

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGROBIOLOGIA**

**PADRÕES HIDROMETEOROLÓGICOS E SEUS
EFEITOS NAS FLORAÇÕES DE CIANOBACTÉRIAS NO
RESERVATÓRIO PASSO REAL, RIO GRANDE DO SUL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANDRÉ LUIS DOMINGUES

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**PADRÕES HIDROMETEOROLÓGICOS E SEUS
EFEITOS NAS FLORAÇÕES DE CIANOBACTÉRIAS NO
RESERVATÓRIO PASSO REAL, RIO GRANDE DO SUL**

Por

André Luis Domingues

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em
Agrobiologia da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM,
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Agrobiologia.

Orientador: Prof. Dr. Galileo Adeli Buriol

Coorientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós Graduação em Agrobiologia**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Dissertação de Mestrado

**PADRÕES HIDROMETEOROLÓGICOS E SEUS EFEITOS NAS
FLORAÇÕES DE CIANOBACTÉRIAS NO RESERVATÓRIO
PASSO REAL, RIO GRANDE DO SUL**

Elaborada por
André Luis Domingues

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Agrobiologia

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Galileo Adeli Buriol (UNIFRA/UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dra. Maria Angélica Oliveira (UFSM)

Prof. Dr. Flávio Wachholz (UEA)

Santa Maria, 28 de fevereiro 2014

*Dedico este trabalho a minha filha
amada Valentina Toso Domingues
e a minha querida companheira de
todas as horas Lidiane Daniela
Toso.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Vera Becker e Jairo Domingues pela educação e valores repassados durante nossa convivência familiar, e pelo esforço e apoio incondicional aos estudos.

À minha companheira Lidiane Daniela Toso, que esteve sempre me apoiando nos momentos bons e ruins, e teve a paciência de esperar mais dois anos de correria. Te amo!!

Aos meus irmãos Leonardo e Rodrigo Domingues pelo apoio e a amizade.

Ao professor e amigo Galileo Adeli Buriol pelas orientações sempre bem elaboradas e suas sabias e valiosas lições de vida e humildade, pelos conselhos de pai e pelo exemplo a ser seguido.

À Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, instituição que possibilitou a realização da Pós-Graduação (Mestrado).

À CAPES pelo incentivo e fomento financeiro por meio da bolsa de estudos e recursos para compra de equipamentos necessários a execução deste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro ao projeto “Variação espectral e limnológica nos reservatórios em cascata no Rio Jacuí - Rio Grande do Sul”, (Processo Nº 478961/2010).

Ao INMET, pela disponibilização dos dados climáticos e meteorológicos.

À professora Maria Angélica Oliveira pela disponibilização incondicional do laboratório de Ficologia e pelo suporte durante o trabalho, principalmente nas análises estatísticas, nas dúvidas em taxonomia e nas traduções.

Ao professor Waterloo Pereira Filho pela amizade, orientações e por compartilhar suas experiências de campo conosco. Mas principalmente pelo apoio logístico e a disponibilização da estrutura de campo e de laboratório para a realização deste trabalho.

Ao professor Evandro Zanini Righi pelas colaborações no trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Ficologia, pela convivência e amizade adquirida nestes dois anos de mestrado. Principalmente as mestrandas Ana Paula Vestena Cassol e Juliana Ferreira da Silva por todas as dificuldades e

desafios que encaramos juntos nesses dois anos de peleia, sempre com alto astral e sorriso no rosto! Também ao nosso futuro mestrando José A. Souza de Souza Júnior pela parceria de campo.

Aos colegas Flávio, Diego, Rosana, Daniela, Felipe, William, Gustavo, Greice e Patrícia e demais membros do Laboratório de Geotecnologias da Universidade Federal de Santa Maria.

Aos amigos Regis e Alencar que sempre estão me ajudando nas horas boas ou ruins.

Aos meus sogros Celso C. Toso e Marli Toso e demais familiares que sempre deram suporte a minha família quando necessário.

A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Agrobiologia
Universidade Federal de Santa Maria

PADRÕES HIDROMETEOROLÓGICOS E SEUS EFEITOS NAS FLORAÇÕES DE CIANOBACTÉRIAS NO RESERVATÓRIO PASSO REAL, RIO GRANDE DO SUL

AUTOR: André Luis Domingues

ORIENTADOR: Dr. Galileo Adeli Buriol

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 28 de fevereiro de 2014.

A ocorrência de florações de cianobactérias potencialmente tóxicas tem sido frequente em lagos e reservatórios no Brasil, ocasionando problemas econômicos e riscos à saúde pública. No Rio Grande do Sul há uma série de cinco reservatórios formando um sistema em cascata no Alto Curso do Rio Jacuí. O reservatório Passo Real compõe esse sistema e tem como principal função acumular água para a geração de energia elétrica e regular vazões para os reservatórios a jusante, servindo também aos demais usos múltiplos da água. Florações de cianobactérias têm sido registradas com frequência neste reservatório, possivelmente pelo longo tempo de residência da água, associado às condições meteorológicas e ao aporte de nutrientes, decorrente da intensa atividade agrícola sobre sua bacia de drenagem. Diante do exposto, objetivou-se, neste trabalho: a) verificar a ocorrência de padrões nas condições meteorológicas, hidrológicas e limnológicas e a relação destes com as florações de cianobactérias; b) caracterizar o regime anual de circulação e estratificação térmica da água; e c) determinar quais as condições ambientais para a ocorrência de florações dispersivas e acumulativas em superfície e quais as espécies adaptadas a cada uma das florações. Para isto foram coletadas 60 amostras de fitoplâncton no reservatório Passo Real, entre outubro de 2009 e janeiro de 2013. As cianobactérias foram identificadas, estimada a densidade e o biovolume de cada espécie e as florações foram classificadas como dispersivas ou acumulativas em superfície. Foram determinadas as disponibilidades de radiação solar, brilho solar, temperatura do ar, precipitação pluviométrica, direção e velocidade do vento, assim como as variáveis meteorológicas do período coletado. Variáveis hidrológicas (vazão afluente e defluente, cota altimétrica, volume útil e tempo de residência) e limnológicas (Transparência, temperatura da água, pH, condutividade elétrica, total de sólidos dissolvidos e clorofila-a) foram caracterizadas. Dentre as variáveis meteorológicas, hidrológicas e limnológicas analisadas no período estudado, aquelas que tiveram uma influência favorável para a ocorrência das florações foram: precipitações pluviométricas elevadas (>20mm), registradas até 10 dias antes das coletas; ocorrência de temperatura média do ar diária acima de 15°C nos trinta dias que antecederam as coletas; baixa velocidade do vento (<2m·s⁻¹) nos dias que antecederam as coletas com florações; elevadas vazões afluentes, decorrentes das precipitações elevadas, coincidentes com os períodos de entressafra dos cultivos agrícolas; longo

tempo de residência da água, média de 132 dias durante os meses com florações; temperaturas elevadas e estratificação térmica da água no período de outubro a março. O reservatório Passo Real foi classificado como monomítico quente, com apenas uma circulação vertical completa no inverno e estratificação térmica no verão. Florações dispersivas ocorreram em condições de velocidade do vento acima de $7,9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Florações acumulativas de superfície ocorreram em condições de velocidade do vento abaixo de $5,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Espécies do gênero *Dolichospermum* estão melhores adaptadas a formar florações dispersivas, principalmente as espécies *D. crassum* e *D. circinalis*. Já espécies do gênero *Microcystis* estão melhor adaptadas a formar florações acumulativas em superfície, com destaque para *M. aeruginosa* e *M. panniformis*, indicadoras deste tipo de floração.

Palavras-chave: microestratificações, qualidade da água, eutrofização, Rio Jacuí.

GENERAL ABSTRACT

Dissertation
Graduate Program in Agrobiolology
Federal University of Santa Maria

HYDROMETEOROLOGICAL PATTERNS AND ITS EFFECTS ON THE CYANOBACTERIAL BLOOMS IN RESERVOIR PASSO REAL, RIO GRANDE DO SUL

Potentially toxic cyanobacterial blooms have been frequent in Brazilian lakes and reservoirs, causing economic issues as well as public health risks. In Rio Grande do Sul, a series of five reservoirs in the high course of the River Jacuí form a cascade system. One of the reservoirs, Passo Real, mainly accumulates water for hydroelectrical power generation and also regulates water flow to downstream reservoirs, amongst other uses. Blooms of cyanobacteria have been frequently recorded in this water body, possibly due to the long water residence time, associated to weather conditions and nutrient runoff from intense agricultural activities in the surrounding area. The study described herein aimed to: a) verify patterns of climatic, hydrological and limnological conditions, as well as their relationship with blooms of cyanobacteria; b) describe the yearly circulation regime, and thermal stratification of the water column; c) define the most favourable environmental conditions for the incidence of both dispersive and surface accumulative blooms, and also which species are adapted to each bloom type. 60 phytoplankton samples were taken from Passo Real reservoir between October 2009 and January 2013. Cyanobacteria species were identified and counted to estimate specific density and specific biovolume. Each bloom was assigned to a class: dispersive or surface accumulative. Measurements of solar radiation availability, solar shine, air temperature, rainfall, direction, and velocity of wind were taken, and also weather conditions for the sampling period were recorded. Hydrological (inflow, outflow, altitude, usable volume and residence time) and limnological (transparency, water temperature, pH, electric conductivity, total dissolved solids and chlorophyll-a) variables were also measured. The most influential variables favouring bloom formation were: intense rainfall (>20mm) up to ten days before sampling; air temperature mainly above 15°C thirty days before sampling; low wind speed (<2m·s⁻¹); high inflow caused by intense rainfall, coinciding with agricultural off season; long water residence time, 132 days on average on months with blooms; warmer temperatures and thermal stratification of the water between October and March. The reservoir was classified as warm monomictic, with only one complete vertical circulation in the winter and thermal stratification in the summer. Dispersive blooms were found when wind speed was above 7,9m·s⁻¹, and surface accumulative blooms occurred when wind

speed was below $5,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Species of the genus *Dolichospermum* were more adapted to produce dispersive blooms, mainly *D. crassum* and *D. circinalis*. On the other hand, species of *Microcystis* were better adapted to surface accumulative blooms, namely *M. aeruginosa* and *M. panniformis*, which were also indicator species for this type of bloom.

Keywords: water residence time, water quality, eutrophication, *Dolichospermum*, *Microcystis*.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Exemplo ilustrando a estratificação em lagos e reservatórios. Adaptado de (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008)..... 25
- Figura 2.** Localização e perfil longitudinal do alto curso do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul, com a distribuição dos reservatórios que compõem o sistema em Cascata. Fonte: (WACHHOLZ; PEREIRA FILHO, 2011). 27
- Figura 3.** Distribuição dos pontos amostrais no reservatório Passo Real e informações das campanhas de campo e os respectivos pontos com coleta de fitoplâncton. 28
- Figura 4.** Densidade de cianobactérias nas florações encontradas nas águas do reservatório Passo Real entre 2009 e 2013. Florações acumulativas (A), florações dispersivas (D). Linha tracejada vermelha indica $20.000 \text{ cél}\cdot\text{mL}^{-1}$, densidades de cianobactérias iguais ou superiores a esse valor caracterizam um evento de floração (OLIVER e GANF, 2000)..... 35
- Figura 5.** Imagens das florações encontradas no reservatório Passo Real. Florações acumulativas em superfície: A - 21 de outubro de 2009, B - 12 de março de 2010 e C - 10 de junho de 2010. Florações dispersivas: D - 17 de dezembro de 2009, E - 14 de janeiro de 2010 e F - 01 de novembro de 2010. 36
- Figura 6.** Morfologia das diferentes espécies de cianobactérias que ocorreram nas florações entre 2009 e 2013 na represa Passo Real. A – *Microcystis aeruginosa* (aumento de 400x), B – *M. panniformis* (400x), C - *M. wesenbergii* (400x), D - *M. protocystis* (400x), E – *Dolichospermum circinalis* (400x), F - *D. crassum* (400x), G - *D. planctonicum* (400x), H - *D. mendotae* (400x), I - *D. spiroides* (400x), J - *D. solitarium* (400x) e K - visão ampla da floração de *Microcystis spp.* registrada em 12 de março de 2010 (100x). 38
- Figura 7.** Análise de componentes principais, demonstrando o padrão de zonação (rio, transição e lago) nas águas do reservatório Passo Real, definido pelos gradientes de transparência (DS), totais de sólidos em suspensão (TSS) e clorofila-a (Chl.a) coletados em 31 pontos no reservatório entre outubro de 2009 e junho de 2010. Os pontos numerados são aqueles onde tiveram ocorrência de florações. Importância dos componentes: Autovalores PC1 (2,0352), PC2 (0,6983) e PC3 (0,26647); Proporção de explicação PC1 (0,6784), PC2 (0,2328) e PC3 (0,08882); Proporção Acumulativa PC1 (0,6783), PC2 (0,9112) e PC3 (1,00)..... 39
- Figura 8.** Variação do biovolume de *Microcystis* e *Dolichospermum* em porcentagem e em $\text{mm}^3\cdot\text{L}^{-1}$, nas diferentes florações encontradas no reservatório Passo Real, entre 2009 e 2013. 40

Figura 9. Variação do biovolume e composição de espécies de <i>Dolichospermum</i> e <i>Microcystis</i> nas diferentes florações encontradas no reservatório Passo Real, entre 2009 e 2013.	41
Figura 10. Disponibilidades climáticas de radiação solar global, temperatura do ar, brilho solar total mensal e precipitação pluviométrica, obtidas nas estações climatológicas da FEPAGRO e do INMET, localizadas no município de Cruz Alta, Rio Grande do Sul.	44
Figura 11. Disponibilidades de velocidade e direção do vento, obtidas a partir da estação climatológica do INMET, localizada no município de Cruz Alta, Rio Grande do Sul.	46
Figura 12. Frequência relativa do registro de florações de cianobactérias em cada campanha de campo no reservatório Passo Real, considerando o número de pontos amostrados com floração em relação ao total de pontos amostrados em cada campanha.	47
Figura 13. (A) Brilho solar total mensal normal e brilho solar total mensal observado entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2013. (B) Brilho solar acumulado em 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias anteriores as coletas com florações. *coletas em que foram registradas florações.	48
Figura 14 (A) Variação do coeficiente de determinação (R^2) da análise de correlação entre a frequência em que foram encontradas as florações em cada coleta e o acumulado de horas de brilho solar em 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias anteriores a cada coleta. (B) Dispersão entre a frequência em que foram encontradas as florações no reservatório Passo Real em cada coleta e o acumulado de insolação nos 30 dias anteriores as coletas (n=7).	49
Figura 15. (A) Temperatura média mensal normal do ar e temperatura média mensal do ar observada entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2013. (B) Distribuição das classes de temperatura nos 30 dias anteriores as coletas com floração no reservatório Passo Real. *coletas em que foram registradas florações.	50
Figura 16. Variação da temperatura do ar nos 30 dias anteriores as coletas com floração no reservatório Passo Real, (A) coletas de inverno e primavera e (B) coletas do verão.	52
Figura 17. (A) Precipitação mensal normal e precipitação mensal observada entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2013. (B) Precipitação acumulada nos 5 dias, 10 dias, 15 dias, 20 dias, 25 dias e 30 dias anteriores as coletas com florações. (C) Dispersão entre a ocorrência de florações nos pontos amostrados em cada coleta e a precipitação acumulada nos 10 dias anteriores a cada coleta (n=7). *coletas em que foram registradas florações.	53
Figura 18. (A) Variação do coeficiente de determinação (R^2) resultante da análise de correlação entre a ocorrência de florações nos pontos amostrados em cada coleta e o número de dias com chuva acima de 5, 10, 15, 20 e 30mm	

nos 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias anteriores as coletas com floração. (B) Dispersão entre o número de dias com chuva acima de 20mm nos 10 dias que antecederam as coletas com floração (n=7).	54
Figura 19. (A) Velocidade do vento mensal normal e velocidade do vento mensal observada entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2013. (B) Dispersão entre a ocorrência de florações nos pontos amostrados em cada coleta e o número de dias com velocidade do vento menor que $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, (n=7). *coletas em que foram registradas florações.	55
Figura 20. Vazão afluyente média mensal (Qaf) do reservatório Passo Real e média mensal de precipitação pluviométrica, da estação pluviométrica de Cruz Alta (INMET), entre janeiro de 2009 e janeiro de 2013, exceto 2011.....	56
Figura 21. Tempo de residência teórico da água (TRT) e vazão defluente (Qdef) do reservatório Passo Real entre janeiro de 2009 e janeiro de 2013....	58
Figura 22. Variação temporal da temperatura na coluna d'água do reservatório Passo Real, entre 17 de maio de 2013e 19 de dezembro de 2013.....	60
Figura 23. Variáveis limnológicas coletadas nos dias em que ocorreram florações no reservatório Passo Real.....	61
Figura 24. Medidas de tendência central das variáveis transparência da água (Disco de Secchi), zona fótica e razão entre zona fótica e profundidade total, nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s). ...	62
Figura 25. Medidas de tendência central da velocidade do vento, temperatura do ar e temperatura da água nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).....	63
Figura 26. Medidas de tendência central das variáveis condutividade elétrica (CE), total de sólidos dissolvidos (TDS) e potencial hidrogeniônico (pH) nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).	64
Figura 27. Medidas de tendência central das variáveis ângulo de incidência solar, radiação solar no topo da atmosfera e horário de coleta, nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).....	65
Figura 28. Medidas de tendência central do biovolume ($\text{mm}^3\cdot\text{mL}^{-1}$) dos gêneros <i>Dolichospermum</i> (Dol) e <i>Microcystis</i> (Mic) nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).....	65
Figura 29. Medidas de tendência central do biovolume ($\text{mm}^3\cdot\text{mL}^{-1}$) das espécies <i>D. circinalis</i> (D.cir), <i>D. crassum</i> (D.cra), <i>M. aeruginosa</i> (M.ae) e <i>M. panniformis</i> (M.pa) nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).....	66
Figura 30. Resultado do NMDS aplicado ao biovolume das espécies de <i>Microcystis</i> e <i>Dolichospermum</i> presentes nas florações do reservatório Passo Real, durante as coletas de 2009 a 2013, para verificar aquelas com ocorrência em florações dispersivas (d) e em florações acumulativas em superfície (s). <i>M.</i>	

panniformis (M.pa), *M. wesenbergii* (M.we), *M. aeruginosa* (M.ae), *M. protocystis* (M.pr), *D. circinalis* (D.cir), *D. crassum* (D.cra), *D. planctonicum* (D.pl), *D. mendotae* (D.men) e *D. solitarium* (D.sol). As linhas vermelhas unem os pontos com ocorrência de florações dispersivas (d) e florações acumulativas em superfície (s). As elipses identificam o centro dos dois grupos de pontos amostrais, das florações dispersivas e acumulativas em superfície. 67

Figura 31. Resultado do NMDS aplicado ao biovolume das espécies de *Microcystis* e *Dolichospermum* presentes nas florações do reservatório Passo Real, durante as coletas de 2009 a 2013, em um gradiente de velocidade do vento ($m \cdot s^{-1}$) no momento da coleta, isolinhas em vermelho. *M. panniformis* (M.pa), *M. wesenbergii* (M.we), *M. aeruginosa* (M.ae), *M. protocystis* (M.pr), *D. circinalis* (D.cir), *D. crassum* (D.cra), *D. planctonicum* (D.pl), *D. mendotae* (D.men) e *D. solitarium* (D.sol). Pontos amostrais com florações dispersivas (d) e acumulativas em superfície (s)..... 68

Figura 32. Resultado do NMDS aplicado ao biovolume das espécies de *Microcystis* e *Dolichospermum* presentes nas florações do reservatório Passo Real, durante as coletas de 2009 a 2013, em um gradiente de temperatura da água ($^{\circ}C$) no momento da coleta, isolinhas em vermelho. *M. panniformis* (M.pa), *M. wesenbergii* (M.we), *M. aeruginosa* (M.ae), *M. protocystis* (M.pr), *D. circinalis* (D.cir), *D. crassum* (D.cra), *D. planctonicum* (D.pl), *D. mendotae* (D.men) e *D. solitarium* (D.sol). Pontos amostrais com florações dispersivas (d) e acumulativas em superfície (s)..... 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva das variáveis hidrológicas, referentes ao período de janeiro de 2009 a janeiro de 2013, com exceção de 2011. Vazão afluente (Q_a), vazão defluente (Q_d), tempo de residência (TRT), Cota altimétrica (Cota). *Dados referentes aos meses que tiveram florações de cianobactérias. 57

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
REFERENCIAL TEÓRICO	19
Cianobactérias	20
Florações	21
Condições meteorológicas e as florações	22
Estratificação térmica	24
METODOLOGIA	26
Área de estudo	26
Coleta do fitoplâncton e caracterização das florações	27
Coleta e determinação das variáveis limnológicas	30
Determinação das normais climatológicas	31
Determinação das variáveis meteorológicas	32
Determinação das variáveis hidrológicas	32
Obtenção da temperatura na coluna d'água	33
Análises estatísticas utilizadas	33
RESULTADO E DISCUSSÃO	35
Caracterização das florações de cianobactérias	35
Disponibilidades climáticas	42
Condições meteorológicas no período de observações	46
Caracterização hidrológica.....	55
Temperatura da água, circulação e estratificação térmica da coluna d'água... 59	
Caracterização limnológica	61
CONCLUSÕES	71
RECOMENDAÇÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

INTRODUÇÃO

Cianobactérias são microrganismos fotossintetizantes que habitam naturalmente os ecossistemas aquáticos. Este grupo surgiu a aproximadamente 3,5 bilhões de anos e foram os pioneiros no processo fisiológico da fotossíntese, sendo fundamentais na transformação da atmosfera terrestre (SCHOPF, 2000). Ao longo dessa história evolutiva foram adquirindo adaptações aos mais variados tipos de ambientes, tornando-se muito competitivos. Em ecossistemas aquáticos, compõem o fitoplâncton e podem em condições favoráveis formar florações, com acúmulo de elevada biomassa, prejudicando a qualidade da água e o equilíbrio do ecossistema.

Elevadas concentrações destes organismos, podem produzir níveis preocupantes de toxinas e outros compostos na água, incluindo substâncias causadoras de gosto e odor (CYBIS et al., 2006). Esse fenômeno pode expor à saúde pública a situações de risco, causar alterações nas comunidades que integram os ecossistemas aquáticos, e gerar problemas técnicos e econômicos no tratamento da água, e em criações de animais. (YUNES et al., 2005; AZEVEDO, 2002; MÜLLER et al., 2009; FALCONER, 2002).

As florações de cianobactérias também degradam as águas superficiais utilizadas no lazer e recreação, particularmente, em locais onde formam espumas superficiais, o que torna perigosa a prática de esportes de contato, sendo comum nestas situações a desoxigenação da água e a consequente morte de peixes (OLIVER e GANF, 2000).

Esse fenômeno tem sido encontrado com frequência em ecossistemas aquáticos continentais, marinhos e estuarinos em várias regiões do mundo (CYBIS et al., 2006; PAERL et al., 2011; MATTHIENSEN et al., 1999). A expansão geográfica das florações de cianobactérias é uma preocupação global, pois já compromete a qualidade da água e a integridade ecológica de grandes corpos hídricos, como o lago Vitória, na África; o lago Érie, nos Estados Unidos e Canadá (HAVENS et al., 2001); o lago Guaíba (CYBIS et al., 2006) e o estuário da lagoa dos Patos, no Brasil (MATTHIENSEN et al., 1999).

