783-1798. 2014.

GLOBER, C. J.; BURKHOLDER, J. M.; DAVIS, T. W.; HARKE, M. J.; JOHNGEN, T.; STOW, C. A.; WAAL, D. B. V. The dual role of nitrogen supply in controlling the growth and toxicity of cyanobacterial blooms. **Harmful Algae**, v. 54, p. 87-97. 2016.

HAVENS, K. E.; JI, G.; BEAVER, J. R.; FULTON III, R. S.; TEACHER, C. E. Dynamics of cyanobacteria blooms are linked to the hydrology of shallow Florida lakes and provide insight into possible impacts of climate change. **Hydrobiologia**, p.1-17. 2017.

HILLEBRAND, H.; DÜRSELEN, C.; KÍRSCTEL, D.; POLLIGHER, U.; ZOHARY, T. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. **Journal of Phycology**, v.35, p, 403-424. 1999.

HORST, G.P.; SARNELLE, O.; WHITE, J. D.; HAMILTON, S. K.; KAUL, R. B.; BRESSIE, J. D. Nitrogen availability increases the toxin quota of a harmful cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa*. **Water Research**, v.64, p.188-198. 2014.

HUDON, C.; GAGNON, P.; LARABIE, S. P.; GAGNON, C.; LAJEUNESSE, A.; LACHAPELLE, M.; QUILLIAM, M. A. Spatial and temporal variations of a saxitoxina analogue (LWTX-1) in *Lyngbya wollei* (cyanobacteria) mats in the St. Lawrence River (Québec, Canada). **Harmful Algae**, v.57, p.69-77. 2016.

JESPERSEN, A. M.; CHRISTOFFERSEN, K. Measurements of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent. **Archiv für Hydrobiologie**, v.109, p.445-454. 1987.

KAEBERNICK, M.; NEILAN, B. A. Ecological and molecular investigations of cyanotoxin production. **Microbiology Ecology**, v.35, p.1-9. 2001.

KOMÁREK, J.; ANAGOSTIDIS, K. Modern approach to the classification system of cyanophytes 4- Nostocales. *Algalogical Studies/ Archiv für Hydrobiologia*, v. 56, p.247-345. 1989.

KOMÁREK, J. and ANAGOSTIDIS, K. Cyanoprokaryota. 2. Teil: oscillatoriales. In B. BÜNDEL, KRIENITZ, L.; GÄTNER, G.; and SCHAGERL, M. Süßwasserflora von Mitteleuropa. **München: Elsevier**, p.759. 2005.

- KOMÁREK, J.; KOMÁRKOVÁ-LEC-NEŘOVÁ, J.; SANT'ANNA, C.L.; AZEVEDO, M. T. P.; SENNA, P. A. C. Two common *Microcystis* species (Chroococcales, cyanobacteria) from tropical America, including *M. panniformis* sp. **Algologie**, v. 23, p.159-177. 2002.
- LEE, T. A.; ROLLWAGEN-BOLLENS, G.; BOLLENS, S. M.; FABER-HAMMOND, J. J. Environmental influence on cyanobacteria abundance and microcystin toxin production in a shallow temperate lake. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 114, p. 318-325. 2015.
- LOFTIN, K. A.; GRAHAM, J. L.; HILBORN, E. D.; LEHMANN, S. C.; MEYER, M. T.; DIETZE, J.E.; GRIFFITH, C. B. Cyanotoxins in inland lakes of the United States: Occurrence and potential recreational health risks in the EPA National Lakes Assessment. **Harmful Algae**, v.56, p.77-90. 2016.
- LORENZE, C. J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: Spectrophotometric equations. **Limnology Oceanography**, v.12, p.343. 1967.
- MARTINEZ, R. E.; WEBER, S.; GRIMM, C. Effects of freshwater *Synechococcus* sp. Cyanobacteria pH buffering on CaCO<sub>3</sub> precipitation: Implications for CO<sub>2</sub> sequestration. **Applied Geochemistry**, v.75, p.76-89. 2016.
- MOHAMED, Z. A. Macrophytes – cyanobacteria allelopathic interactions and their implications for water resources management - A review. **Limnologica**, v.63, p.122-132. 2017.
- MOLICA, R.; AZEVEDO, S. Ecofisiologia de cianobactérias produtoras de cianotoxinas. **Oecologia Australis**, v. 13 (2), p. 229-246. 2017.
- MOURA, A. N.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C.; CHIA, M. A.; SEVERIANO, J. S. Co-occurrence of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Sunaya e Subba Raju and *Microcystis panniformis* Komárek et al. In Mundaú reservoir, a semiarid Brazilian ecosystem. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 27, p.322-329. 2015.
- O'NEIL, J. M.; DAVIS, T. W.; BURFORD, M. A; GLOBER, C. J. The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. **Harmful Algae**, v. 14, p.313-334. 2012.
- PAERL, H. W. A comparison of cyanobacterial bloom dynamics in freshwater, estuarine and marine environments. **Phycologia**, v.35, p. 25-35. 1996.