Esse problema tem sido verificado em muitos reservatórios brasileiros, ocorrendo de norte a sul do país. São exemplos os reservatórios Tapacurá (MOLICA et al., 2005), Armando Ribeiro Gonçalves (COSTA et al., 2006) e

Ingazeira (BOUVY et al., 1999), na Região Nordeste; o reservatório Utinga (VIEIRA, et al., 2005), na Região Norte; os reservatórios Barra Bonita (SOTERO-SANTOS et al., 2006), Mojolinho (SOTERO-SANTOS et al., 2008), Lajes e Funil (FERRÃO-FILHO et al., 2009), na Região Sudeste; e os reservatórios Itaúba, Ernestina e Rodolfo Costa e Silva (WERNER e LAUGHINGHOUSE, 2009), na região Sul.

No estado do Rio Grande do Sul, florações de cianobactérias têm sido encontradas com frequência no reservatório da Usina Hidrelétrica Passo Real (WACHHOLZ; PEREIRA FILHO, 2011). Fatores como, longo tempo de residência da água e as características fortemente agrícolas da bacia de drenagem (áreas exportadoras de nutrientes), associadas às condições meteorológicas ocorrentes, podem estar contribuindo para o aparecimento frequente de cianobactérias em elevadas concentrações.

Na Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí, além do reservatório Passo Real, há outros reservatórios, que constituem um sistema em cascata, distribuídos de montante para jusante da seguinte forma: Ernestina (1954), seguido por Passo Real (1973), Maia Filho (1963), Itaúba (1978) e Dona Francisca (2000). Estes reservatórios modificaram as características naturais das águas do Alto Curso do Rio Jacuí, alterando o regime de vazão e o balanço de sedimento e nutrientes, tornando-o um ambiente de características lóticis em um ambiente lântico.

Estas modificações tem sido o foco dos estudos realizados pelos pesquisadores do Laboratório de Geotecnologias da Universidade Federal de Santa Maria, que durante 2010 a 2013 trabalharam no projeto intitulado “Variação espectral e limnológica nos reservatórios em cascata no Rio Jacuí - Rio Grande do Sul”, coordenado pelo Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Maria, financiado pelo CNPq (Processo Nº 478961/2010). Neste projeto foram coletados dados de campo no sentido de compreender a dinâmica limnológica dos cinco reservatórios que compõem a série em Cascata do Alto Jacuí (Ernestina, Maia Filho, Itaúba, Passo Real e Dona Francisca) e a relação destes com os dados de sensoriamento remoto (imagens de satélite e espectrorradiometria de campo). Entretanto, até o momento, nada se conhece a respeito da dinâmica de mistura e estratificação térmica da água no reservatório Passo Real, o que pode estar sendo

preponderante para o surgimento das florações. Estas e outras condições ambientais devem ser investigadas, pois, podem estar agindo sinergicamente para que as florações de cianobactérias ocorram nesse ambiente.

Diante do exposto, com a análise e interpretação dos dados coletados no reservatório Passo Real e seu entorno, objetivou-se, neste trabalho: a) verificar a ocorrência de padrões nas condições meteorológicas, hidrológicas e limnológicas e a relação destes com as florações de cianobactérias; b) caracterizar o regime anual de circulação e estratificação térmica da água; e c) determinar quais as condições ambientais para a ocorrência de florações dispersivas e acumulativas em superfície e quais as espécies adaptadas a cada uma das florações.

REFERENCIAL TEÓRICO

No Brasil, os primeiros reservatórios de água foram construídos com a finalidade de irrigação agrícola. Posteriormente, destinaram-se à prevenção de cheias, e mais recentemente a outros usos como a navegação, o abastecimento de água potável, a pesca, o abastecimento hídrico industrial, a geração de energia elétrica e a recreação (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

De acordo com a Comissão Mundial sobre Barragens (WCD, 2000), até 60% dos 227 maiores rios do mundo foram muito ou moderadamente fragmentados por barragens, desviados ou canalizados, causando efeitos sobre os ecossistemas em geral. Segundo Tundisi (1994), os impactos ambientais mais comuns estão associados ao tamanho da área alagada, ao volume de água do reservatório, ao tempo de residência da água e à sua localização geográfica. Dentre os impactos, podem ser destacados: inundação de áreas agrícolas, alteração do padrão migratório de peixes, perda de flora e fauna aquática, mudança no regime hidrológico, balanço de sedimento, disseminação de doenças, perda de locais históricos e culturais, efeitos sociais e atividade econômica local.

Um dos usos múltiplos da água ocorre na produção de hidroeletricidade, que, no caso do Brasil, supre cerca de 85% da energia elétrica necessária ao

país (TUNDISI, 2005). Os reservatórios hidrelétricos apresentam um grande número de benefícios socioeconômicos, tais como, produção de energia, atividades recreativas e esportivas, pesca comercial, controle de inundações e suprimento de água. Porém, por serem ambientes com características lênticas, muitas vezes, condicionam o aparecimento de florações de cianobactérias.

Cianobactérias

Cianobactérias são organismos procariontes, isto é, não possuem núcleo verdadeiro e não têm conteúdo celular diferenciado dentro de membranas, sendo ausentes estruturas como plastos e mitocôndrias (SOUZA, 2006). Também não possuem estruturas móveis, como flagelos (REYNOLDS, 1997). Estes organismos são classificados no reino Eubacteria de acordo com a Microbiologia, porém, de acordo com o Código Internacional de Nomenclatura Botânica por serem fotossintetizantes formam a divisão Cyanophyta (REVIERS, 2006).

Algumas cianobactérias que possuem células com paredes delgadas, estão geralmente cobertas por substâncias mucilaginosas que às vezes formam filamentos. As formas filamentosas predominam no grupo e são, na maioria, bentônicas, embora alguns gêneros no plâncton sejam considerados de suma importância, tais como, *Dolichospermum*, *Anabaenopsis*, *Aphanizomenon*, *Lyngbya* e *Oscillatoria*. As formas cocoidais podem ser constituídas de células únicas ou de colônias e estão representadas no plâncton por alguns gêneros, destacando-se *Microcystis*, *Gomphosphaeria*, *Chroococcus*, *Aphanocapsa* e *Synechococcus* (DI BERNARDO, 1995).

As cianobactérias possuem clorofila-*a* e alguns pigmentos acessórios característicos, denominados de ficobilissomos, como a ficocianina, a ficoeritrina e a aloficocianina (REVIERS, 2006). São organismos aeróbios, que requerem para seus processos vitais água, dióxido de carbono, substâncias inorgânicas e luz. A fotossíntese é seu principal modo de obtenção de energia para os processos metabólicos de biossíntese, crescimento e multiplicação, produzindo oxigênio molecular. O processo reprodutivo é sempre assexuado, geralmente ocorrendo por fissão binária da célula (REYNOLDS, 1997).

Algumas cianobactérias podem apresentar aerótopos (vesículas gasosas) que permitem regular sua posição na coluna d'água (WALSBY, 1994). Essa capacidade de movimentação vertical na coluna d'água, de acordo com a disponibilidade de luz, de nutrientes e ausência de predadores, lhes confere também proteção aos efeitos foto-oxidantes e pode ser favorável para seu rápido crescimento, causando como consequência, florações nos corpos d'água (REYNOLDS, 1997).

A grande maioria das cerca de 2.400 espécies de cianobactérias são de água doce. Essa abundância nesses ambientes se explica, devido à maioria das espécies possuírem melhor crescimento em águas neutras a alcalinas (pH 6 a 9), temperatura entre 15 e 30°C e alta concentração de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo (CEBALLOS; AZEVEDO; BENDATE, 2006).

Algumas cianobactérias presentes em águas doces são tóxicas, especialmente as dos gêneros *Microcystis*, *Nodularia*, *Dolichospermum*, *Cuspidothrix* e *Oscillatoria*. Dentre os organismos aquáticos que podem ser afetados pelas toxinas produzidas, encontram-se outras algas, invertebrados planctônicos, peixes e algumas aves e mamíferos (DI BERNARDO, 1995).

Embora atualmente sejam mais conhecidas pela sua capacidade de sintetizar potentes toxinas, existem espécies benéficas e de aplicação biotecnológica. Cianobactérias pertencentes à ordem Nostocales são capazes de fixar nitrogênio molecular, podendo contribuir com cerca de 50% do nitrogênio total fixado em alguns corpos d'água. Essa fixação é possível por meio de células diferenciadas, chamadas heterócitos (DI BERNARDO, 1995).

Florações

As florações algais são resultado da interação de fatores físicos, químicos e bióticos, caracterizadas por crescimento explosivo, autolimitante e de curta duração dos microrganismos de uma ou de poucas espécies, frequentemente produzindo visíveis colorações em corpos d'água naturais (CALIJURI; ALVES; SANTOS, 2006). Para águas de abastecimento ou recreação, as florações são frequentemente definidas em termos de concentração de células que causam problemas para a população humana, neste caso considera-se como critério a presença de uma concentração

mínima de $10\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ de clorofila-*a* e uma densidade mínima de $20.000\text{células}\cdot\text{mL}^{-1}$ de cianobactérias (OLIVER; GANF, 2000).

Florações de cianobactérias podem ser classificadas conforme a distribuição de suas células ou indivíduos na coluna d'água, sendo chamadas de: acumulativa em superfície, quando há o acúmulo de elevadas concentrações nos primeiros centímetros da superfície d'água; acumulativa em profundidade, quando há o acúmulo de elevadas concentrações de cianobactérias em uma determinada profundidade; e dispersiva, quando as células estão dispersas na coluna d'água (DE LÉON e BONILLA, 2009).

Esses eventos podem causar vários efeitos negativos na qualidade da água, como a liberação de toxinas, a ocorrência de gosto e odor, e a desoxigenação da coluna d'água (BOUVY et al., 1999; PAERL et al., 2001). As toxinas liberadas podem afetar tanto a saúde animal como a humana, e causar prejuízos econômicos, como o aumento no custo do tratamento das águas de abastecimento, e perdas em criações de animais (pecuária e piscicultura) (OLIVER e GANF, 2000; YUNES et al., 2005).

Em virtude disso, muitos pesquisadores têm procurado explicações para o domínio desses organismos. Algumas características típicas e interessantes já foram constatadas, como a capacidade de adaptação em águas de temperaturas mornas, utilizar baixa intensidade de luz, regular a flutuação, produzir toxinas, armazenar fósforo e uma maior velocidade reprodutiva (FERNANDES et al., 2009; CALIJURI; ALVES; SANTOS, 2006; OLIVER; GANF, 2000).

Condições meteorológicas e as florações

Condições meteorológicas, tais como, temperatura do ar, precipitação, radiação solar e vento podem vir a alterar algumas características limnológicas em lagos e reservatórios (VARIS; SOMLYÓDY, 1993). Como consequência, podem contribuir na formação e desenvolvimento de florações de cianobactérias nesses ambientes.

A radiação solar é essencial para que ocorra a fotossíntese. Além disso, a radiação que incide na superfície da água é o principal processo que gera aquecimento térmico em lagos e reservatórios. As radiações de ondas longas

do espectro solar, no infravermelho, são absorvidas nos primeiros centímetros da coluna d'água e já no primeiro metro de profundidade cerca de 60% da energia radiante se transforma em calor (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

A temperatura da água pode atuar de forma direta ou indireta na formação das florações. A ação direta tem efeitos sobre o metabolismo celular, envolvendo a capacidade fotossintética, a taxa de respiração específica e a razão de crescimento das cianobactérias (ROBARTS; ZOHARY, 1987). A ação indireta envolve as condições de mistura e estabilidade da coluna d'água que são comandadas pelo gradiente térmico entre as camadas de água e pela turbulência gerada pelo vento (ESTEVES, 1998). Condições estáveis da coluna d'água permitem que algumas populações de cianobactérias possam migrar para superfície d'água, elevando a concentração de células na superfície, caracterizando situações de floração (OLIVER; GANF, 2000).

A variação do regime pluviométrico também é um fator que poderá alterar algumas variáveis limnológicas como o pH e a condutividade elétrica (BORGES, 2008). O pH é uma variável determinante para a ocorrência de florações, pois as cianobactérias se desenvolvem muito bem numa faixa de pH entre 6 e 9 (CEBALLOS; AZEVEDO; BENDATE, 2006). Uma elevada condutividade elétrica da água pode ser o indicativo da contaminação de rios e lagos, por descargas de efluentes industriais e domésticos, os quais podem ter em sua constituição material orgânico, que sofre decomposição e libera íons na água (BOLLMAN, 2003), tais como o fósforo, nutriente importante para o desenvolvimento das cianobactérias (CALIJURI; ALVES; SANTOS, 2006).

Alguns eventos climáticos anômalos, podem ocasionar mudanças nas variáveis meteorológicas, principalmente na temperatura e na distribuição das precipitações pluviométricas, intensificando períodos de calor, secas e cheias, tais como, ondas de calor, veranicos, El Niño e La Niña (VARIS; SOMLYÓDY, 1993; BRANCO et al., 2009; PAERL et al., 2011). Estes eventos podem ocasionar algumas alterações nas características limnológicas e hidrológicas de lagos e reservatórios e como consequência vir a favorecer a ocorrência de florações de cianobactérias (PAERL et al, 2011). No entanto, a carência de experimentos em larga escala espacial e temporal, tem limitado as predições

dos efeitos destes fenômenos no surgimento de florações (FERNANDES et al., 2009).

Estratificação térmica

Em lagos ou represas que possuem temperaturas uniformes em toda a coluna d'água, a propagação do calor através de toda a massa líquida pode ocorrer com muita eficiência, pois nestas condições, a densidade da água é praticamente igual. Nesse contexto, o vento é o principal agente fornecedor de energia para a mistura das massas d'água (ESTEVES, 1998).

Por outro lado, quando as diferenças de temperatura geram camadas d'água com diferentes densidades, que em si já formam uma barreira física (resistência térmica relativa), impedindo que se misturem, e se a energia do vento não for o suficiente para misturá-las, o calor não se distribui uniformemente, criando condições de estabilidade térmica. Quando ocorre este fenômeno o ecossistema aquático está estratificado termicamente (ESTEVES, 1998).

O aquecimento da água pela radiação solar estabelece uma camada de água menos densa e com temperatura mais elevada na superfície, figura 1. Essa camada é chamada de epilímnio. A camada de água inferior, mais densa e com temperaturas mais baixas, é denominada hipolímnio. A camada intermediária entre o epilímnio e o hipolímnio é denominada de metalímnio, que por se tratar de uma camada de transição, torna difícil a definição de seus limites. Quando no metalímnio ocorre um declínio na temperatura de pelo menos 1°C a cada metro, é possível traçar um plano imaginário conhecido como termoclina planar (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

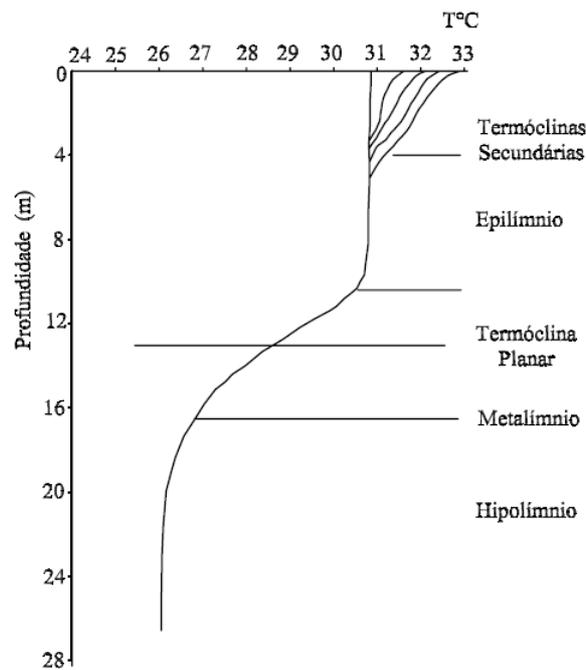


Figura 1. Exemplo ilustrando a estratificação em lagos e reservatórios. Adaptado de (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

Segundo Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008) o conceito de plano imaginário no lago, dividindo-o em duas camadas, uma iluminada, com circulação completa e produtiva, e outra escura, com circulação reduzida, onde prevalecem processos de decomposição é muito útil para compreender processos de funcionamento em lagos e represas.

As diferenças de densidade da água se acentuam com temperaturas mais elevadas, razão por que o processo de estratificação e estabilização do lago é maior, mesmo quando as diferenças térmicas entre temperaturas da superfície e da profundidade são relativamente pequenas (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008). Por exemplo, os valores de diferença de densidade da água entre 4°C e 5°C ($8 \cdot 10^{-6} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) são significativamente inferiores àqueles observados entre 24°C e 25°C ($252 \cdot 10^{-6} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), ou seja, os valores de diferença de densidade encontrados na segunda situação são 31 vezes superiores aos encontrados quando a água passa de 4°C para 5°C, portanto, as diferenças de resistência térmica a mistura da água são cada vez maiores com a elevação da temperatura da água (ESTEVES, 1998).

Em ambientes lênticos de regiões tropicais a diferença de temperatura da água de aproximadamente 2°C entre a superfície e o fundo da coluna d'água é suficiente para estabelecer uma diferença de densidade, induzindo

uma estratificação termal (MEIS; TUNDISI, 1986, citado por BRANCO et al., 2009). Mesmo diferenças de $0,3^{\circ}\text{C}$ podem levar a uma separação termal entre massas d'água, sendo chamadas de microestratificações (HENRY et al., 1997).

As regiões de clima subtropical se caracterizam por duas estações, diretamente combinadas à época de chuva: uma mais quente e outra menos quente, com uma variação de temperatura anual maior que a diária. Em lagos situados nesta região ocorrem duas fases: circulação na época de chuva e estagnação no verão (SCHÄFER, 1985).

METODOLOGIA

Área de estudo

O reservatório Passo Real (PR) está localizado na bacia hidrográfica do Alto Jacuí, figura 2, onde compõe um sistema em cascata com cinco reservatórios, situando-se a jusante do reservatório Ernestina e a montante dos reservatórios Maia Filho, Itaúba e Dona Francisca. Seus principais contribuintes são os rios Jacuí, Jacuí-Mirim e Ingaí, componentes da drenagem de uma área de aproximadamente 8.200 Km^2 , com cerca de 64% desta área sendo utilizada para cultivos agrícolas, onde o solo predominante é o latossolo vermelho (STRECK et al., 2008) e as culturas que se destacam são a soja e o milho no verão e o trigo, a aveia e o azevém no inverno.

Este reservatório possui uma área alagada de aproximadamente $225,4 \text{ Km}^2$, profundidade média de 16,3m e máxima de 47,6m, largura máxima de 11,47Km e comprimento máximo de 44,6Km, seu volume em cota máxima é de $3,67 \text{ Km}^3$ e seu perímetro é igual a 593,8Km (CEEE, 2010). A principal finalidade do reservatório Passo Real é o armazenamento de água para geração de energia elétrica e a regularização de vazões para as barragens localizadas a jusante (Maia Filho, Itaúba e Dona Francisca). A Usina Hidrelétrica entrou em operação em março de 1973 com um potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 158MW, e atualmente está sob concessão da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE).

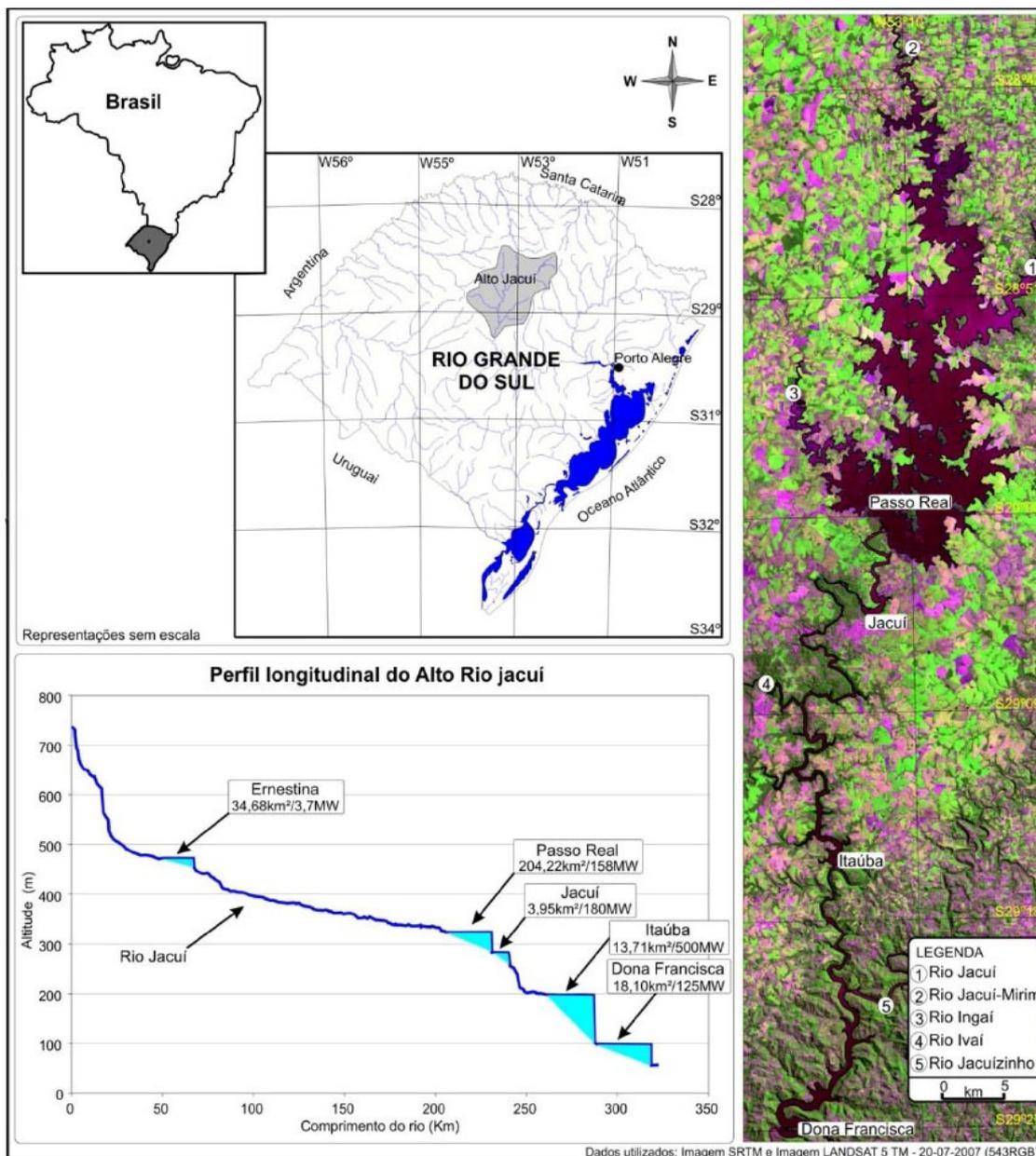


Figura 2. Localização e perfil longitudinal do alto curso do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul, com a distribuição dos reservatórios que compõem o sistema em Cascata. Fonte: (WACHHOLZ; PEREIRA FILHO, 2011).

Coleta do fitoplâncton e caracterização das florações

As coletas de amostras do fitoplâncton para determinar os eventos de floração foram realizadas em dois períodos. O primeiro período ocorreu entre outubro de 2009 e novembro de 2010, com coletas nos meses de outubro e dezembro de 2009, e nos meses de janeiro, março, abril, junho e novembro de 2010. Já o segundo período ocorreu entre janeiro de 2012 e janeiro de 2013,

com coletas nos meses de janeiro e setembro de 2012 e em janeiro de 2013, figura 3.

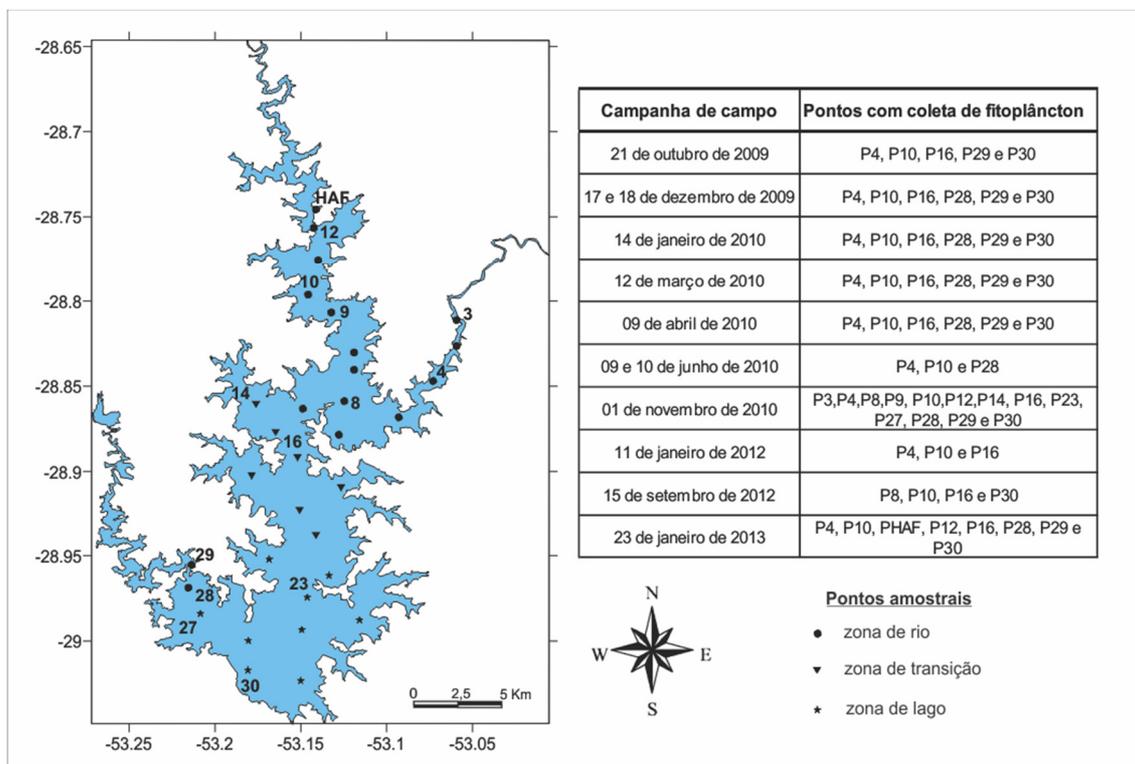


Figura 3. Distribuição dos pontos amostrais no reservatório Passo Real e informações das campanhas de campo e os respectivos pontos com coleta de fitoplâncton.

No primeiro período, em cada ponto amostral foi coletado na superfície da água (primeiros 10cm), um volume de dois litros de água em frascos de polietileno e preservados com solução lugol acético 1%, destinando-se esse material a quantificação e a estimativa da densidade de cianobactérias. Também foram coletadas amostras utilizando rede de plâncton com 10 μ m de abertura de malha, por meio de arrastos horizontais na superfície da água. Essas amostras foram armazenadas em frascos âmbar e preservadas com formaldeído 40%, na proporção de 4mL para cada 100mL de amostra, destinando-se este material para a identificação taxonômica das cianobactérias.

No segundo período, em cada ponto amostral foram coletados cinco litros de água utilizando a garrafa de Van Dorn horizontal, passando esse volume de água através da rede de plâncton (10 μ m de abertura de malha), armazenando o fitoplâncton concentrado em frascos âmbar. Esse concentrado

de fitoplâncton foi preservado com solução lugol acético 1% e destinado à quantificação e à identificação das cianobactérias.

O processo de identificação das espécies foi realizado por meio da confecção de lâminas e observações em microscópio óptico com aumento máximo de 1000x, onde foram feitas as caracterizações morfológicas diacríticas de cada espécie, com auxílio de bibliografia especializada. O sistema de classificação utilizado para a ordem Chroococcales foi o de KOMÁREK & ANAGNOSTIDIS (1986, 1995, 1999), para a ordem Nostocales foi o de KOMÁREK & ANAGNOSTIDIS (1989) e para a ordem Oscillatoriales ANAGNOSTIDIS & KOMÁREK (1988) e KOMÁREK & ANAGNOSTIDIS (2005).

A contagem de cianobactérias foi realizada após a sedimentação das amostras por 24 horas em câmaras de Utermöhl de 10mL através da visualização em microscópio invertido, em aumento de 400x (UTERMÖHL, 1958, citado por BICUDO; BICUDO, 2004). A contagem foi realizada em campos aleatórios, conforme proposto por Uehlinger (1964 citado por BICUDO; BICUDO, 2004). A estimativa da densidade de cianobactérias foi feita utilizando a fórmula descrita na Norma Técnica L5.303 (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2006).

O biovolume foi realizado com a identificação e medição de 20 a 30 células de cada espécie, após essa etapa foram calculadas as médias de cada medida para cada espécie, e então a partir das médias foi calculado o volume aproximado de cada célula, utilizando como referência as fórmulas e formas geométricas disponíveis em Hillebrand et al, 1999. Após a determinação do volume celular de cada espécie, este foi multiplicado pela densidade obtida em cada amostra.

Em ambos os períodos o plano amostral teve o mesmo objetivo: amostrar florações nos diferentes compartimentos do reservatório (rio, transição e lago), figura 3. No total, abrangendo os dois períodos foram coletadas 60 amostras de água para a caracterização das florações. Na caracterização e determinação dos eventos de floração, foram utilizados dois critérios: densidade de cianobactérias igual ou superior a $20.000 \text{ células}\cdot\text{mL}^{-1}$ e concentração de clorofila-*a* igual ou superior a $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Para avaliação dos táxons dominantes e abundantes nas florações de cianobactérias, foram utilizados os mesmos critérios descritos por Lobo e Leighton (1986). A

caracterização das florações em dispersivas e acumulativas em superfície foi realizada por meio de inspeção visual das observações em campo e das fotografias da água registradas no momento da coleta.

As florações observadas na represa Passo Real foram frequentemente encontradas em algumas regiões do reservatório. No entanto, em muitas das coletas realizadas constatou-se um número maior de pontos amostrais com florações do que em outras datas amostradas. Como o esforço amostral, foi diferente entre as campanhas de campo, figura 3, devido a imprevistos que ocorreram durante as coletas, a análise da ocorrência das florações em cada campanha de campo foi feita por meio da frequência relativa em que estas foram registradas em cada coleta, ou seja, uma razão simples entre o número de pontos com floração e o número total de pontos coletados em cada campanha de campo.

Coleta e determinação das variáveis limnológicas

Em ambos os períodos foram coletadas amostras de água em frascos de polietileno de um litro em superfície (10cm de profundidade) em todos os pontos com coleta de fitoplâncton e determinadas as seguintes variáveis em laboratório: condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH), clorofila-*a* (Chl-*a*) e total de sólidos dissolvidos (TDS). As variáveis, temperatura da água (TA), transparência da água (DS) e profundidade total (PT) foram obtidas em campo no momento da coleta.

A condutividade elétrica da água foi determinada por meio da medida com condutivímetro da marca Orion 805 em laboratório, calibrado com a solução padrão $1413\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. O total de sólidos dissolvidos foi obtido através da medida indireta, calculada a partir da condutividade elétrica determinada em cada amostra, o próprio software do condutivímetro estima o total de sólidos dissolvidos simultaneamente a obtenção da medida de condutividade elétrica. As determinações de pH, também foram feitas em laboratório com o pHmêtro digital portátil marca pHtech, modelo PH100, calibrado com as soluções pH 4 e pH 7.

A determinação da clorofila *a* foi realizada após a filtragem de 300mL de cada amostra em filtros de microfibras de vidro, esses foram embalados em

papel alumínio, mantidos no escuro e congelados. Após esse procedimento foi feita a extração em metanol conforme descreve Mackinney (1941), realizadas as medições no espectrofotômetro e calculados as concentrações de clorofila *a*.

A transparência da água foi obtida no momento da coleta através da medida de profundidade do disco de Secchi, que consiste na submersão de um disco branco de 25cm de diâmetro na água do reservatório, e a observação da profundidade em que ele desaparece e reaparece, a medida dessa profundidade corresponde a estimativa da transparência. O limite da zona fótica foi estimado multiplicando o valor da profundidade do disco de Secchi por três (ESTEVES, 1998).

A profundidade total foi obtida por meio de medições com ecobatímetro da marca Fishfinder e a temperatura da água foi medida com termômetro digital portátil do tipo espeto da marca Instrutherm, modelo TE-400, com resolução de 0,1 °C.

A caracterização das zonas de rio, transição e lago, foram feitas utilizando as variáveis total de sólidos em suspensão (TSS), transparência da água (DS) e clorofila-*a* (Chl-*a*) coletadas em 31 pontos amostrais do reservatório Passo Real em seis campanhas de campo entre outubro de 2009 e junho de 2010, figura 3.

Determinação das normais climatológicas

Os valores das normais climatológicas de radiação solar, brilho solar total mensal e temperaturas mínimas, médias e máximas do ar foram obtidos do Atlas Climatológico do Rio Grande do Sul. Os dados utilizados são das estações climatológicas de Cruz Alta e pertencem a Fepagro (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária) e ao 8° Disme/INMET (8° Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia). Os valores normais destas variáveis foram determinados a partir de uma série histórica de observações que inicia em 1976 e vai até 2005 (WREGGE et al., 2011).

As médias dos totais mensais de precipitação pluviométrica, velocidade do vento e direção do vento, foram calculadas com os dados obtidos da estação climatológica de Cruz Alta, pertencente ao 8° Disme/INMET. Para a

média mensal destas variáveis foi utilizada a série histórica de dados de 51 anos (1961-2012), do qual foram sendo desconsiderados os anos com falhas nas observações. Assim, foram utilizados 38 anos para o cálculo da média dos totais mensais de precipitação pluviométrica e 34 anos para o da velocidade e direção do vento.

Determinação das variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas brilho solar, temperatura do ar, precipitação pluviométrica e velocidade do vento observadas durante o período deste estudo (janeiro de 2009 a fevereiro de 2013) foram obtidas da estação climatológica convencional de Cruz Alta, pertencente ao 8º Dime/INMET, disponíveis para download no site <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Com os dados diários foram calculadas as médias mensais das variáveis temperatura do ar e velocidade do vento, assim como, o total mensal de brilho solar e de precipitação pluviométrica. Além disso, os dados diários do período referente aos 30 dias anteriores as coletas com florações foram analisados e correlacionados com a frequência com que ocorreram as florações em cada coleta.

As variáveis meteorológicas velocidade do vento e temperatura do ar foram medidas no momento das coletas, ambas utilizando o termo-higro-anemômetro-luxímetro digital da Instrutherm modelo THAL-300. Anotações complementares como o horário de coleta, fotografias da água e do entorno do reservatório e as coordenadas geográficas obtidas por GPS, também foram registradas. O horário de coleta e a latitude de cada ponto foram importantes para a estimação do ângulo de incidência solar e da radiação solar no topo da atmosfera no momento da coleta. A determinação do ângulo de incidência solar e da radiação solar no topo da atmosfera foram estimados segundo as equações disponíveis em Pereira; Angelocci; Sentelhas (2002).

Determinação das variáveis hidrológicas

Os dados referentes a vazão afluente (Q_a), vazão defluente (Q_d), volume útil (V_u) e cota da superfície d'água do reservatório (C), foram obtidos

dos boletins emitidos entre 2009 e 2013 pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). A partir dos dados de vazão defluente e volume útil foram calculados os Tempos de Residência Teóricos (TRT) da água do reservatório Passo Real para os meses com dados disponíveis entre 2009 e 2013, conforme a equação descrita em Spellman (2008).

$$TRT = \frac{Vu}{Qd \cdot 86400} \quad (1)$$

Obtenção da temperatura na coluna d'água

A temperatura da coluna d'água no reservatório Passo Real foi obtida após a instalação de 9 sensores térmicos com Data Logger da marca Onset, modelo UTBI-001 nas seguintes profundidades: 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7 e 9 metros. Quatro destes sensores foram instalados no dia 17 de maio de 2013 (profundidades 0,5; 2; 4; e 7 metros), mais cinco sensores foram instalados (profundidades 1; 3; 5; 6 e 9 metros) no dia 18 de outubro de 2013. Os sensores foram programados para obter e armazenar dados de temperatura em intervalos de 10 minutos. O período de coleta de dados iniciou em 17 de maio de 2013 e terminou no dia 19 de dezembro de 2013. Para a análise dos dados, estes foram inseridos em uma planilha do Excel e organizados em três colunas, contendo na primeira coluna o número sequencial em que foi obtida a temperatura, na segunda coluna a respectiva profundidade e na terceira coluna a informação da temperatura registrada. Estes dados foram salvos em um arquivo .txt e importados para o aplicativo Surfer 8.0, onde foram interpolados pelo método da Krigagem.

Análises estatísticas utilizadas

Na descrição dos resultados em geral, foram utilizadas medidas de tendência central, tais como mínimo, máximo, média, mediana e percentis. Correlações simples foram testadas entre as variáveis meteorológicas nos 30 dias anteriores as coletas e a frequência das florações em cada coleta.

A ordenação dos pontos amostrais que estão em zonas de rio, transição e lago do reservatório Passo Real foi feita por meio de uma análise de componentes principais (PCA) com as variáveis TSS, DS e Chl-a, determinadas em 31 pontos do reservatório e coletadas nas seis campanhas de campo que ocorreram entre outubro de 2009 e junho de 2010.

Análises de escalonamento multidimensional não métrico (NMDS) foram feitas com os dados de biovolume das espécies e posteriormente adicionadas isolinhas contendo os dados ambientais (vento e temperatura da água). As análises de ordenação (PCA e NMDS) foram feitas no ambiente computacional "R", utilizando o pacote Vegan.

Também foi feita a análise de espécies indicadoras (Indval), para verificar quais as espécies de cianobactérias estão melhor adaptadas as florações dispersivas ou acumulativas em superfície. Isso foi feito utilizando o biovolume das espécies de cianobactérias e a característica das florações, dispersiva ou acumulativa em superfície. O aplicativo PC-ORD 5.31 foi utilizado para esta análise.

RESULTADOSE DISCUSSÃO

Caracterização das florações de cianobactérias

Entre o período de 2009 e 2013 foi coletado um total de 60 amostras de água no reservatório Passo Real, com o intuito de obter e caracterizar eventos de florações de cianobactérias. Destas amostras, 20 apresentaram características de floração, com densidade de cianobactérias igual ou superior a $20.000\text{células}\cdot\text{mL}^{-1}$ e concentração de clorofila-a igual ou superior a $10\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (OLIVER e GANF, 2000). Seis florações foram classificadas como acumulativas em superfície e catorze como dispersivas na coluna d'água, figura 4.

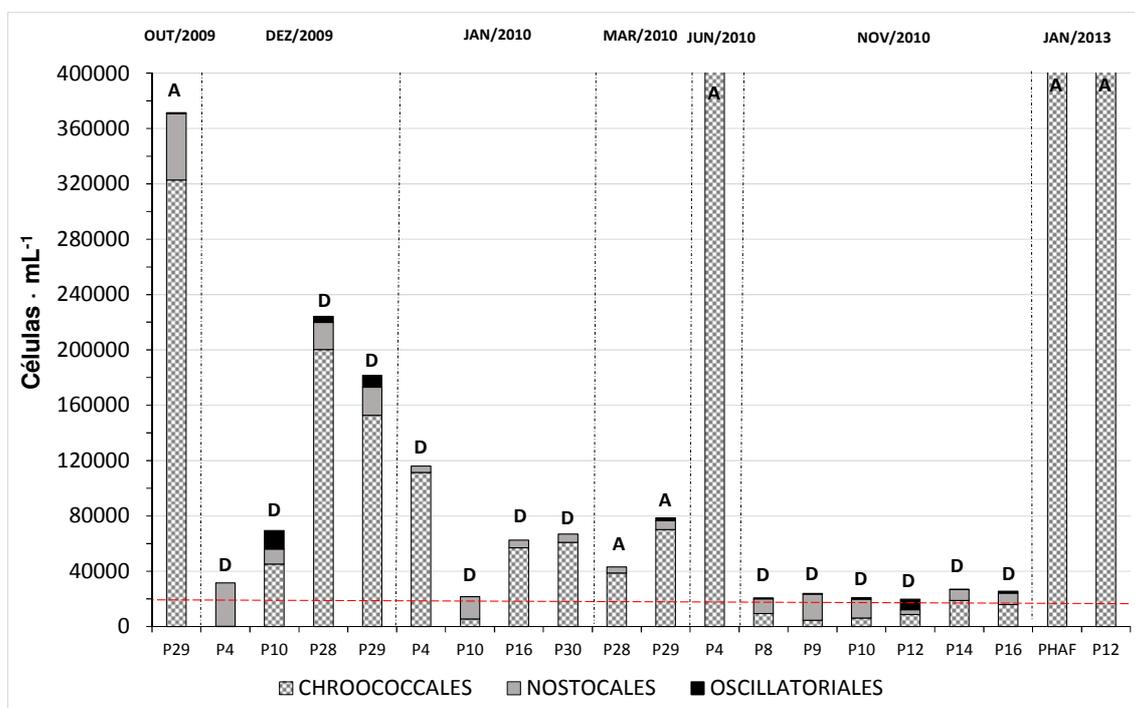


Figura 4. Densidade de cianobactérias nas florações encontradas nas águas do reservatório Passo Real entre 2009 e 2013. Florações acumulativas (A), florações dispersivas (D). Linha tracejada vermelha indica $20.000\text{cél}\cdot\text{mL}^{-1}$, densidades de cianobactérias iguais ou superiores a esse valor caracterizam um evento de floração (OLIVER e GANF, 2000).

Geralmente florações acumulativas em superfície apresentam densidades mais elevadas de cianobactérias do que aquelas caracterizadas como dispersivas. Isto pode ser verificado nos valores de densidade apresentados na figura 4, onde os maiores valores estiveram associados aos pontos e coletas com florações acumulativas em superfície: P29 em 21 de

outubro de 2009, P4 em 10 de junho de 2010, P12 e PHAF em 23 de janeiro de 2013, com a exceção das florações acumulativas que ocorreram na coleta de 12 de março, com menores valores de densidade associados.

Na figura 5, é possível observar a diferença entre as coletas com florações acumulativas em superfície e aquelas classificadas como dispersivas. Geralmente, florações acumulativas em superfície ocorrem em condições em que o corpo d'água encontra-se estratificado termicamente e com baixa turbulência gerada pelo vento (OLIVER e GANF, 2000; CALIJURI, ALVES e SANTOS, 2006), já as florações dispersivas ocorrem em corpos d'água pouco profundos, não estratificados termicamente e com turbulência na coluna d'água (DE LÉON e BONILLA, 2009).

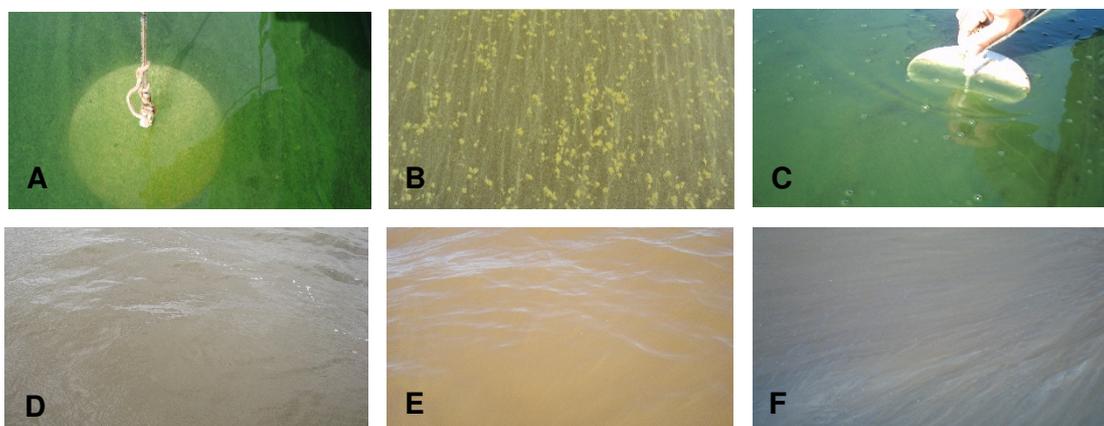


Figura 5. Imagens das florações encontradas no reservatório Passo Real. Florações acumulativas em superfície: A - 21 de outubro de 2009, B - 12 de março de 2010 e C - 10 de junho de 2010. Florações dispersivas: D - 17 de dezembro de 2009, E - 14 de janeiro de 2010 e F - 01 de novembro de 2010.

Na composição das florações foram identificadas espécies de cianobactérias das ordens Chroococales, Nostocales e Oscillatoriales. A maior parte da biomassa que compôs as florações é consequência das elevadas densidades de cianobactérias Chroococales e Nostocales, principalmente pela forte presença de espécies dos gêneros *Microcystis* e *Dolichospermum* (nova denominação das formas planctônicas do gênero *Anabaena*), tendo a ordem Oscillatoriales uma contribuição muito pequena em termos de densidade, figura 4.

Os gêneros *Microcystis* e *Dolichospermum* são conhecidos no mundo inteiro pelo potencial de produzir microcistinas e anatoxinas (AZEVEDO et al., 2002; YUNES et al., 2005; MATTHIENSEN et al., 1999, SIVONEM e JONES,

1999). Muitos lagos e reservatórios tem sido afetados por problemas decorrentes da elevada concentração de células e toxinas, principalmente por estes dois gêneros (SEJNOHOVÁ e MARSALÉK, 2012; COSTA et al., 2006; YAMAMOTO e NAKAHARA, 2009; CYBIS et al., 2006;). O caso mais grave foi registrado no Brasil em 1996, na cidade de Caruaru, estado de Pernambuco, onde 116 pacientes de hemodiálise foram afetados nesse tratamento com água contaminada por microcistinas, os principais sintomas foram distúrbios visuais, náusea, vômitos e contrações musculares, com 100 pacientes desenvolvendo falha aguda do fígado, o que resultou em 52 óbitos (AZEVEDO et al., 2002).