PAERL, H. W.; HALL, N. S.; CALANDRINO, E. S. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic- induced change. **Science of the total Environment**, v. 409, p. 1739-1745. 2011.

PAERL, H. W.; PAUL, V. J. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. **Water research**, v. 46. P.1349-1363. 2012.

PAERL, H. W and OTTEN, T. G. Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences and controls. **Microbial Ecology**, v.65, p.995-1010. 2013.

PAERL, H.W.; GARDNER, W. S.; HAVENS, K. E.; JOYNER, A. R.; MCCARTHY, M. J.; NEWELL, S. E.; QIN, B.; SCOTT, J. T. Mitigating cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems impacted by climate change and anthropogenic nutrients. **Harmful Algae**, v.54, p.213-222. 2016.

PAWLIK-SKWROŃKA, B.; KALINOWSKA, R.; SKOWROŃSKI. Cyanotoxins diversity and food web bioaccumulation in a voir with decreaseing phosphorus concentrations and perennial cyanobacterial blooms. **Harmful Algae**, v.28, p. 118-125. 2013.

PAWLIK-SKOWEONSKA, B.; TOPOROWSKA. M. How to mitigate cyanobacterial blooms and cyanotoxin production in eutrophic water reservoirs? **Hydrobiologia**, v.778. p. 45-59. 2016.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHOWTA. Updated wold classification. **Hydro Earth Syst**, v.11, p.1633-1634. 2007.

PELACHATA, A.; PELACHATY, M.; PUKACZ, A. Factors influencing cyanobacteria community struture in Chara-Lakes. **Ecological Indicators**, v.71, p.477-490. 2016.

RECKNAGEL, F.; ORR, P. T.; BARTKOW, M.; SWANEPOEL, A.; CAO, H. Early warning of limit-exceeding concentrations of cyanobacteria and cyanotoxins in drinking water reservoirs by inferetial modelling. **Harmful Algae**, v.69, p.18-27. 2007.

ROJO, C.; SEGURA, M.; CORTÉS, F.; RODRIGO, M. A. Alelopathic effects of microcystin-LR on the germination, growth and metabolismo of five charophyte species and a submerged angiosperm. **Aquatic Toxicology**, v. 1-10, p. 144-145. 2013.

ROSS, J. **Práticas de ecologia**. Barcelona: Editora Omega, 1979.

TE, S. H.; GIN, K. Y. H. The dynamics of cyanobacteria and microcystin production in a tropical reservoir by inferential modelling. **Harmful Algae**, v.10, p.319-329. 2011.

TIAN, C.; PEI, H.; HU, W.; XIE, J. Variation of cyanobacteria with different environmental conditions in Nansi Lake, China. **Journal of Environmental Sciences**, v.24, p.1394-1402. 2012.

TOLEDO JR, A. P.; TALARICO M.; CHINEZ, S. J.; AGUDO, E.G. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processo da eutrofização em lagos e reservatórios Tropicais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, 12. 1983, Rio de Janeiro. **Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária**, Rio de Janeiro: ABES, p.1-34, 1983.

TUCCI, A.; SANT'ANNA, C. L.; GENTIL, R. C.; AZEVEDO, M. T. P. Fitoplâncton do lago das Graças, São Paulo, Brasil: Um reservatório urbano eutrófico. **Hoehneo**, v.33 (2), p.147-175. 2006.

UTERMÖHL, H. Zur Vervollkommnung der quantitativen phytoplankton methodik. **Mitt. Internationalen Verein Limnologie**, v.9, p.1-38. 1958.

YANG, B.; JIANG, Y.J.; HE, W.; LIU, W.X.; KONG, X. Z.; JØRGENSEN, S. E.; XU, F. L. The tempo-spatial variations of phytoplankton diversities and their correlation with trophic state levels in a large eutrophic Chinese lake. **Ecological Indicators**, v.66, p.153-162. 2016.

WALLS, J. T.; WYATT, K. H.; DOLL, J. C.; RUBENSTEIN, E. M.; ROBER, A. R. Hot and toxic: Temperature regulates microcystin release from cyanobacteria. **Science of the Total Environment**, v.610-611, p.786-795. 2018.

WOOD, S. A.; PRENTICE, M. J.; SMITH, K.; HAMILTON, D. P. Low dissolved inorganic nitrogen and increased heterocyte frequency: Precursors to *Anabaena planktonica* blooms in a temperature, eutrophic reservoir. **Journal of Plankton Research**, v.32, p. 1315-1325. 2010.