As espécies de *Microcystis* que formam florações, caracterizam-se pelos indivíduos formarem colônias geralmente envoltas por mucilagem, com suas células cocoides bem distribuídas ou agrupadas no interior deste polissacarídeo. Possuem vesículas gasosas chamadas de aerótopos, que as permitem migrar verticalmente na coluna d'água (KOMÁREK e ANAGNOSTIDIS, 1999). Já as espécies de *Dolichospermum* tem seus indivíduos filamentosos com as células distribuídas em fileiras, podendo estas ser retas, curvadas ou helicoidais. Os aerótopos também estão presentes em suas células, mas o aspecto morfológico e fisiológico marcante deste gênero (típico da ordem Nostocales) é a presença de células diferenciadas chamadas de heterocitos e acinetos, que permitem respectivamente a fixação do nitrogênio atmosférico e o armazenamento de substâncias de reserva (BICUDO E MENEZES, 2005).

As espécies de *Microcystis* que ocorreram nas florações entre 2009 e 2013 na represa Passo Real foram: *M. protocystis* Crow 1923, *M. aeruginosa* (Kützing) Kützing 1866, *M. Wesenbergii* (Komárek) Komárek in Kondrateva 1968 e *M. panniformis* Komárek et al 2002, figura 6. Já as representantes de *Dolichospermum* foram: *D. circinalis* Rabenhorst ex Bornet et Flahault 1888, *D. Crassum* (Lemmermann) Wacklin, Hoffmann et Komárek 2009, *D. spiroides* Klebahn 1895, *D. mendotae* (Trel.) Wacklin, L. Hoffm. & Komárek 2009, *D. planctonicum* Brunnthaler 1903 e *D. solitarium* Klebahn 1895, figura 6.

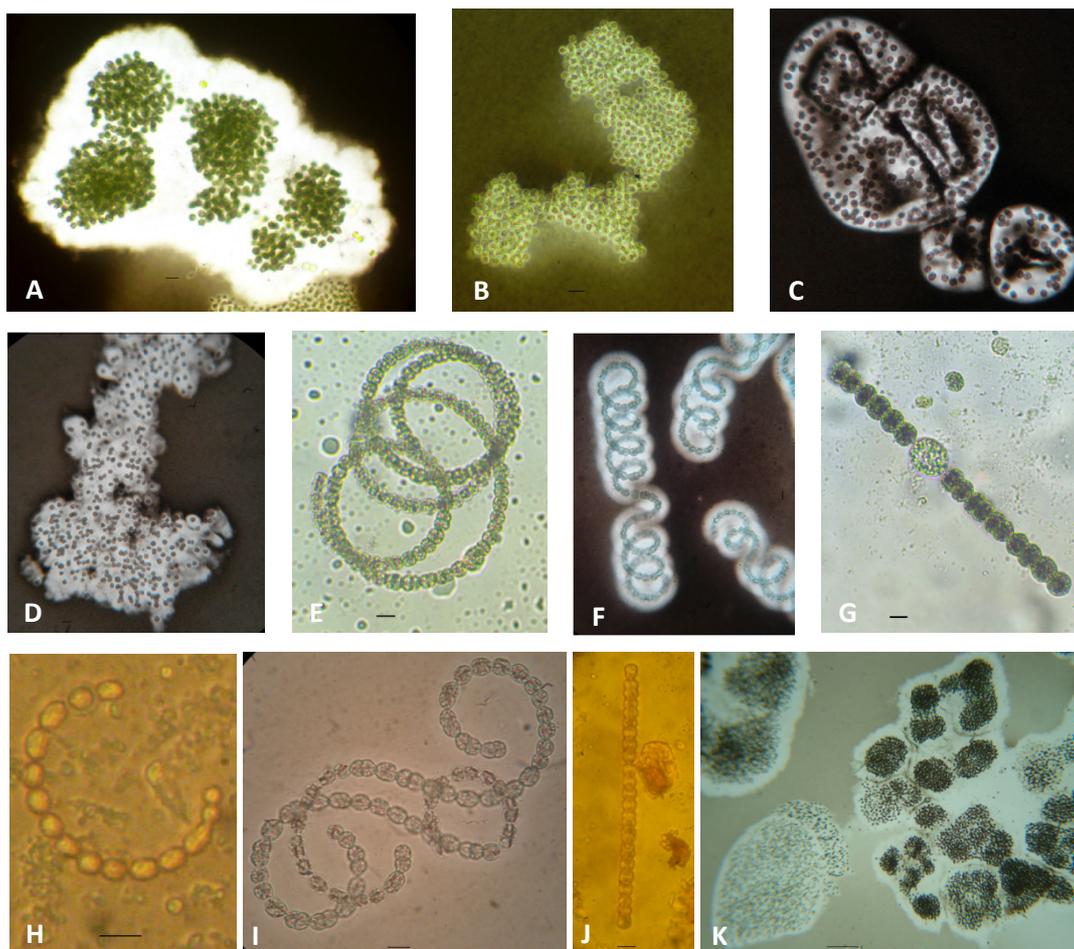


Figura 6. Morfologia das diferentes espécies de cianobactérias que ocorreram nas florações entre 2009 e 2013 na represa Passo Real. A – *Microcystis aeruginosa* (aumento de 400x), B – *M. panniformis* (400x), C - *M. wesenbergii* (400x), D - *M. protocystis* (400x), E – *Dolichospermum circinalis* (400x), F - *D. crassum* (400x), G - *D. planctonicum* (400x), H - *D. mendotae* (400x), I - *D. spiroides* (400x), J - *D. solitarium* (400x) e K - visão ampla da floração de *Microcystis spp.* registrada em 12 de março de 2010 (100x).

Na figura 7 é possível observar o resultado da análise de componentes principais (PCA), utilizada para ordenar os pontos amostrais nas zonas de rio, transição e lago em Passo Real. Verifica-se um gradiente destas três variáveis (TSS, DS e Chl-*a*) entre as zonas de rio, transição e lago, onde o TSS e a Chl-*a* tiveram uma influência maior na definição das zonas de rio e transição e o disco de Secchi teve uma influência maior na definição da zona de lago. Isso é facilmente observável quando se projeta as três variáveis sobre o eixo 1, que teve a maior porcentagem de explicação (67%). Observa-se nesta figura que as florações se concentraram mais nas zonas de rio (sete pontos), seguidos pelas florações localizadas em zona de transição (dois pontos), sendo menos comum na zona de lago (um ponto).

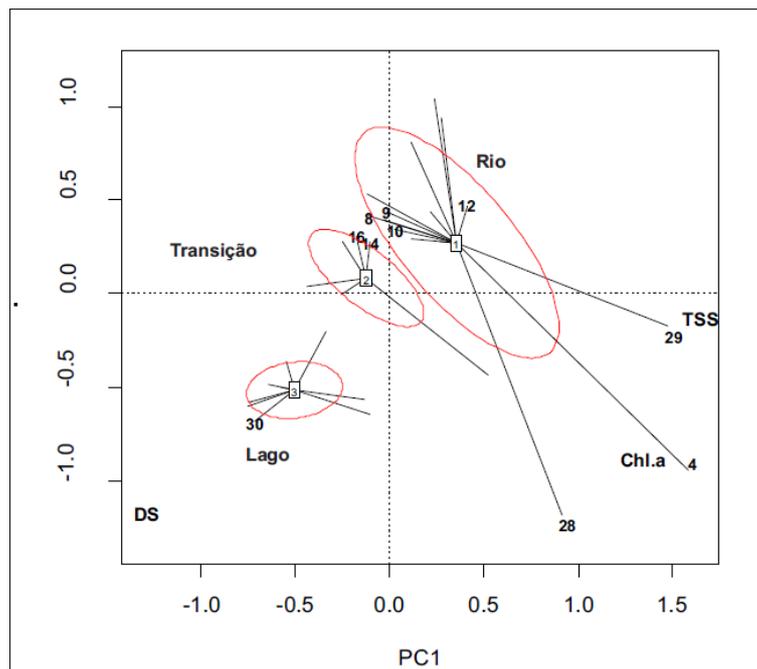


Figura 7. Análise de componentes principais, demonstrando o padrão de zonação (rio, transição e lago) nas águas do reservatório Passo Real, definido pelos gradientes de transparência (DS), totais de sólidos em suspensão (TSS) e clorofila-a (Chl.a) coletados em 31 pontos no reservatório entre outubro de 2009 e junho de 2010. Os pontos numerados são aqueles onde tiveram ocorrência de florações. Importância dos componentes: Autovalores PC1 (2,0352), PC2 (0,6983) e PC3 (0,26647); Proporção de explicação PC1 (0,6784), PC2 (0,2328) e PC3 (0,08882); Proporção Acumulativa PC1 (0,6783), PC2 (0,9112) e PC3 (1,00)

Os pontos P4, P8, P9, P10, P12, P28 e P29 foram ordenados em zonas de rio, sendo os pontos P4 e P8 pertencentes a zona do rio Jacuí, os pontos P9, P10, P12 pertencentes a zona do rio Jacuí-Mirim e os pontos P28 e P29 os pontos pertencentes a zona do rio Ingaí. Os pontos P14 e P16 foram ordenados em zonas de transição e o ponto P30 foi ordenado em zona de lago.

Os gêneros *Microcystis* e *Dolichospermum* alternaram a dominância em termos de biovolume durante as florações que ocorreram entre 2009 e 2013 no reservatório Passo Real, figura 8. *Dolichospermum* teve uma maior contribuição em biovolume nas florações coletadas no P29 (97%) em outubro de 2009, no P4 (100%) em dezembro de 2009, nos pontos P4 (86,94%), P10 (99,86%), P16 (79,59%) e P30 (76,1%) em janeiro de 2010 e nos pontos P8 (84,39%), P9 (93,16%) e P10 (91,48%) em novembro de 2010. *Microcystis* teve maior contribuição em biovolume no P29 (84,55%) em março de 2010, no P4 (95,66%) em junho de 2010 e nos pontos PHAF (100%) e P12 (100%) em janeiro de 2013. Ambos os gêneros tiveram uma contribuição semelhante em termos de biovolume nos demais pontos coletados.

Em um estudo envolvendo seis reservatórios no Semi-árido do Rio Grande do Norte, Costa et al (2009) verificaram a existência de uma alternância de florações de *Microcystis* spp. e co-dominância de *Dolichospermum* spp. e *Cylindrospermopsis raciborskii* nos reservatórios de Boqueirão e Sabugi. Em um pequeno lago em Kioto no Japão, a alternância entre a dominância de *Microcystis* spp. e *Dolichospermum* spp. também foi observada por Yamamoto e Nakahara (2009).

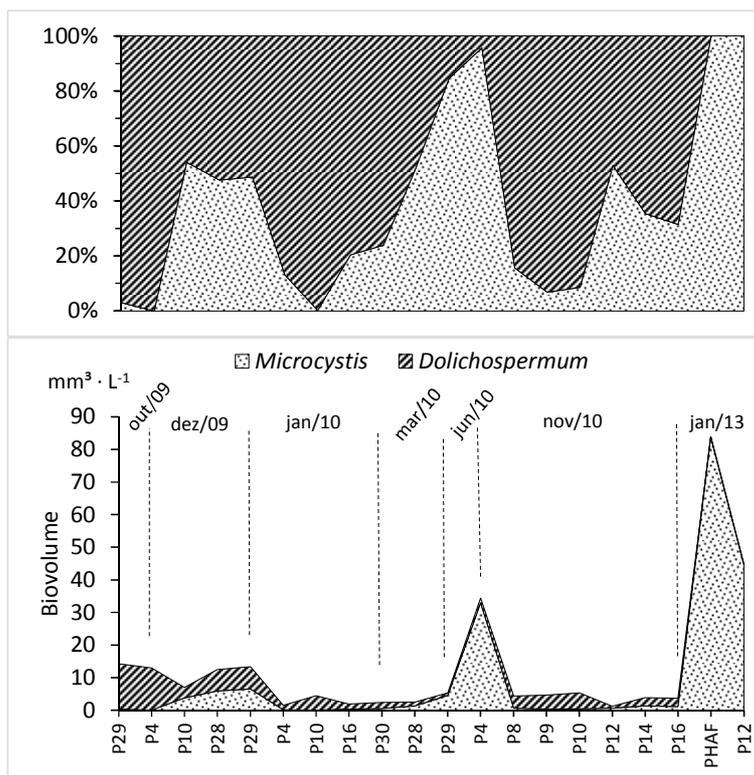


Figura 8. Variação do biovolume de *Microcystis* e *Dolichospermum* em porcentagem e em $\text{mm}^3 \cdot \text{L}^{-1}$, nas diferentes florações encontradas no reservatório Passo Real, entre 2009 e 2013.

A variação espacial e temporal da composição de espécies de *Microcystis* e *Dolichospermum* nas florações coletadas no reservatório Passo Real podem ser observadas na figura 9. A floração do P29 em outubro de 2009 foi caracterizada como acumulativa em superfície, com elevados valores de biovolume ($14,29 \text{mm}^3 \cdot \text{L}^{-1}$), dominância da espécie *D. circinalis* e abundância de *D. crassum*. Na coleta de dezembro de 2009, as florações foram todas dispersivas, no P4 houve a dominância da espécie *D. crassum*, e nos pontos P10, P28 e P29 houve ausência de dominância, ocorrendo a abundância de *M. protocystis*. No P10, além dessa espécie, houve também a abundância de *M. aeruginosa* e *D. circinalis*.

Em janeiro de 2010 as florações foram todas dispersivas, o biovolume foi baixo ($1,51$ a $4,48\text{mm}^3\cdot\text{L}^{-1}$), e nos pontos P4 e P10 houve a dominância de *D. circinalis*, já nos pontos P16 e P30 houve apenas a abundância desta espécie, com o P16 também apresentando a espécie *M. protocystis* como abundante. Na coleta de março de 2010 as florações foram caracterizadas como acumulativas em superfície, porém o biovolume foi baixo ($2,51$ a $5,36\text{mm}^3\cdot\text{L}^{-1}$). No ponto P28 não houve espécie dominante e as espécies *M. aeruginosa* e *D. circinalis* foram abundantes, já no P29 houve a dominância de *M. aeruginosa*.

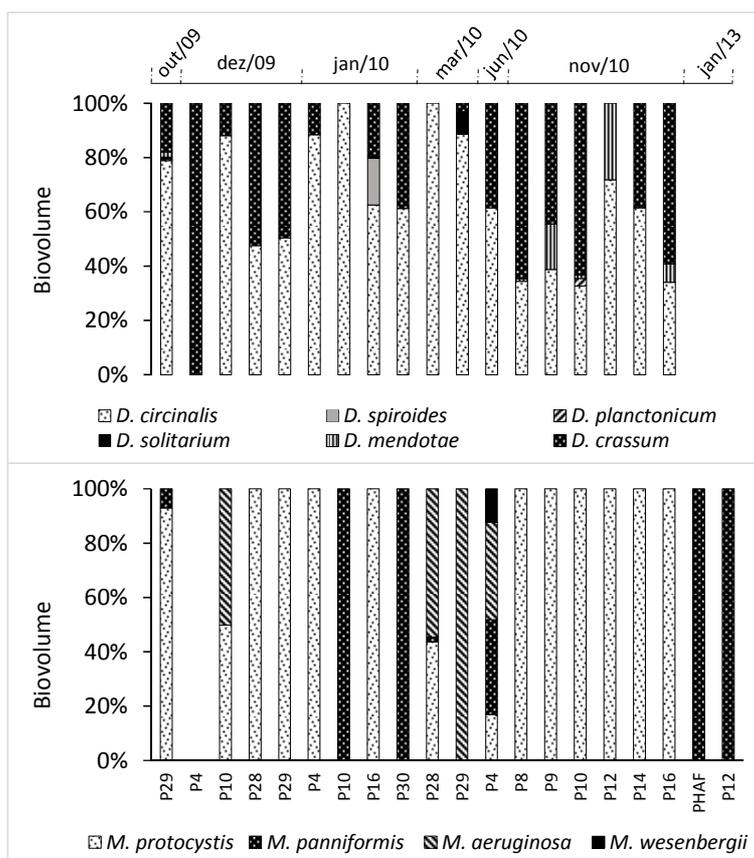


Figura 9. Variação do biovolume e composição de espécies de *Dolichospermum* e *Microcystis* nas diferentes florações encontradas no reservatório Passo Real, entre 2009 e 2013.

Em junho de 2010, a floração do P4 caracterizou-se como acumulativa em superfície, com elevado biovolume ($34,5\text{mm}^3\cdot\text{L}^{-1}$) e abundância das espécies *M. aeruginosa* e *M. panniformis*, não ocorrendo espécies dominantes. Em novembro de 2010 os valores de biovolume foram menores ($1,21$ a $5,28\text{mm}^3\cdot\text{L}^{-1}$) e as florações foram dispersivas. Dos pontos coletados nesta data, o P8 teve a dominância de *D. crassum*, e a abundância de *D. circinalis*. Nos demais pontos coletados, os pontos P9 e P10 tiveram a ocorrência de *D. circinalis* e *D. crassum* como abundantes; os pontos P12 e P14 tiveram *D.*

circinalis e *M. protocystis* como abundantes; e o P16 teve *D. crassum* e *M. protocystis* como abundantes. Em janeiro de 2013 as florações coletada nos pontos PHAF e P12 foram caracterizadas como acumulativas de superfície, com elevado biovolume (83,88 e 44,77mm³·L⁻¹, respectivamente) e dominância da espécie *M. panniformis*.

No Uruguai, país fronteiriço com o Rio Grande do Sul e também localizado em região subtropical, as espécies mais comuns de *Microcystis* e *Dolichospermum* presentes em florações são: *M. aeruginosa*, *M. novacekii*, *M. panniformis*, *M. protocystis*, *D. circinalis*, *D. crassum*, *D. solitarium*, *D. planctonicum*, *D. spiroides* e *D. viguieri* (VIDAL et al., 2009).

No Rio Grande do Sul, frequentes florações tóxicas de *Microcystis aeruginosa* foram registradas por Matthiensen et al (1999) na Lagoa dos Patos em 1994 e 1995. Na Lagoa do Violão, no município de Torres, litoral norte do estado, Carvalho et al (2008) identificaram as espécies *M. protocystis* e *Sphaerocavum cf. brasiliensis* como predominantes em uma floração acumulativa de superfície, coletada em janeiro de 2005. Em Porto Alegre no Lago Guaíba e na represa Lomba do Sabão as espécies de *Microcystis* e *Dolichospermum* já registradas em florações são *M. wesenbergii*, *M. panniformis*, *M. aeruginosa*, *M. novacekii*, *M. protocystis*, *D. circinalis*, *D. crassum* e *D. spiroides* (CYBIS et al., 2006).

No sistema em cascata do Alto Jacuí, Werner e Laughinghouse IV (2009) identificaram a presença de *Dolichospermum crassum* no reservatório de Ernestina e *D. circinalis*, *D. crassum* e *D. spiroides* no reservatório Itaúba. Em um estudo realizado por Schneck et al (2011), *D. spiroides* foi uma das espécies que tiveram forte associação com as estações de verão entre 2005 e 2010 no reservatório Dona Francisca. Em Passo Real, apesar de ser o maior reservatório artificial de água do Rio Grande do Sul, nenhum estudo foi encontrado referente a qualquer aspecto envolvendo cianobactérias no período anterior ao início das coletas em 21 de outubro de 2009.

Disponibilidades climáticas

A quantidade média de radiação solar normal disponível para a região em que está inserido o reservatório Passo Real, figura 10, varia entre 10,3 e

23,2 $\text{Mj}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$, recebendo uma maior quantidade de energia solar durante os meses de verão (22,2 $\text{Mj}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$) e de primavera (19,4 $\text{Mj}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$). Uma menor quantidade de radiação solar incide sobre esta região nos meses de inverno (11,3 $\text{Mj}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$) e de outono (14,8 $\text{Mj}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$). Nota-se que as florações de cianobactérias foram encontradas com maior frequência nas estações de verão e primavera, figura 4, ou seja, a disponibilidade de radiação solar durante esse período é mais favorável a ocorrência de florações de cianobactérias do que a quantidade de energia solar disponível no outono e no inverno.

Além de ser necessária para a fotossíntese, a radiação solar pode ser muito importante em outros processos ecofisiológicos das cianobactérias. A quantidade de luz disponível pode estar envolvida no controle do processo de ganho e perda de flutuação, assim como na velocidade de migração na coluna d'água, como já constatado nas espécies *Microcystis aeruginosa* e *Dolichospermum circinalis* (BROOKES et al., 1999). A quantidade e a qualidade da radiação solar também podem influenciar no crescimento celular e na produção de toxinas (saxitoxinas), conforme verificado em cepas da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii* (CARNEIRO et al., 2009).

A disponibilidade de brilho solar mensal, figura 10, segue o mesmo padrão da variável radiação solar, apresentando maior brilho solar durante as estações de verão e primavera, com valores acumulados variando entre 178 e 255 horas por mês, e nos meses de inverno e outono, ocorrendo valores menores, variando entre 155 e 192 horas por mês. No entanto no mês de março, transição entre as estações de verão e outono, verifica-se um aumento da quantidade de horas de brilho solar, provavelmente pela redução da nebulosidade e precipitação pluviométrica neste mês, quando comparado com os meses de fevereiro e abril. O inverso, nota-se no mês de setembro, transição entre as estações de inverno e primavera, quando ocorre uma menor quantidade de horas de brilho solar, comparado aos meses de agosto e outubro, possivelmente pela maior incidência de nebulosidade e precipitação pluviométrica nesse mês.

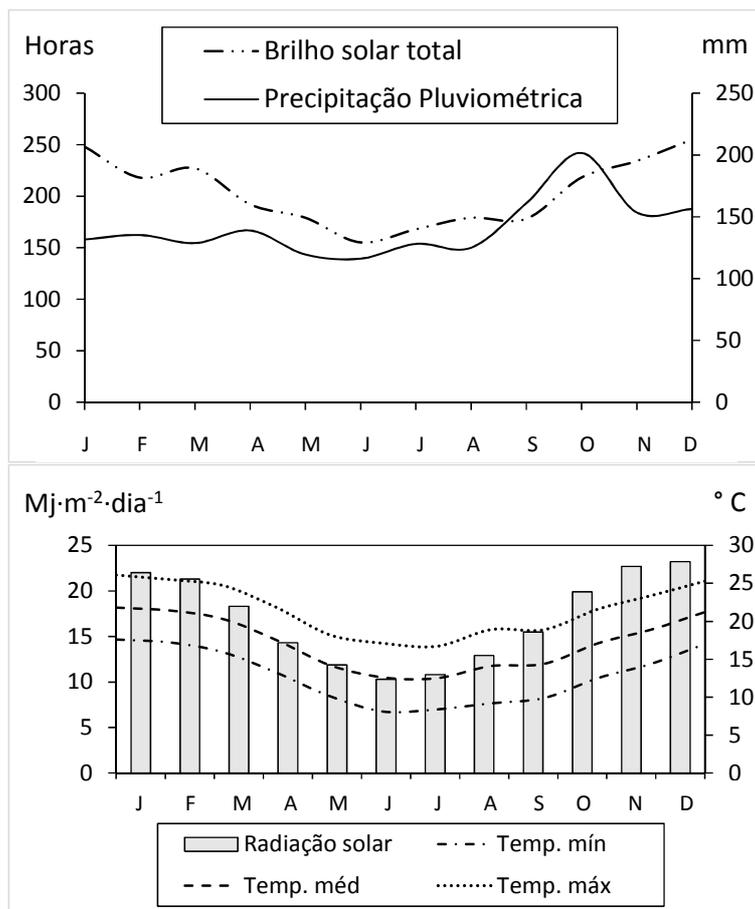


Figura 10. Disponibilidades climáticas de radiação solar global, temperatura do ar, brilho solar total mensal e precipitação pluviométrica, obtidas nas estações climatológicas da FEPAGRO e do INMET, localizadas no município de Cruz Alta, Rio Grande do Sul.

Os valores de temperatura média mensal do ar nesta região, figura 10, são mais elevados no verão (20,3 a 21,8 $^{\circ}\text{C}$), intermediários durante as estações de outono e primavera (14,2 a 18,9 $^{\circ}\text{C}$) e baixos no inverno (12,5 a 14,1 $^{\circ}\text{C}$), ocorrendo uma amplitude térmica de 18 $^{\circ}\text{C}$, quando comparadas as temperaturas médias das mínimas do mês mais frio (junho) e as temperaturas médias das máximas do mês mais quente (janeiro). As temperaturas mais elevadas e intermediárias disponíveis, respectivamente, no verão, na primavera e no outono tornam os meses destas estações mais propícios a ocorrência de florações no reservatório Passo Real do que no inverno.

Em estudo realizado no reservatório das Lages no Rio de Janeiro, foi verificado uma correlação significativa ($r=0,95$) entre a temperatura média do ar de um período de 50 dias anteriores a medição da temperatura da água neste reservatório (BRANCO et al., 2009). Isso demonstra que há uma defasagem da temperatura da água em relação a temperatura do ar.

As precipitações pluviométricas são distribuídas de forma similar ao longo do ano, com valores totais mensais variando entre 116 e 201mm, figura 10. Os meses mais chuvosos ocorrem entre setembro e dezembro, variando entre 153 e 201mm, sendo o mês de outubro aquele com maior volume de precipitação pluviométrica. O período menos chuvoso ocorre entre maio e agosto, os valores acumulados mensais variam entre 116 e 128mm, sendo maio o mês com o menor valor, 116mm. O período chuvoso coincide com a época em que ocorre a transição de culturas agrícolas (entressafra), com a colheita das culturas de inverno (trigo, aveia e azevém) e o preparo e semeadura das culturas agrícolas de verão (milho e soja) (WACHHOLZ, 2011; GAIDA et al., 2012). Com isso, nesse período as precipitações pluviométricas mais intensas podem causar escoamento superficial e carrear nutrientes do solo (nitrogênio, fósforo e potássio) para a água do reservatório, favorecendo a ocorrência de florações.

A velocidade média mensal dos ventos nessa região normalmente é baixa, com valores próximos a $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, figura 11. Os valores máximos médios mensais registrados variam entre 4,6 e $5,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, sendo mais intensos no período de junho a dezembro. A direção do vento que predomina durante o ano é do quadrante sudeste, tendo maior variação nos meses de junho, julho e agosto, ocorrendo também ventos norte, nordeste e leste.

A velocidade e a direção do vento são variáveis meteorológicas muito importantes na dinâmica das massas de água em um reservatório. A velocidade do vento é a principal fonte de entrada de energia mecânica na coluna d'água, gerando turbulência, podendo causar a circulação vertical da água. A direção do vento determina os movimentos horizontais das massas d'água, transmitindo a energia do vento, através das ondas (DODDS, 2002).

Em condições de turbulência gerada pelo vento, pode acontecer da zona de mistura ser maior que a zona fótica, como consequência o fitoplâncton é empurrado para profundidades com ausência de luz, porém ricas em nutrientes, isso geralmente ocorre em regiões do reservatório com características de rio, com elevada entrada de nutrientes e sólidos em suspensão associados a uma baixa transparência da água (KIMMEL et al., 1990). Essa dinâmica pode ser uma condição vantajosa para as cianobactérias que por terem a capacidade de migrar na coluna d'água, podem ser

empurradas para profundidades afóticas, ricas em nutrientes, armazená-los e em condições de baixa turbulência flutuar até a zona fótica da coluna d'água, e realizar a fotossíntese.

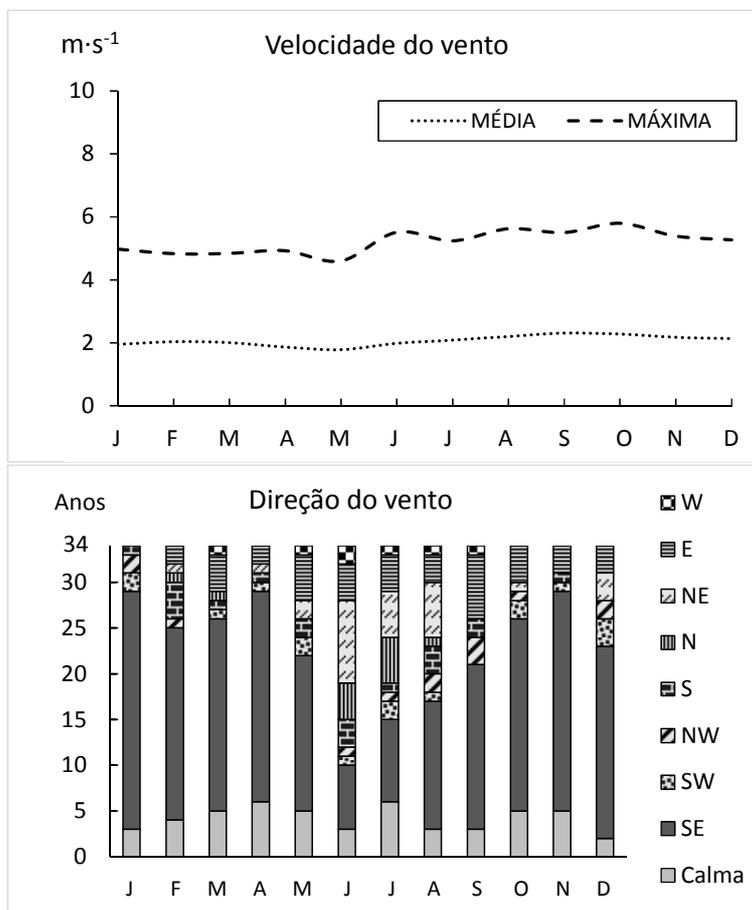


Figura 11. Disponibilidades de velocidade e direção do vento, obtidas a partir da estação climatológica do INMET, localizada no município de Cruz Alta, Rio Grande do Sul.

Além disso a direção das ondas empurradas pelo vento pode interferir na distribuição das florações, principalmente das acumulativas em superfície, aumentando significativamente a concentração de células em zonas litorâneas barlavento (NHMRC, 2008).

Condições meteorológicas no período de observações

A análise e discussão das relações entre as condições meteorológicas e as florações de cianobactérias foram baseadas na frequência em que as florações ocorreram no reservatório Passo Real durante o período amostral, figura 12.

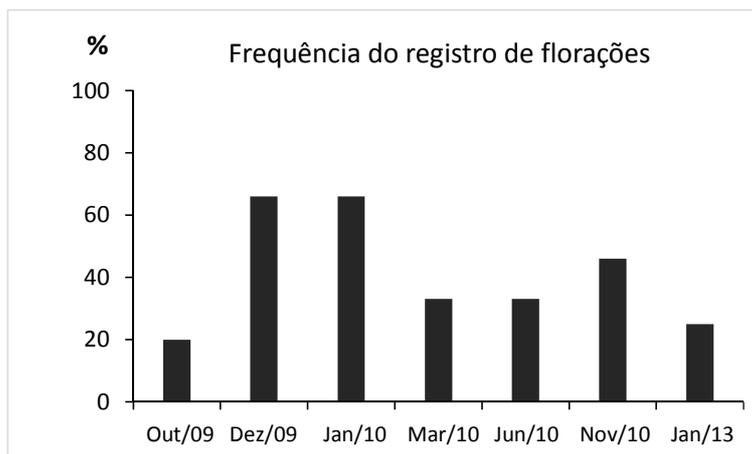


Figura 12. Frequência relativa do registro de florações de cianobactérias em cada campanha de campo no reservatório Passo Real, considerando o número de pontos amostrados com floração em relação ao total de pontos amostrados em cada campanha.

A seguir os eventos de floração das cianobactérias serão relacionados com a variação dos elementos meteorológicos brilho solar, precipitação pluviométrica, temperatura do ar e velocidade e direção do vento. Seria importante, ao invés dos dados de brilho solar (horas e décimos de horas) utilizar aqueles de radiação solar global ($\text{MJ}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$). Entretanto, na impossibilidade de obtenção desses dados registrados na estação meteorológica de Cruz Alta, foram utilizados aqueles do brilho solar, tendo em vista que existe uma relação altamente significativa entre estes dois elementos meteorológicos no estado do Rio Grande do Sul (FONTANA; OLIVEIRA, 1996)

As florações foram mais frequentes nas coletas de 17 e 18 de dezembro de 2009 e 14 de janeiro de 2010, com 66% dos pontos amostrados contendo florações dispersivas. Na coleta de 01 de novembro de 2010, florações dispersivas foram encontradas em 46% dos pontos amostrados. Em 12 de março e 9 de junho de 2010 foram registradas florações em 33% dos pontos amostrados, todas elas caracterizadas como florações acumulativas em superfície. Já nas coletas de 21 de outubro de 2009 e 23 de janeiro de 2013 as florações foram caracterizadas como acumulativas em superfície com ocorrência respectivamente em 20 e 25 % dos pontos amostrados.

Ao observar os resultados da figura 13A, constata-se que em quatro coletas (21/10/2009; 12/03/2010; 01/11/2010 e 23/01/2013) em que houveram florações, o número de horas de brilho solar total mensal, superou o número de horas de brilho solar total mensal normal. Também observa-se que em três

coletas (17 e 18/12/2009; 14/01/2010 e 9/06/2010) com a presença de florações, a quantidade de horas de brilho solar total foi abaixo dos valores normais. Além disso, verificou-se que no mês anterior as coletas com florações, a quantidade de brilho solar total mensal encontrada foi menor do que os valores mensais normais, com exceção da coleta do dia 01/11/2010, em que os valores de brilho solar total do mês anterior foi levemente superior à normal.

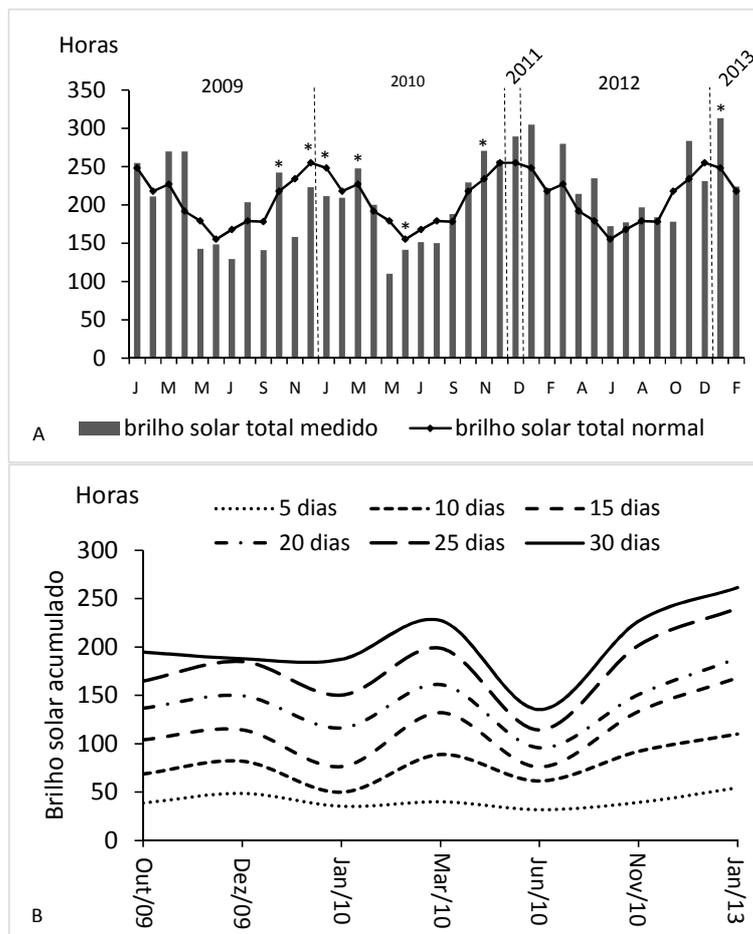


Figura 13. (A) Brilho solar total mensal normal e brilho solar total mensal observado entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2013. **(B)** Brilho solar acumulado em 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias anteriores as coletas com florações. *coletas em que foram registradas florações.

Analisando a quantidade de horas de brilho solar acumulado em 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias anteriores a cada coleta, figura 13B, verifica-se que os valores acumulados nos primeiros 5 dias são muito semelhantes em todas as coletas, variando entre 32,1 e 54,8 horas, tendo pouca influência na ocorrência das florações ($R^2=0,17$), figura 14A. O número acumulado de horas de brilho solar passa a ter uma maior variação a partir do décimo dia anterior as coletas, figura 14B, e estes valores possivelmente tem uma importância maior na ocorrência das florações, pois o coeficiente de determinação da relação entre a

quantidade de horas de brilho solar acumulada e a ocorrência de florações aumenta gradativamente (R^2 variando entre 0,6 e 0,8) nos 10, 15, 20 e 25 dias anteriores as coletas, sendo o máximo $R^2=0,92$, encontrado em 30 dias de brilho solar acumulado, figuras 14A e 14B. Porém a relação entre estas duas variáveis foi negativa, ou seja, quanto maior a quantidade de brilho solar acumulado, menor foi a ocorrência de florações de cianobactérias, o que parece indicar que o sucesso das cianobactérias formadoras de floração aumenta, quanto menor a quantidade de brilho solar disponível nos 30 dias anteriores as coletas.

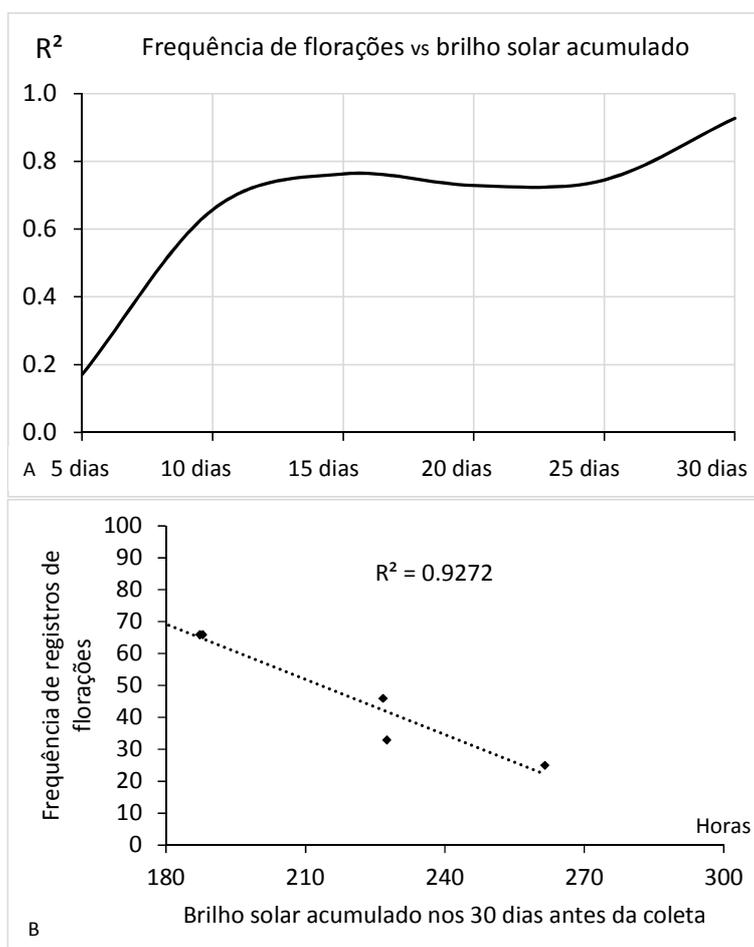


Figura 14 (A) Variação do coeficiente de determinação (R^2) da análise de correlação entre a frequência em que foram encontradas as florações em cada coleta e o acumulado de horas de brilho solar em 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias anteriores a cada coleta. **(B)** Dispersão entre a frequência em que foram encontradas as florações no reservatório Passo Real em cada coleta e o acumulado de insolação nos 30 dias anteriores as coletas ($n=7$).

O fato das cianobactérias formadoras de florações possuírem a capacidade de flutuar e migrar na coluna d'água pode ser uma das explicações do sucesso encontrado em condições com menores valores de brilho solar.

Esta capacidade permite que elas permaneçam por mais tempo na zona iluminada da coluna d'água do que outros grupos do fitoplâncton que não possuem motilidade e dependem dos movimentos advectivos da massa d'água para ficarem expostos a radiação solar, o que torna as cianobactérias mais competitivas nessas condições (OLIVER; GANF, 2000).

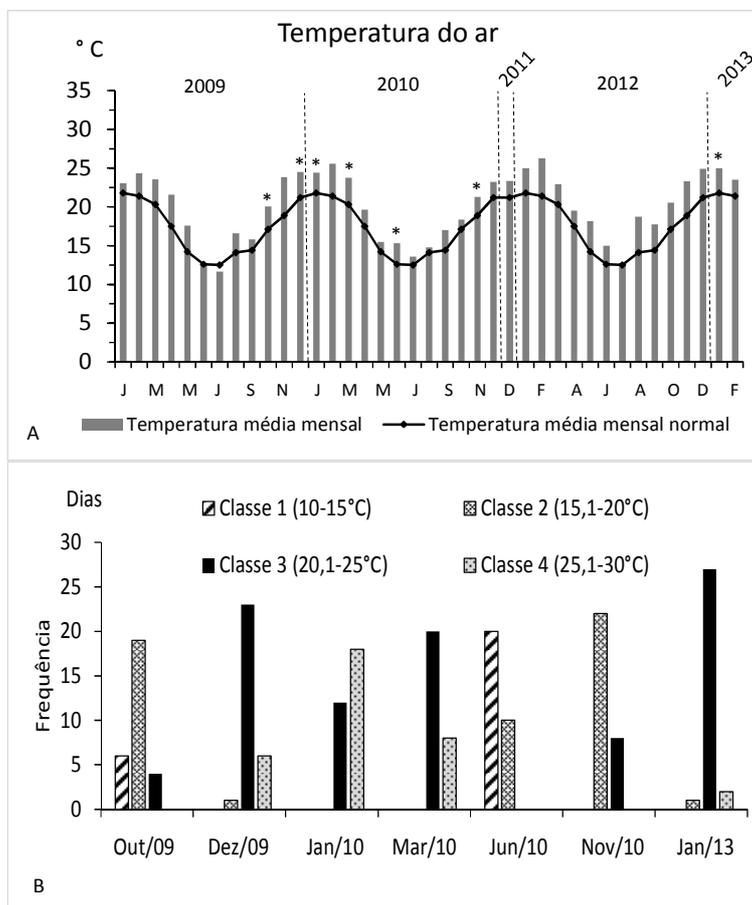


Figura 15. (A) Temperatura média mensal normal do ar e temperatura média mensal do ar observada entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2013. **(B)** Distribuição das classes de temperatura nos 30 dias anteriores as coletas com floração no reservatório Passo Real. *coletas em que foram registradas florações.

A temperatura média mensal do ar esteve sempre acima do que é considerado normal para a região em todos os meses em que foram registradas as florações, figura 15A. Os dias com temperatura do ar entre 20,1 e 25°C foram os mais frequentes nos períodos que antecederam as coletas de dezembro/2009, março/2010 e janeiro/2013, figura 15B. Já no período que antecedeu a coleta de janeiro/2010 predominaram dias com temperatura do ar entre 25,1 e 30°C. Em outubro/2009 e novembro/2010, os dias que antecederam as coletas tiveram o predomínio de temperaturas entre 15,1 e

20°C. A coleta de junho/2010 teve o maior número de dias com temperaturas mais baixas, predominando dias com temperatura entre 10 e 15°C, porém ocorrendo 10 dias com temperaturas entre 15,1 e 20°C.

Na figura 16A e 16B é possível observar a variação da temperatura do ar nos 30 dias que antecederam as coletas nas estações de inverno, primavera e verão. Verifica-se que a temperatura do ar apresenta uma amplitude maior nos 30 dias anteriores as coletas realizadas na primavera (outubro/2009, 11,4 a 24,5°C; dezembro/2009, 18,8 a 28°C; e novembro/2010, 13,4 a 23,1°C) do que aquelas registradas nos dias anteriores as coleta de inverno (junho/2009, 10,6 a 18,9°C) e verão (janeiro/2010, 21,3 a 28,4°C; março/2010, 20,2 a 27,1°C; e janeiro/2013, 19,5 a 27°C). A variável temperatura do ar não foi limitante para a ocorrência das florações no reservatório Passo Real, o que ficou comprovado pelo registro de uma floração no inverno, quando a temperatura do ar oscilou entre 10,6 e 15°C em 20 dos 30 dias que antecederam a coleta, figura 15B. No entanto, verifica-se que condições de temperatura do ar, acima de 20°C, durante um período mais longo, pode ter favorecido a ocorrência de florações, fato observado nas coletas de dezembro/2009, janeiro 2010, março/2010 e janeiro/2013, figura 16A e 16B, quando foram registradas um número maior de ocorrências.

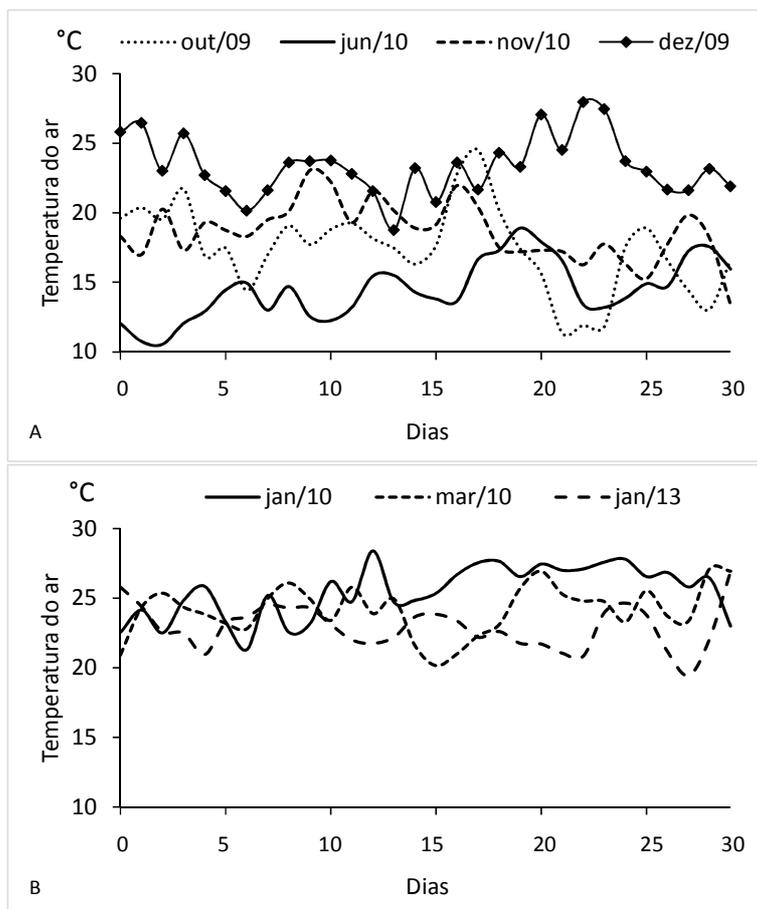


Figura 16. Variação da temperatura do ar nos 30 dias anteriores as coletas com floração no reservatório Passo Real, **(A)** coletas de inverno e primavera e **(B)** coletas do verão.

No mês que antecedeu cada uma das sete coletas com florações, em seis ocasiões, a precipitação pluviométrica mensal foi acima do normal esperado para a região, figura 17A. Está elevada precipitação pode ter contribuído para a ocorrência das florações, gerando escoamento superficial e um aporte de nutrientes (nitrogênio e fósforo) para as águas do reservatório Passo Real, principalmente porque concomitantemente a essas precipitações, coincidiram os períodos de entressafra das culturas agrícolas sob a bacia de drenagem (WACHHOLZ, 2011; GAIDA et al., 2012), quando o solo se encontra exposto, e geralmente recebendo algum tipo de manejo.

Na figura 17B, observa-se a variação dos valores acumulados de precipitação pluviométrica nos 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias que antecederam as coletas com florações. Verifica-se que os valores de acumulados durante os 10 dias que antecederam as coletas foram importantes para a ocorrência das florações, com um $R^2=0,72$, figura 17C.

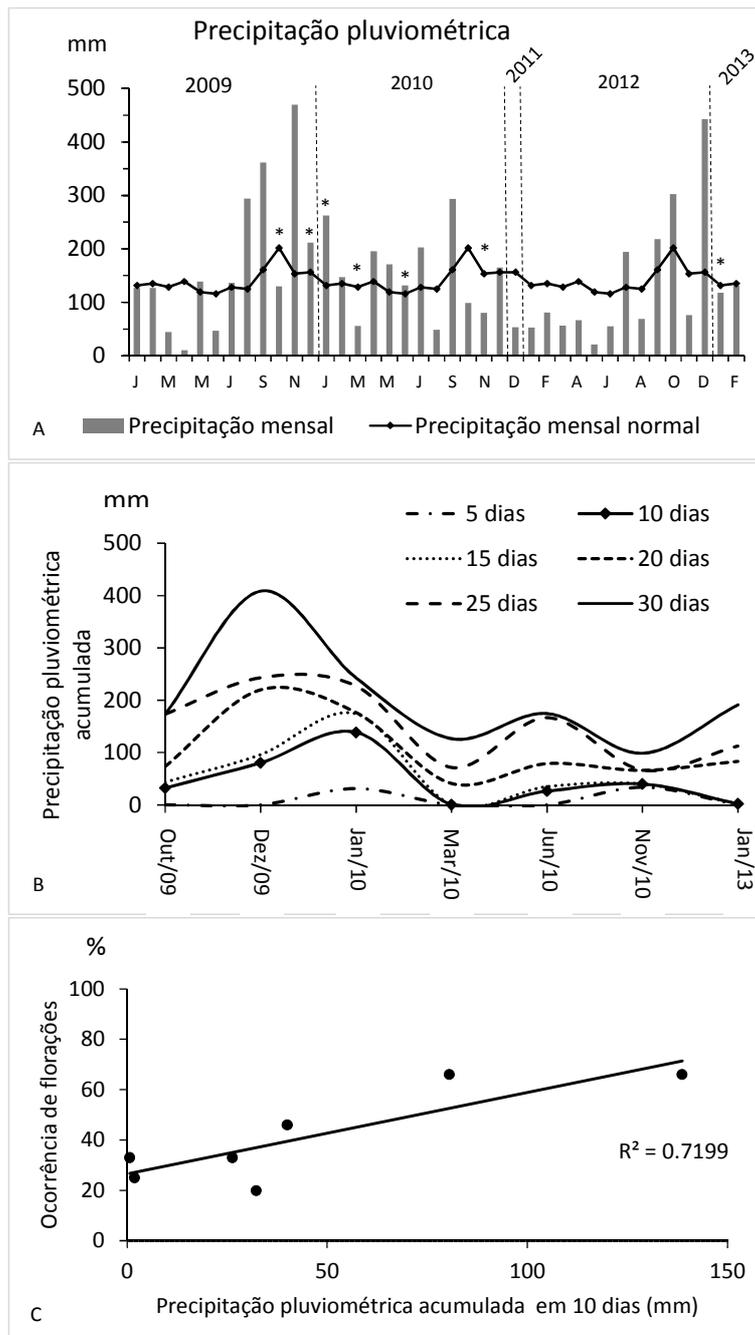


Figura 17. (A) Precipitação mensal normal e precipitação mensal observada entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2013. **(B)** Precipitação acumulada nos 5 dias, 10 dias, 15 dias, 20 dias, 25 dias e 30 dias anteriores as coletas com florações. **(C)** Dispersão entre a ocorrência de florações nos pontos amostrados em cada coleta e a precipitação acumulada nos 10 dias anteriores a cada coleta (n=7). *coletas em que foram registradas florações.

As precipitações pluviométricas mais intensas registradas entre o décimo e o décimo quinto dia anteriores as coletas, foram bem correlacionadas com o número de florações em cada coleta. Precipitações acima de 20mm nos primeiros 10 dias que antecederam as coletas, tiveram maior coeficiente de determinação ($R^2=0,89$), figura 18A e 18B.

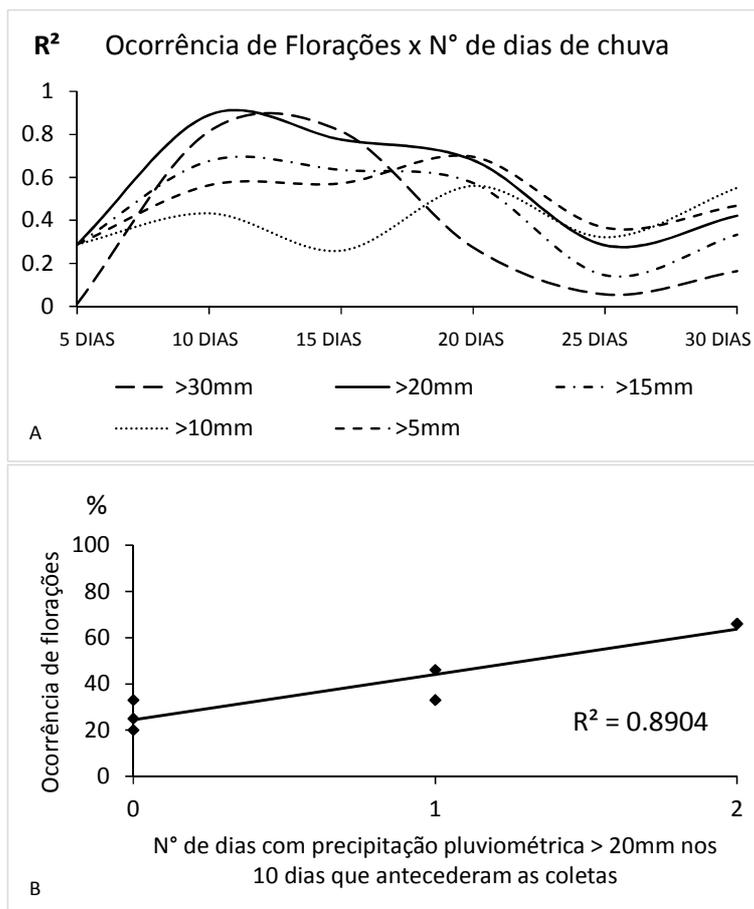


Figura 18. (A) Variação do coeficiente de determinação (R^2) resultante da análise de correlação entre a ocorrência de florações nos pontos amostrados em cada coleta e o número de dias com chuva acima de 5, 10, 15, 20 e 30mm nos 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias anteriores as coletas com floração. **(B)** Dispersão entre o número de dias com chuva acima de 20mm nos 10 dias que antecederam as coletas com floração ($n=7$).

A velocidade do vento nos meses em que foram realizadas as coletas das florações permaneceu sempre próxima do que é considerado normal para a região, variando entre 2 e $2,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, figura 19A. Analisando os valores de velocidade do vento nos 30 dias anteriores as coletas, verifica-se que quanto maior for a ocorrência de dias com velocidade do vento abaixo de $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, maior é a tendência de encontrar florações de cianobactérias nas águas do reservatório, figura 19B.

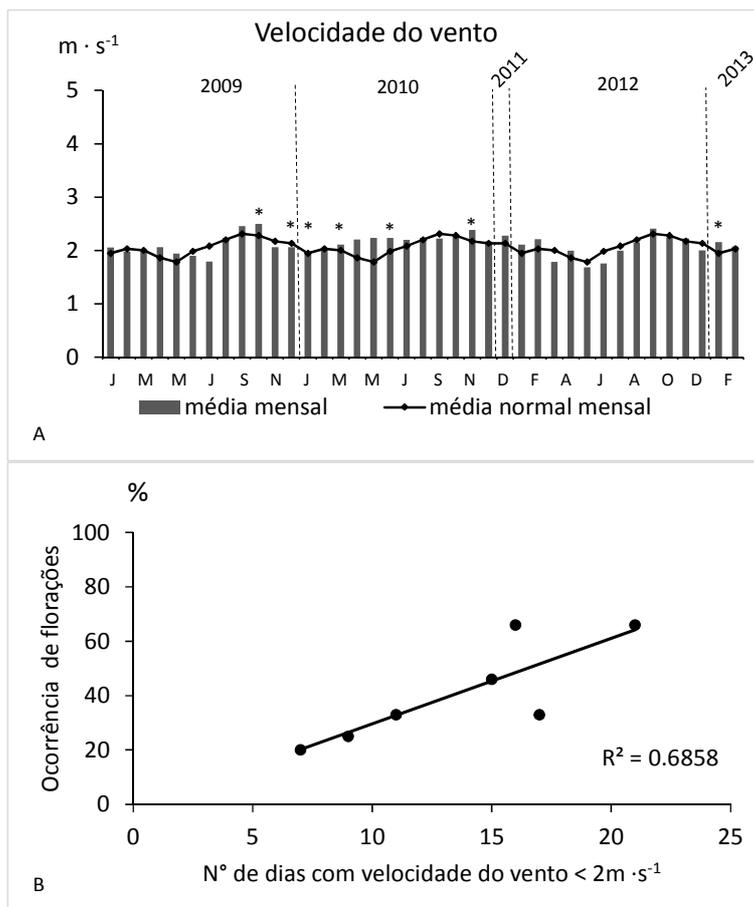


Figura 19. (A) Velocidade do vento mensal normal e velocidade do vento mensal observada entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2013. **(B)** Dispersão entre a ocorrência de florações nos pontos amostrados em cada coleta e o número de dias com velocidade do vento menor que $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, ($n=7$). *coletas em que foram registradas florações.

Caracterização hidrológica

As variáveis hidrológicas do reservatório Passo Real descritas em seguida são referentes ao período de janeiro de 2009 a janeiro de 2013, não constando os dados de 2011, pois nesse ano não houveram coletas de fitoplâncton.

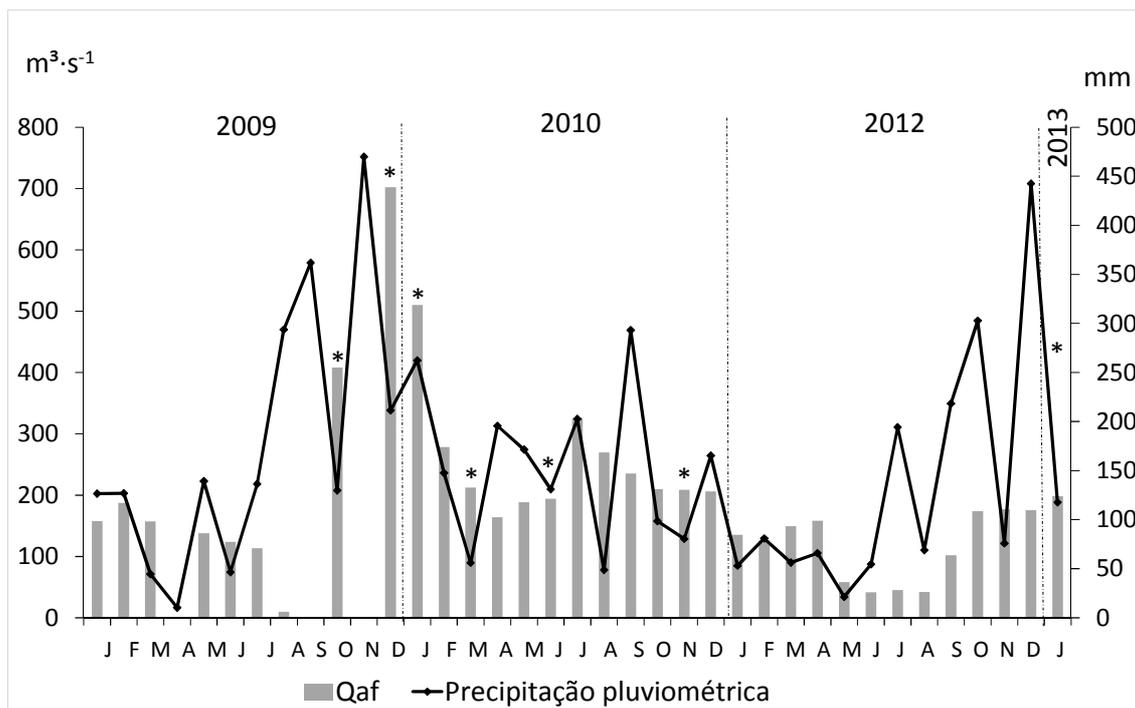


Figura 20. Vazão afluente média mensal (Qaf) do reservatório Passo Real e média mensal de precipitação pluviométrica, da estação pluviométrica de Cruz Alta (INMET), entre janeiro de 2009 e janeiro de 2013, exceto 2011.

A vazão afluente no período amostral variou entre 10 e $702\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, com valores médios de $194\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Tabela 1). Em 2009, os meses de outubro e dezembro tiveram ocorrência de florações de cianobactérias, coincidentemente nesses meses ocorreram respectivamente os maiores valores de vazão afluente do ano, 408 e $702\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente, consequência das elevadas precipitações pluviométricas do período, figura 20. Os meses com menor vazão neste ano foram julho ($114\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e agosto ($10\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). Em 2010, as maiores vazões ocorreram nos meses de janeiro ($510\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e julho ($326\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), já as menores vazões foram registradas em abril ($164\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e maio ($188\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), figura 20. Nos meses em que houveram florações em 2010, a vazão afluente variou entre 194 e $510\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, valores iguais ou superiores à média do período amostral, tabela 1. Em 2012 as vazões afluentes foram sempre inferiores à média do período amostral, variando entre 42 e $177\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, figura 20, durante esse período foram realizadas três campanhas de campo para o monitoramento das florações, nenhum evento de floração foi registrado, sendo que no campo de maio o nível da água estava tão baixo que não foi possível entrar com o barco na represa. As baixas vazões do período foram

consequências de uma estiagem prolongada entre 2011 e 2012. Em 2013, a vazão afluyente obtida para janeiro foi de $198\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, figura 20.

Observando somente os dados de vazão afluyente nos meses em que houveram florações verifica-se que os valores oscilam entre 194 e $702\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, com uma vazão afluyente média de $348\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, tabela 1. Vazões afluyentes acima de $194\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ parecem ser importantes para a ocorrência de florações em Passo Real, pois podem fornecer ao reservatório um aporte de materiais inorgânicos e orgânicos, na forma particulada ou dissolvida, que dependendo do momento agrícola sobre a bacia, pode ser rico em nutrientes (N, P e K), necessários ao metabolismo do fitoplâncton.

Tabela 1. Estatística descritiva das variáveis hidrológicas, referentes ao período de janeiro de 2009 a janeiro de 2013, com exceção de 2011. Vazão afluyente (Qa), vazão defluyente (Qd), tempo de residência (TRT), Cota altimétrica (Cota). *Dados referentes aos meses que tiveram florações de cianobactérias.

	Qa $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	Qd $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	TRT dias	Cota m	Qa* $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	Qd* $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	TRT* dias	Cota* m
Mínimo	10	28	53	315,06	194	154	53	323,74
Média	194	192	242	321,99	348	345	132	325,07
Máximo	702	709	920	325,92	702	709	206	325,92
Desvio padrão	134	138	179	3,46	199	208	57	0,82
Variância	17.546	18.429	31.004	11,62	34.119	37.247	2.785	0,58
Coefficiente de variação	69	72	74	1,07	57	60	43	0,25

A vazão defluyente no período amostral variou entre 28 e $709\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, com um valor médio mensal de $192\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, tabela 1. Em 2009, os maiores valores de vazão defluyente ocorreram em outubro ($411\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e dezembro ($709\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), e os menores ocorreram em julho ($107\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e agosto ($28\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). Em 2010, os maiores valores de vazão defluyente ocorreram em janeiro ($520\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e julho ($343\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), e os menores em abril ($165\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e maio ($189\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). Em 2012, os maiores valores ocorreram nos meses de novembro ($177\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e dezembro ($176\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e os menores valores ocorreram em junho ($29\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), julho ($36\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e agosto ($30\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). Menores valores de vazão defluyente, implicam num aumento do tempo de residência da água no reservatório, figura 21. Em janeiro de 2013 a vazão defluyente foi de $154\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Durante os meses em que ocorreram florações a vazão defluyente variou entre 154 e $709\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, com um valor médio mensal de $345\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, tabela 1. Apesar das elevadas vazões defluyentes observadas nesses meses, o tempo de

residência observado manteve-se sempre acima de 53 dias, figura 21, consequência das grandes dimensões do reservatório e do grande volume de água armazenada. A vazão defluente pode carregar consigo a biomassa algal contida em um reservatório, influenciando a estrutura e a composição de espécies da comunidade fitoplanctônica, porém isso só é significativo para reservatórios com tempo de residência igual ou inferior a sete dias (UHLMANN, 1968; citado por KIMMEL et al., 1990).

Ao longo do período amostral (2009-2013) observou-se que as vazões afluente e defluente foram praticamente iguais, mesmo em períodos de estiagem como verificado no ano de 2012. Isso acontece, porque a principal função do reservatório Passo Real, é o armazenamento de água, assim como a regularização de vazões para o restante do sistema a jusante (represas Maia Filho, Itaúba e Dona Francisca).

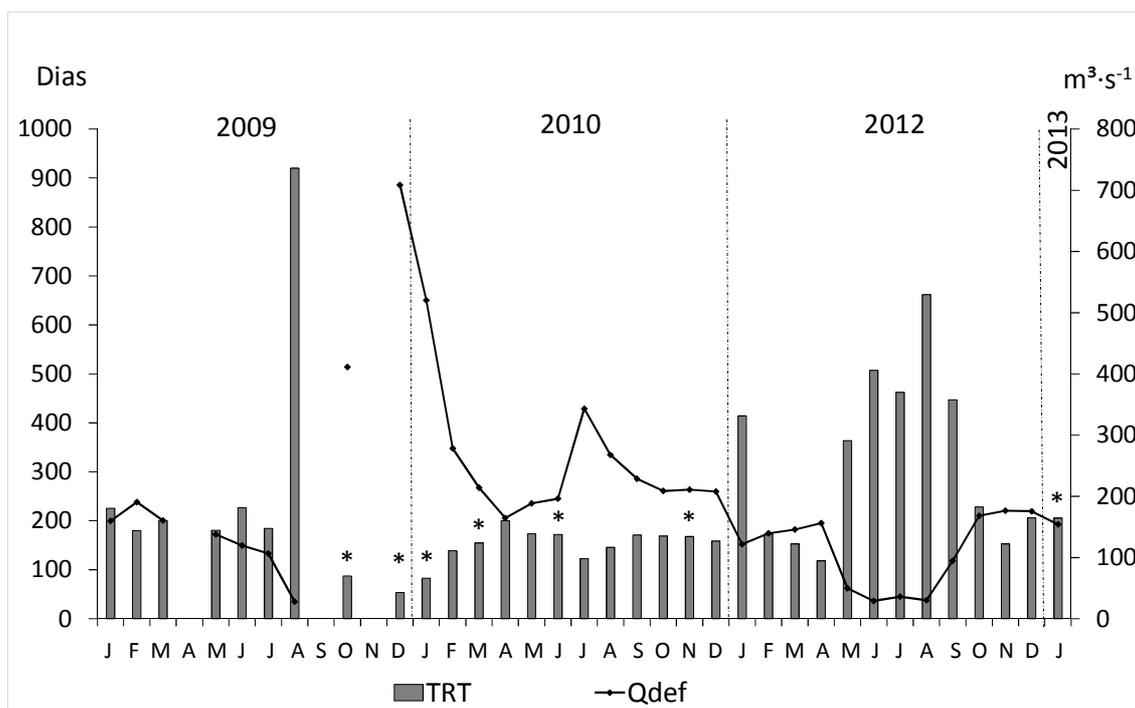


Figura 21. Tempo de residência teórico da água (TRT) e vazão defluente (Qdef) do reservatório Passo Real entre janeiro de 2009 e janeiro de 2013.

O tempo de residência teórico mensal da água em Passo Real no período de 2009 a 2013 (exceto 2011) variou entre 53 e 920 dias, apresentando um valor médio mensal de 242 dias, tabela 1 e figura 21. Durante os meses em que ocorreram as florações de cianobactérias o tempo de residência variou entre 53 e 206 dias, sendo o tempo de residência médio

mensal de 132 dias, tabela 1 e figura 21. Estes resultados são coerentes com aqueles de Carvalho et al. (2011) e Han et al. (2000). Em um estudo de modelagem envolvendo 134 lagos no Reino Unido, Carvalho et al. (2011) verificaram que as concentrações de cianobactérias aumentaram com o aumento do tempo de residência e das concentrações de fósforo total. No reservatório de Sau, localizado no nordeste da Espanha, após estudos com modelagem, Han et al (2000) concluíram que o aumento no tempo de residência tem como consequência um aumento da profundidade da termoclina, intensificando a estratificação das massas d'água, o que favorece a migração de cianobactérias na coluna d'água (OLIVER; GANF, 2000).

Temperatura da água, circulação e estratificação térmica da coluna d'água

Em reservatórios, como em outros ambientes planctônicos, a ocorrência ou não de estabilidade da coluna da água estratificada e as interações entre o regime de mistura vertical e a disponibilidade de luz e nutrientes tem consequências importantes para o status fisiológico, a produtividade, a dimensão estrutural, e a composição taxonômica de comunidades produtoras e consumidoras (REYNOLDS, 1984 citado por KIMMEL, 1990).

A temperatura da água na coluna d'água do reservatório Passo Real no período de maio a agosto de 2013 foi homogênea da superfície ao fundo, indicando que as águas tendem a circular durante este período, apresentando 18°C em maio, resfriando-se gradativamente até atingir os 13°C no final de agosto, figura 22. Na metade de setembro/2013 observou-se um leve aumento das temperaturas nas camadas mais superficiais da coluna d'água, com uma camada mais aquecida até os 4m de profundidade, e o registro de temperaturas de 20°C nos primeiros 0,5m de profundidade, 18°C próximo aos 4m e 15°C aos 9m. Esta alteração de temperatura indica uma condição de estratificação térmica, em seguida quebrada por um novo resfriamento da água que homogeneizou a temperatura em 16°C até os 9m de profundidade, figura 22.

No início de outubro de 2013 ocorreu um aquecimento gradativo das águas em Passo Real, com a camada mais superficial mais aquecida que a as camadas mais profundas, caracterizando o início do período de estratificação do reservatório, figura 22. No final de outubro e início de novembro as camadas mais profundas (9m) também estão mais aquecidas, igualando a temperatura das camadas superiores, caracterizando um breve período em que as águas do reservatório possam estar circulando pela menor resistência a mistura decorrente das temperaturas na coluna d'água, isso fica restrito a regiões menos profundas (até 9m) do reservatório, em regiões mais profundas provavelmente ocorre um aumento da profundidade da termoclina e a intensificação da estratificação térmica. No final de novembro e início de dezembro o aquecimento das camadas de água mais superficiais estabelece novamente uma condição de estratificação térmica no reservatório, com as temperaturas variando de 27°C próximo a superfície até 24°C na profundidade de 9m.

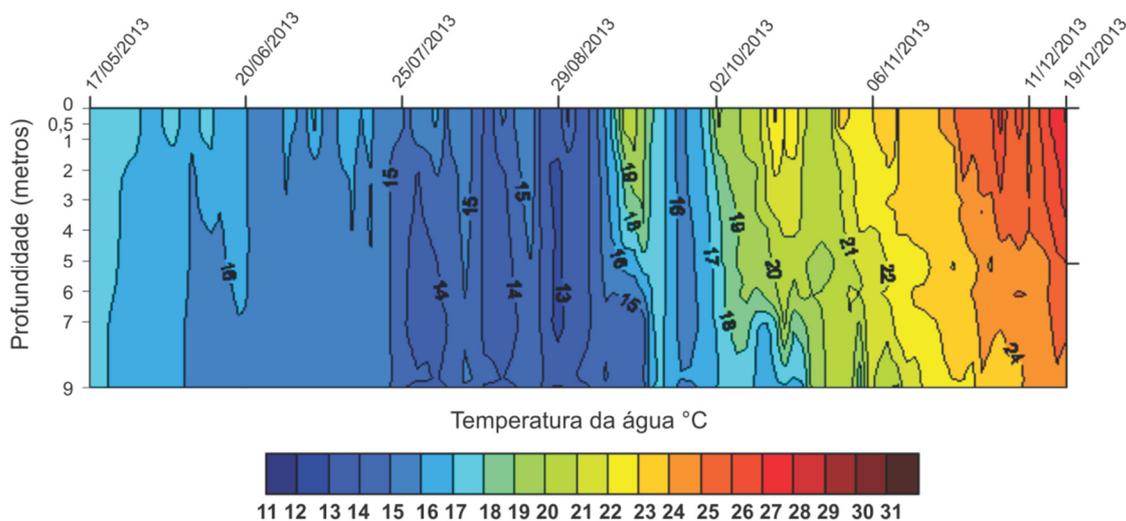


Figura 22. Variação temporal da temperatura na coluna d'água do reservatório Passo Real, entre 17 de maio de 2013e 19 de dezembro de 2013.

Apesar dos dados de temperatura da água não corresponderem ao mesmo período amostral das florações de cianobactérias, as temperaturas obtidas entre maio de 2013 e dezembro de 2013, possibilitaram entender a dinâmica e a distribuição desta variável no perfil da coluna d'água ao longo das diferentes estações do ano. Mesmo sem ter um ano completo de observações, os resultados indicam que o reservatório Passo Real seja classificado como

monomítico quente, com o período de circulação no inverno e estratificação térmica no verão (HUTCHINSON; LÖFFLER, 1956 citado por SCHAFFER, 1985)

Caracterização limnológica

As variáveis limnológicas descritas a seguir foram coletadas nas campanhas de campo em que tiveram florações de cianobactérias no reservatório Passo Real.

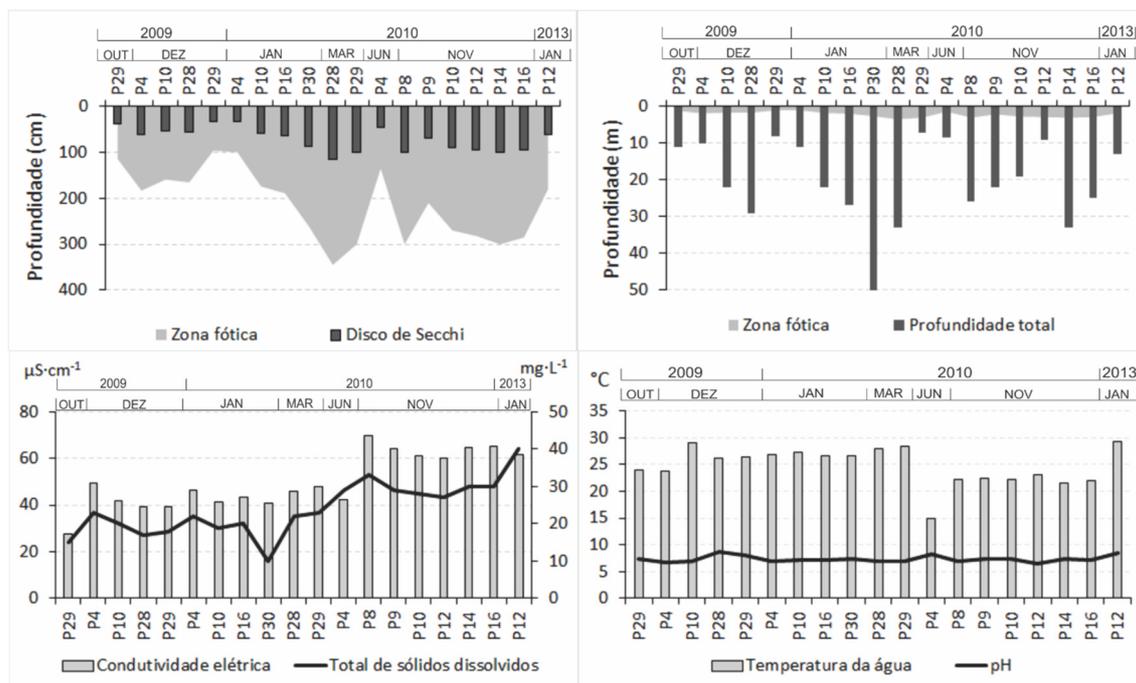


Figura 23. Variáveis limnológicas coletadas nos dias em que ocorreram florações no reservatório Passo Real.

A transparência da água do reservatório durante os episódios de florações foi muito baixa, variando entre 32 e 115cm, com uma profundidade média de 71cm, figura 23. Como consequência a zona fótica estimada também foi baixa, variando entre 96 e 345cm, com uma profundidade média de 213cm. Observa-se que as menores transparências da água estão associadas aos pontos que tiveram florações acumulativas em superfície (P29 em outubro de 2009, P4 em janeiro e junho de 2010).

A profundidade total nos pontos com florações variou entre 7 e 50m, com uma profundidade média de 20m. As florações acumulativas em superfície aconteceram em pontos com profundidades que variaram entre 7 e 33m (P29 em outubro de 2009 e P28 e P29 em março de 2010, P4 em junho de 2010 e

P12 em janeiro de 2013), porém foram mais frequentes em pontos com profundidade total entre 7 e 13m, figura 23. As florações dispersivas aconteceram em pontos em que a profundidade total variou entre 8 e 50m, figura 23.

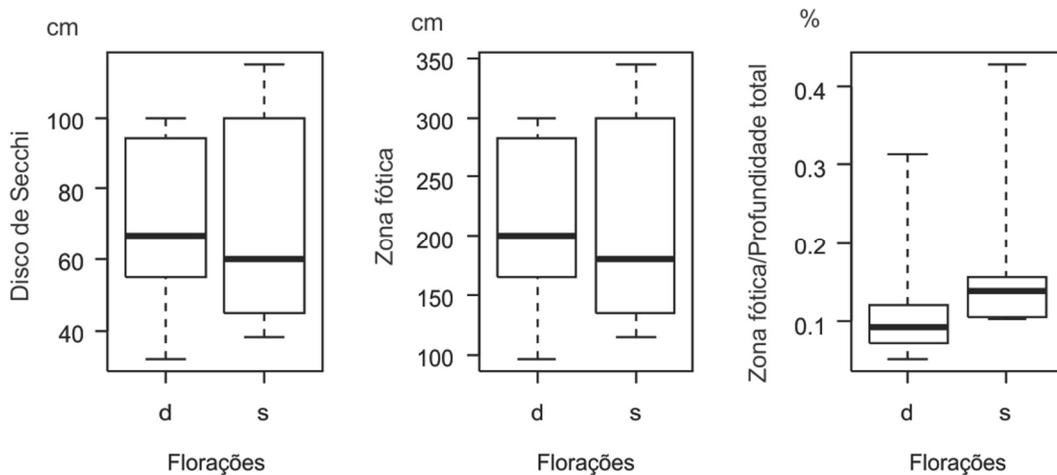


Figura 24. Medidas de tendência central das variáveis transparência da água (Disco de Secchi), zona fótica e razão entre zona fótica e profundidade total, nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).

Outro resultado verificado é que nas florações acumulativas de superfície a zona fótica variou entre 10 e 42% da profundidade total, sendo 18%, o valor médio, figura 24. Nas florações dispersivas a zona fótica variou entre 5% e 33% da profundidade total, sendo 11% o valor médio. A zona fótica relativamente maior em pontos mais rasos (zonas de rio), diminuí a distância entre zona iluminada e a camada de sedimento do fundo do reservatório, aumentando a chance de interação entre a zona iluminada e a zona não iluminada, rica em nutrientes. Como consequência, a probabilidade de ocorrer a mistura de nutrientes e fitoplâncton na interface iluminada e não iluminada aumenta, já que em zonas de rio há uma tendência da zona de mistura ser, em muitos momentos, maior que a zona fótica (KIMMEL et al., 1990). Essa frequente disponibilidade de nutrientes na camada d'água iluminada pode estar relacionada às frequentes florações de cianobactérias observadas nas zonas de rio em Passo Real, figura 7.

Além disso, quando a zona fótica fica mais próxima do fundo e o sedimento é revolvido pela turbulência da água, pode haver a ressuspensão de células dormentes de cianobactérias do sedimento para a camada d'água iluminada. A disponibilidade e a qualidade da radiação solar é muito importante

para o processo de quebra de dormência e recrutamento de acinetos em *Dolichospermum circinalis* (THOMPSON et al., 2009).

Algumas das condições meteorológicas obtidas no dia da coleta também foram importantes na determinação dos tipos de floração. Florações dispersivas foram encontradas em condições de turbulência da água, gerada por rajadas de vento acima de $7,9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Já as florações acumulativas em superfície foram coletadas em condições de vento com velocidades abaixo $5,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, figura 25.

As condições de temperatura do ar e da água no momento da coleta das florações não tiveram diferenças significativas entre os pontos com florações dispersivas e acumulativas em superfície, figura 25. A temperatura do ar oscilou entre $11,9$ e $32,1^\circ\text{C}$, com a média em $25,6^\circ\text{C}$. Já a temperatura da água oscilou entre 15 e 30°C , com a média em 25°C . Algumas espécies de *Microcystis* e *Dolichospermum* tem seu metabolismo adaptado a está faixa de temperatura, ocorrendo inibição do crescimento em ambos os gêneros quando as temperaturas ficam abaixo de 10°C , e o crescimento sendo ótimo em *Microcystis* spp. na faixa dos 25 a 30°C e em *Dolichospermum* spp. na faixa dos 18 a 30°C (ROBARTS; ZOHARY, 1987). Em um estudo realizado em laboratório, Baker e Bellifemine (2000), constataram em seus experimentos que ocorre um aumento na taxa de germinação de acinetos quando a temperatura da água está entre 20 e 25°C .

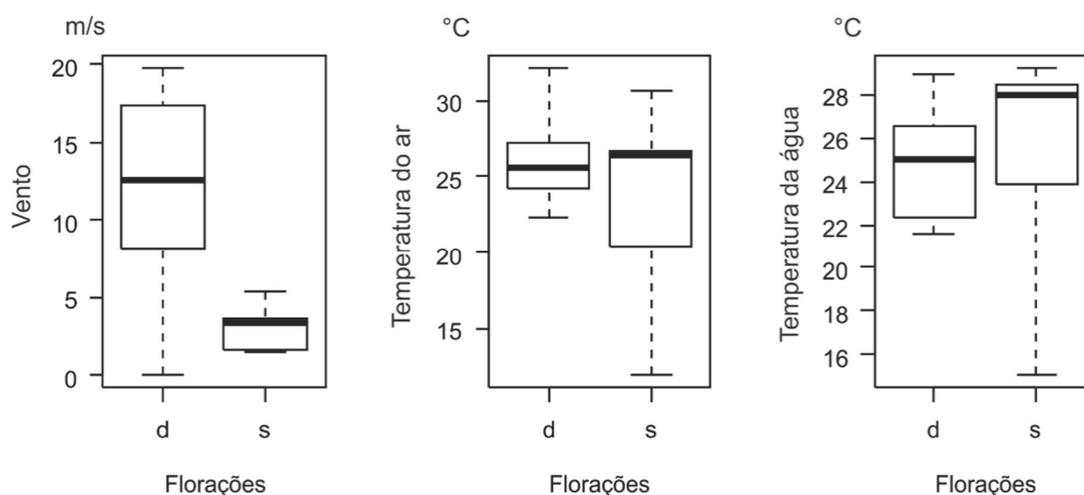


Figura 25. Medidas de tendência central da velocidade do vento, temperatura do ar e temperatura da água nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).

A condutividade elétrica da água variou entre 27,5 e 69,8 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ durante as florações, com uma média de 50,1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Já o total de sólidos dissolvidos variou entre 10 e 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, com um valor médio de 24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Em ambas as variáveis não houve distinção entre as florações dispersivas e acumulativas em superfície, figura 26. Os valores de pH da água medidos durante as florações oscilaram entre 6,43 e 8,68, ocorrendo um pH médio de 7,35. Os pontos com pH entre 7,94 e 8,68, figura 26, coincidiram com as florações acumulativas em superfície das *Microcystis* spp. que tiveram biovolume acima de 5,95 $\text{mm}^3\cdot\text{L}^{-1}$.

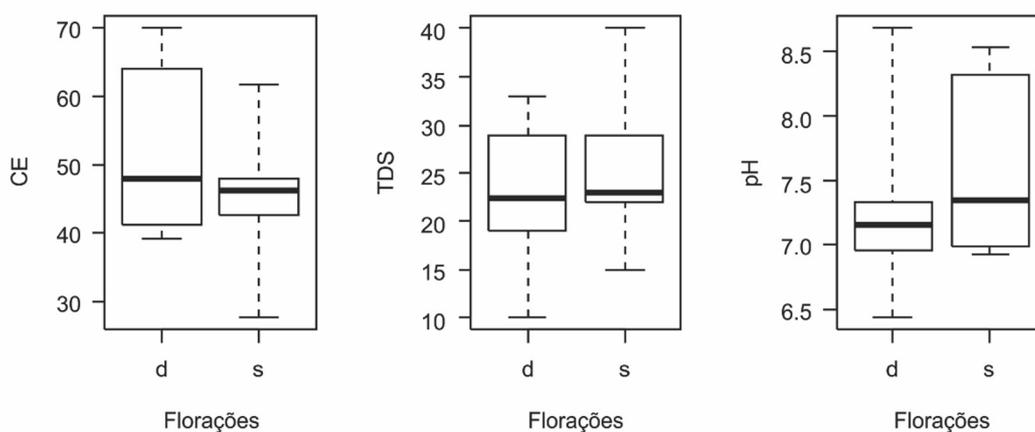


Figura 26. Medidas de tendência central das variáveis condutividade elétrica (CE), total de sólidos dissolvidos (TDS) e potencial hidrogeniônico (pH) nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).

Nas coletas em que foram encontradas florações dispersivas observou-se uma quantidade maior de radiação solar incidindo no topo da atmosfera, variando entre 852,8 e 1.393,5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, figura 27. Nas coletas com florações acumulativas em superfície esta quantidade de radiação solar estimada para o topo da atmosfera foi menor, variando entre 737,1 e 1.009 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, figura 27. Isto pode estar relacionado a disponibilidade de radiação solar resultante da posição aparente do sol em cada horário de coleta, figura 27. As coletas com florações dispersivas ocorreram entre as 9:00 e às 15 horas, já as coletas com florações acumulativas em superfície ocorreram entre 8:20 e às 10:30 horas, figura 27.

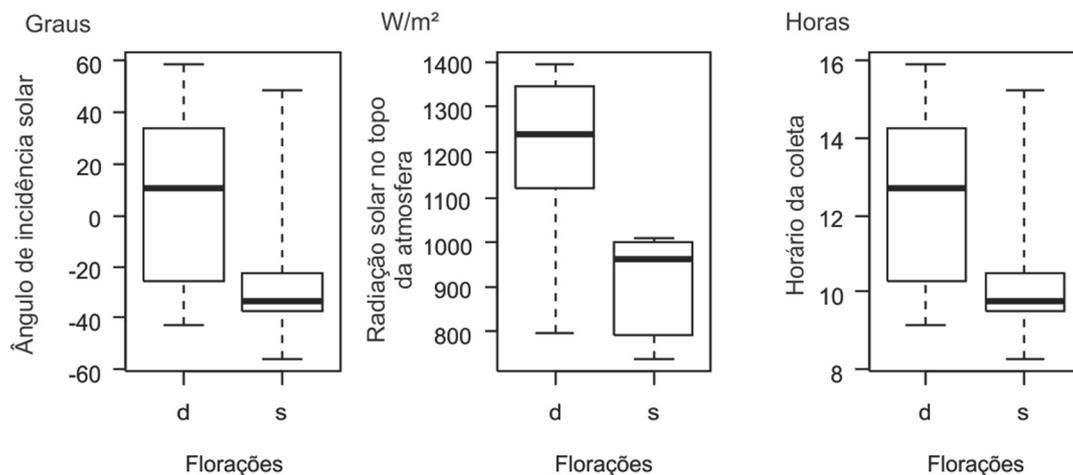


Figura 27. Medidas de tendência central das variáveis ângulo de incidência solar, radiação solar no topo da atmosfera e horário de coleta, nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).

As florações dispersivas coletadas em Passo Real tiveram o predomínio do gênero *Dolichospermum*, com valores de biovolume bem superiores aos do gênero *Microcystis*, figura 28. Já o contrário é observado nas florações acumulativas em superfície, tendo o predomínio do gênero *Microcystis*, com valores de biovolume superiores aos verificados para o gênero *Dolichospermum*, figura 28.

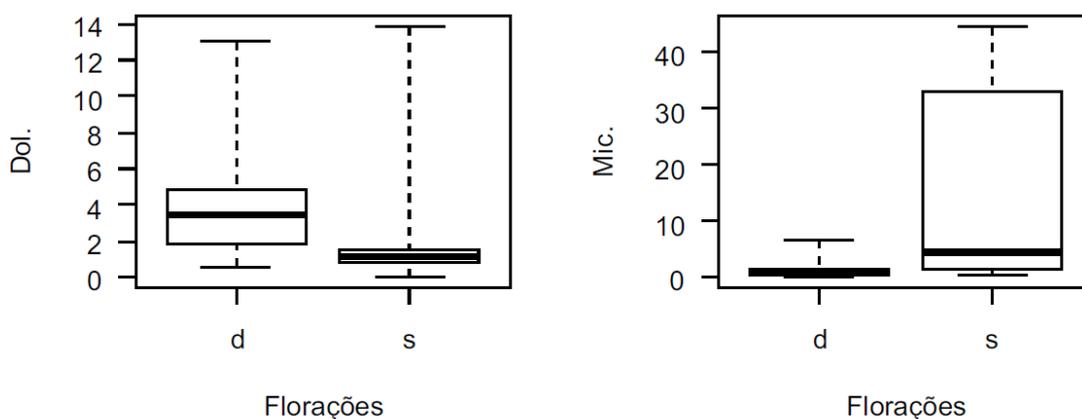


Figura 28. Medidas de tendência central do biovolume ($\text{mm}^3 \cdot \text{mL}^{-1}$) dos gêneros *Dolichospermum* (Dol) e *Microcystis* (Mic) nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).

O mesmo observa-se com as espécies *D. circinalis* e *D. crassum* nas florações dispersivas, e com as espécies *M. aeruginosa* e *M. panniformis* nas florações acumulativas em superfície, figura 29.

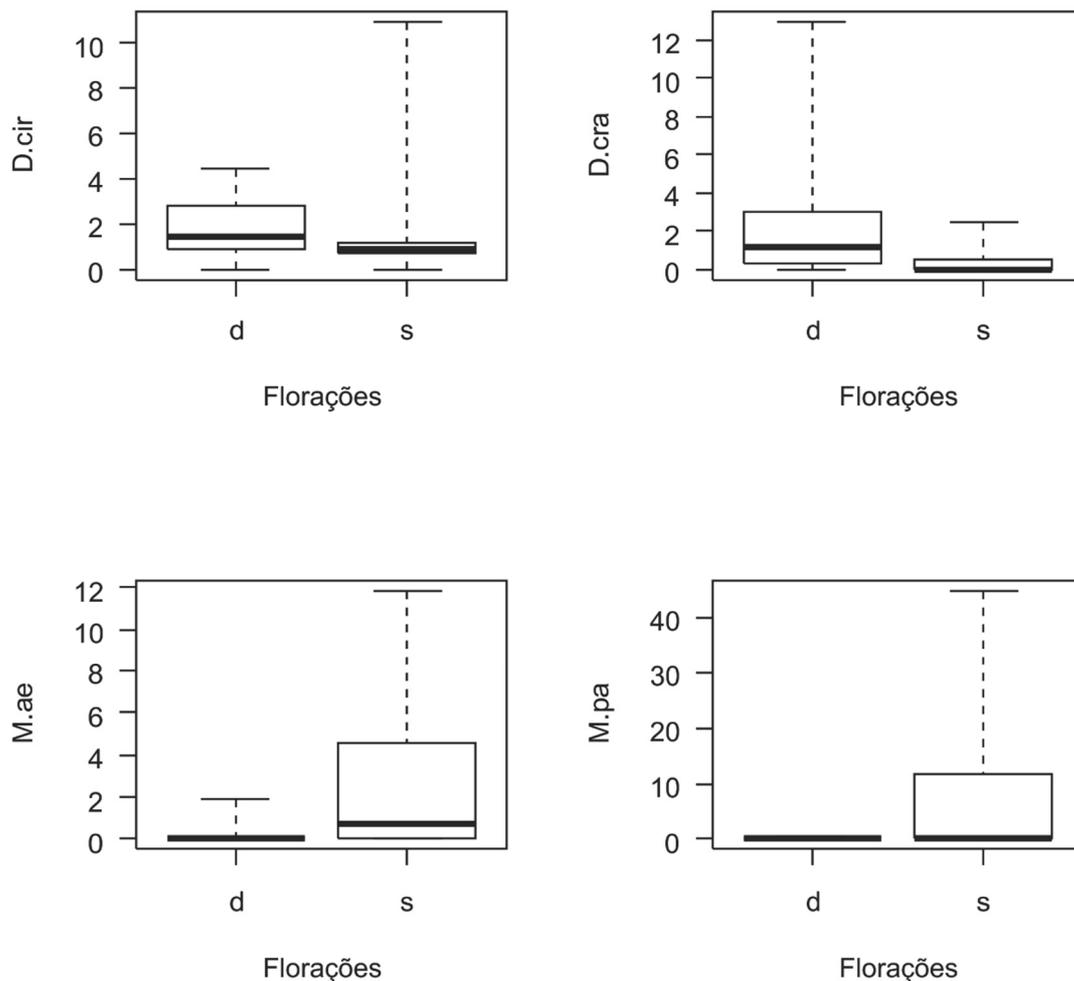


Figura 29. Medidas de tendência central do biovolume ($\text{mm}^3 \cdot \text{mL}^{-1}$) das espécies *D. circinalis* (D.cir), *D. crassum* (D.cra), *M. aeruginosa* (M.ae) e *M. panniformis* (M.pa) nas coletas com florações dispersivas (d) e acumulativas de superfície (s).

Além das espécies já citadas, outras espécies integraram os grupos das que ocorreram em florações dispersivas ou das florações acumulativas em superfície, porém as contribuições são menores em termos de biovolume. Na figura 30 é possível observar a ordenação das unidades amostrais segundo os dois grupos distintos de espécies que ocorreram em florações dispersivas e acumulativas em superfície. Em florações dispersivas o grupo é formado pelas espécies *D. crassum*, *D. circinalis*, *M. protocystis*, *D. planctonicum*, *D. mendotae* e *D. spiroides*. Já em florações acumulativas em superfície o grupo é formado pelas espécies *M. panniformis*, *M. aeruginosa*, *M. wesembergii* e *D. solitarium*.

Após a aplicação da análise de espécies indicadoras (Indval) submetido posteriormente ao teste de significância de Monte Carlo, os resultados

apontaram dentre estes dois grupos, que as espécies *M. aeruginosa* ($p < 0.017$) e *M. panniformis* ($p < 0.0112$) são consideradas indicadoras das florações acumulativas em superfície. Já para as florações dispersivas não houve a ocorrência de espécie indicadora.

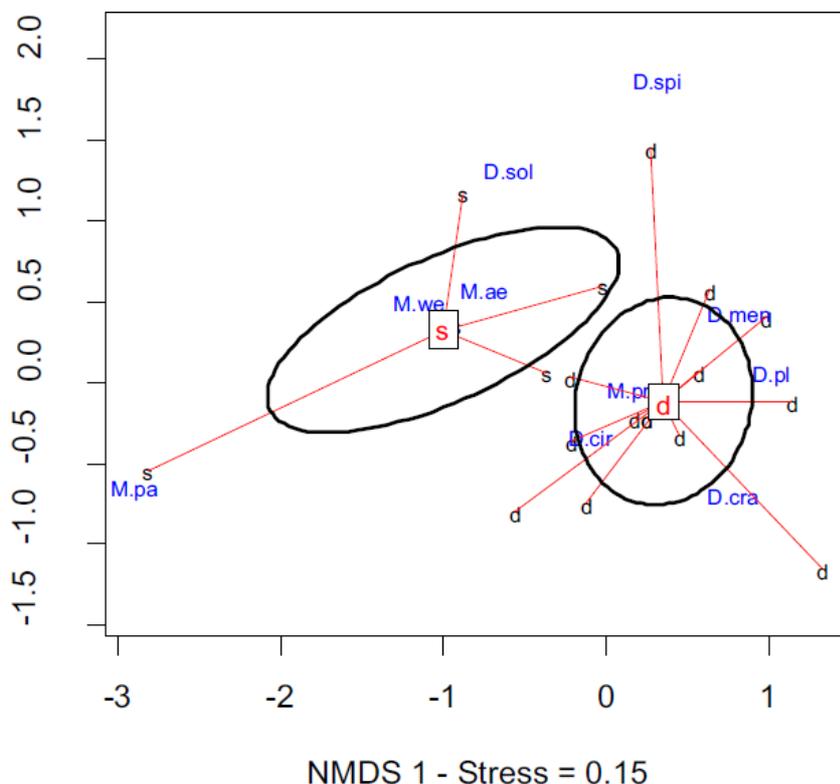


Figura 30. Resultado do NMDS aplicado ao biovolume das espécies de *Microcystis* e *Dolichospermum* presentes nas florações do reservatório Passo Real, durante as coletas de 2009 a 2013, para verificar aquelas com ocorrência em florações dispersivas (d) e em florações acumulativas em superfície (s). *M. panniformis* (M.pa), *M. wesenbergii* (M.we), *M. aeruginosa* (M.ae), *M. protocystis* (M.pr), *D. circinalis* (D.cir), *D. crassum* (D.cra), *D. planctonicum* (D.pl), *D. mendotae* (D.men) e *D. solitarium* (D.sol). As linhas vermelhas unem os pontos com ocorrência de florações dispersivas (d) e florações acumulativas em superfície (s). As elipses identificam o centro dos dois grupos de pontos amostrais, das florações dispersivas e acumulativas em superfície.

Ao analisar o resultado do NMDS apresentado na figura 31, verifica-se nitidamente um gradiente de velocidade do vento entre as florações dispersivas e as florações acumulativas em superfície, indicando também as espécies que ocorreram nas diferentes condições de vento. Espécies filamentosas como *D. spiroides*, *D. mendotae*, *D. crassum*, *D. solitarium*, *D. circinalis* e a espécie cocoide *M. protocystis* foram encontradas em condições de velocidade do vento acima $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. As demais espécies cocoides tais como *M. panniformis*, *M. wesenbergii* e *M. aeruginosa* foram encontradas em condições de velocidade do vento abaixo de $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

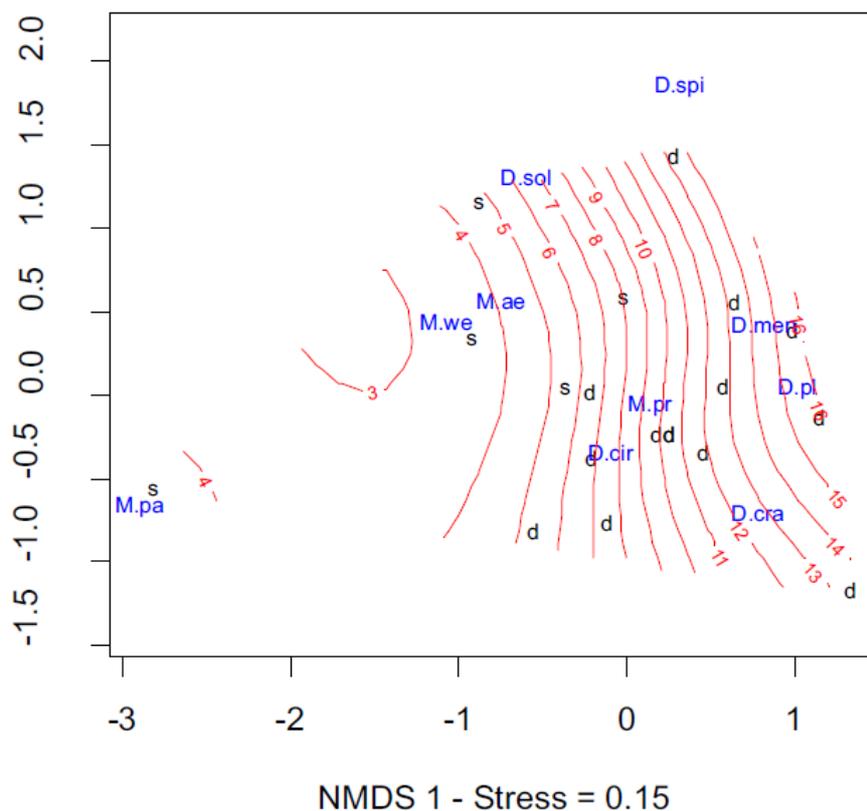


Figura 31. Resultado do NMDS aplicado ao biovolume das espécies de *Microcystis* e *Dolichospermum* presentes nas florações do reservatório Passo Real, durante as coletas de 2009 a 2013, em um gradiente de velocidade do vento ($m \cdot s^{-1}$) no momento da coleta, isolinhas em vermelho. *M. panniformis* (M.pa), *M. wesenbergii* (M.we), *M. aeruginosa* (M.ae), *M. protocystis* (M.pr), *D. circinalis* (D.cir), *D. crassum* (D.cra), *D. planctonicum* (D.pl), *D. mendotae* (D.men) e *D. solitarium* (D.sol). Pontos amostrais com florações dispersivas (d) e acumulativas em superfície (s).

Ao contrário das distintas condições de vento observadas, a variável temperatura também ocorreu com valores diferentes entre as florações dispersivas e as florações acumulativas em superfície, porém são valores muito sutis, que devem ser analisados com cautela para não haver uma conclusão precipitada. As florações dispersivas ocorreram em temperaturas entre 24,5°C e 25°C, figura 32. Já as florações acumulativas em superfície foram encontradas em temperaturas que variaram entre 24,7 e 25,4°C. A temperatura em si, tem uma importância fundamental para o metabolismo das cianobactérias, porém é importante avaliar um período maior de dados de temperatura da água para analisar a sua influência sobre o metabolismo, e os dados apresentados na figura 32, refletem apenas a condição de temperatura no dia da coleta.

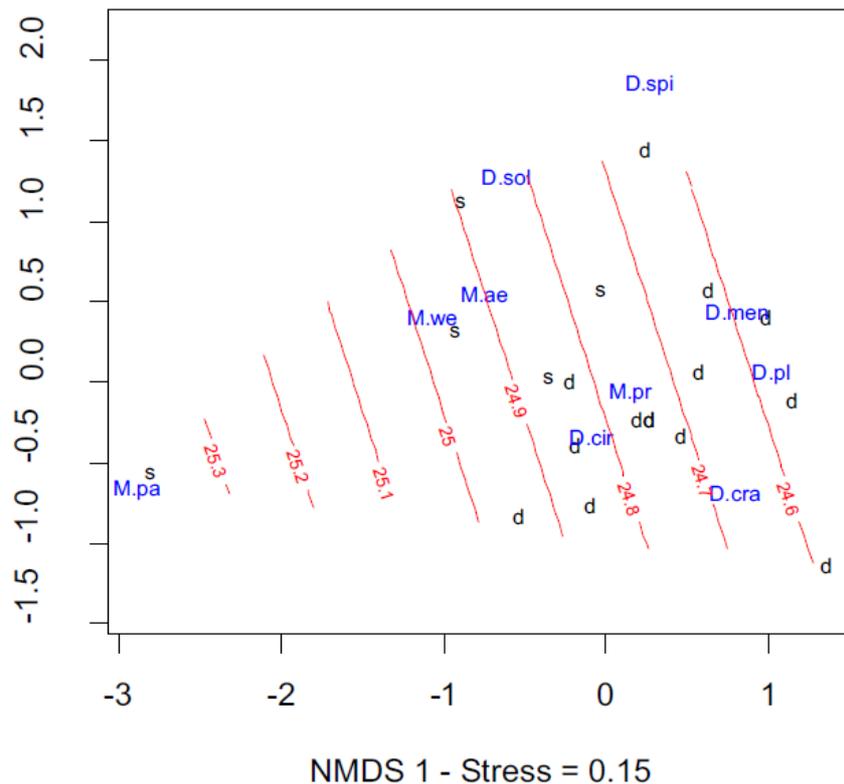


Figura 32. Resultado do NMDS aplicado ao biovolume das espécies de *Microcystis* e *Dolichospermum* presentes nas florações do reservatório Passo Real, durante as coletas de 2009 a 2013, em um gradiente de temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) no momento da coleta, isolinhas em vermelho. *M. panniformis* (M.pa), *M. wesenbergii* (M.we), *M. aeruginosa* (M.ae), *M. protocystis* (M.pr), *D. circinalis* (D.cir), *D. crassum* (D.cra), *D. planctonicum* (D.pl), *D. mendotae* (D.men) e *D. solitarium* (D.sol). Pontos amostrais com florações dispersivas (d) e acumulativas em superfície (s).

No entanto, a temperatura é muito importante para determinar se um corpo d'água encontra-se estratificado ou não. E muitas vezes, pequenos gradientes de temperatura podem ser determinantes para estabelecer uma resistência maior a mistura da coluna d'água. A figura 32, demonstra um pequeno gradiente térmico na temperatura superficial da água no momento da coleta. A diferença de temperatura observada entre as florações dispersivas e as acumulativas em superfície, provavelmente ocorrem pelo fato que nas dispersivas o vento esteja atuando como um dissipador de calor para as camadas inferiores da coluna d'água, gerando turbulência e ampliando a profundidade da camada de mistura, intensificando a troca de calor entre as camadas superficiais mais aquecidas com as camadas inferiores mais frias. Já nas condições em que há baixa turbulência da água devido a ocorrência de ventos fracos ou ausência de vento, como verificado nas florações acumulativas em superfície, a temperatura da água se mantém mais aquecida

na camada mais superficial do corpo d'água, perdendo calor mais lentamente para as camadas inferiores.

CONCLUSÕES

De uma forma geral as disponibilidades de radiação solar, brilho solar, precipitação pluviométrica e temperatura do ar nos meses de primavera e verão são naturalmente favoráveis a ocorrência de cianobactérias no reservatório Passo Real.

a) Dentre as condições meteorológicas, hidrológicas e limnológicas analisadas no período estudado, algumas tiveram uma influência favorável na ocorrência das florações de cianobactérias, apresentando os seguintes padrões:

- precipitações pluviométricas elevadas (>20mm), registradas até 10 dias antes das coletas;
- temperatura média do ar diária acima de 15°C nos trinta dias que antecederam as coletas;
- predomínio de dias com baixa velocidade do vento (<2m·s⁻¹), nos trinta dias anteriores as coletas das florações;
- elevadas vazões afluentes, decorrentes de precipitações elevadas, coincidentes com períodos de entressafra dos cultivos agrícolas, possivelmente proporcionando um aporte de nutrientes as águas do reservatório;
- longo tempo de residência da água (53 a 206 dias), média de 132 dias durante os meses com florações;
- temperatura da água variando entre 15° e 30°C, média de 25°C nos dias de coleta das florações;
- ocorrência de estratificação térmica da água no período de outubro a março;
- condições limnológicas e hidrológicas favoráveis as florações em zonas de rio (mais afetadas) e transição do reservatório Passo Real.

b) O reservatório Passo Real classifica-se como monomítico quente, com a ocorrência de apenas uma circulação vertical completa durante o ano, possivelmente iniciando no outono e prolongando-se até o inverno, com estratificação térmica se formando na primavera e se estabelecendo mais fortemente no verão.

c) Os padrões ambientais descritos acima atuam de forma sinérgica para que ocorram florações de cianobactérias no reservatório Passo Real. No entanto, verificou-se que o tipo de floração (dispersiva ou acumulativa em superfície) é determinado principalmente pela presença ou ausência de turbulência na água. Constatou-se então, que a velocidade do vento no dia da coleta foi o fator que mais interferiu na determinação dos tipos de florações. Florações dispersivas ocorreram em condições de velocidade do vento acima de $7,9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e florações acumulativas em superfície ocorreram em condições de velocidade do vento abaixo de $5,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Além disso, verificou-se que espécies do gênero *Dolichospermum* estão melhor adaptadas a formar florações dispersivas, principalmente as espécies *D. crassum* e *D. circinalis*, que alternaram a dominância nestas florações. Já espécies do gênero *Microcystis* estão melhor adaptadas a formar florações acumulativas em superfície, com destaque para as espécies *M. aeruginosa* e *M. panniformis*, dominantes nesse tipo de floração em Passo Real.

RECOMENDAÇÕES

Apesar da identificação de alguns padrões ambientais terem sido evidenciados neste estudo, é necessário que as condições ambientais e as florações de cianobactérias no reservatório Passo Real sejam monitoradas em uma série temporal mais longa (10 a 15 anos) para que ocorra uma melhor avaliação destes padrões.

Além disso, em estudos futuros seria importante obter e analisar dados pluviométricos em um contexto espacial e temporal, contemplando as diferentes sub-bacias do Alto Jacuí e os diferentes usos do solo, monitorando simultaneamente a entrada de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e as florações de cianobactérias no reservatório.

Para a melhoria nas condições da qualidade da água, os proprietários rurais da bacia hidrográfica devem ser orientados a preservar e recuperar as Áreas de Preservação Permanente (APP) dos rios que abastecem o reservatório. Também, a empresa com a atual concessão de uso do reservatório deve ser orientada a delimitar e recuperar as APP do entorno deste.

Sugere-se ao comitê de Bacia do Alto Jacuí a criação de uma equipe de profissionais para o monitoramento de florações de cianobactérias no reservatório Passo Real, assim como a elaboração de uma estratégia de manejo para reduzir o aporte de nutrientes nas águas deste manancial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAGNOSTIDIS, K.; KOMÁREK, J. Modern approach to the classification system of cyanophytes. 3 – Oscillatoriales. **Algological Studies**, v. 50-53: p. 327-472, 1988.

AZEVEDO, S.M.F.O. et al. Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru/Brazil. **Toxicology**. v.181. n. 182. p. 441-446. 2002.

BAKER, P.D.; BELLIFEMINE, D. Environmental influences on akinete germination of *Anabaena circinalis* and implications for management of cyanobacterial blooms. **Hydrobiologia**. v.427. p. 65–73, 2000.

BICUDO, C.E.B.; BICUDO, D.C. **Amostragem em limnologia**. São Carlos: RiMa, 2004.

BICUDO, C.E.M.; MENEZES, M. **Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições**. São Carlos: RiMa, 2005. 508p.

BOLLMAN, H.A. Relação da densidade populacional sobre variáveis de qualidade físico-químico das águas superficiais em microbacias hidrográficas urbanas sem cobertura sanitária em Porto Alegre - RS. 2003. 162 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BORGES, D.V.C Avaliação da qualidade da água e ocorrência de cianobactérias do Ribeirão do Funil, Ouro Preto - MG. 2008. 159 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

BOUVY, M. et al. Dynamics of a toxic cyanobacterial bloom (*Cylindrospermopsis raciborskii*) in a shallow reservoir in the semi-arid region of northeast Brazil. **Aquat Microb Ecol**. v. 20. p. 285-297, 1999.

BRANCO, C.W.C. et al. Impact of climate on the vertical Water column structure of Lajes Reservoir (Brazil): A tropical reservoir case. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, v.14, p. 175-191, 2009.

BROOKES, J.D. et al. The influence of light and nutrients on buoyancy, filament aggregation and flotation of *Anabaena circinalis*. **Journal of Plankton Research**, v. 21, n. 2, p. 327-341, 1999.

CALIJURI, M. do C.; ALVES, M. S. A.; dos SANTOS, A. C. A. **Cianobactérias e Cianotoxinas em águas continentais**. São Carlos: RiMa, 2006.

CARNEIRO, R.L. et al. Effects of light intensity and light quality on growth and circadian rhythm of saxitoxins production in *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria). **Journal of Plankton Research**, v. 31, n. 5, p. 481-488, 2009.

CARVALHO, L. et al. Cyanobacterial blooms: Statistical models describing risk factors for national-scale lake assessment and lake management. **Science of the Total Environment**. v. 409. p. 5353–5358. 2011.

CARVALHO, L.R. et al. A toxic cyanobacterial bloom in na urban coastal lake, Rio Grande do Sul. **Brazilian Journal of Microbiology**. v.39. p.761-769. 2008

CEBALLOS, B.S.O.D.; AZEVEDO, S.M.F.D.O.; BENDATE, M.M.D.A. Fundamentos Biológicos e Ecológicos Relacionados as Cianobactérias. p. 23-81 In: PROSAB 4. **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 503p.

CEEE. Companhia Estadual de Energia Elétrica. Geração de Energia. Disponível em: <<http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Conntroller.aspx?CC=12457>>. Acesso: 10 Nov. 2010.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica L5.303**: Fitoplâncton de Água Doce: Métodos Qualitativo e Quantitativo (Método de Ensaio). São Paulo: CETESB, 2006. 17p.

COSTA, I.A.S. et al. Occurrence of toxin-producing cyanobacteria blooms in a Brazilian Semiarid reservoir. **Braz. J. Biol.**, v.66, n.1B. p. 211-219, 2006.

COSTA, I.A.S et al. Dinâmica de cianobactérias em reservatórios eutróficos do semi-árido do Rio grande do Norte. **Oecol. Bras.**, v.13, n.2, p. 382-401, 2009.

CYBIS, L.F et al. **Manual para estudo de cianobactérias planctônicas em mananciais de abastecimento público: caso da represa Lomba do Sabão e lago Guaíba, Porto Alegre, Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 64p.

DE LEÓN, L.; BONILLA, S. Guía de Reconocimiento de Floraciones de Cianobacterias em terreno. In: **Cianobacterias planctónicas del Uruguay**. p. 37- 40, 2009.

DI BERNARDO, L. **Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento**. 1ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 127p.

DODDS, W.K. **Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications**. Academic Press, 2002. 591p.

ESTEVES, F. de A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência: FINEP, 1998.

FALCONER, I. Toxic Cyanobacterial Bloom Problems in Australian Waters: Risks and Impacts on Human Health. In: Cooperative Research Centre for water quality and treatment (ed.). **Blue-green algae: their significance and**

management within water supplies. Salisbury: International Phycological Society, p. 7-14. 2002.

FERNANDES, V.O.; CAVATI, B.; OLIVEIRA, L.B.; SOUZA, B.D. Ecologia de cianobactérias: fatores promotores e consequências das florações. **Oecol. Bras.**, v.13, n. 2, p. 247-258, 2009.

FERRÃO-FILHO, A.S. et al. Biomonitoring of cyanotoxins in two tropical reservoirs by cladoceran toxicity bioassays. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v.72, p. 479–489.2009

FONTANA, D.C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, p. 87-91, 1996.

GAIDA, W. et al. Dinâmica da vegetação e uso da terra com uso do NDVI na bacia hidrográfica do Alto Jacuí. **GeoUERJ**, n. 24, v.2, p. 684-698.2012

HAN, B.P. et al. The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. **Ecological Modelling**, v.125, p.109–122. 2000.

HAVENS, K.E. et al. Nutrient dynamics and the eutrophication of shallow lakes Kasumigaura (Japan), Donghu (PR China), and Okeechobee (USA). **Environ Pollut**, v.111, p. 262–72. 2001.

HENRY, R. et al. A comparative study of thermal structure, heat content and stability of stratification in three lakes. In: **Limnological Studies on the Rio Doce Valley Lakes, Brazil** (eds. TUNDISI, J.G.; SAIJO, T.) p. 69–77. Brazilian Academy of Sciences, UFSCar, São Carlos, 1997.

HILLEBRAND, H. et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. **J. Phycol.** v.35, p. 403–424.1999.

KIMMEL, B. L; et al. Reservoir Primary Production. In: THORNTON, K. W., et al. (Eds.). **Reservoir Limnology: Ecological Perspectives**. New York: John Wiley and Sons, p. 133-193. 1990.

KOMÁREK, J.; ANAGNOSTIDIS, K. Modern approach to the classification system of cyanophytes. 2 – Chroococcales. **Algological Studies**, v. 43, p. 157-226, 1986.

KOMÁREK, J.; ANAGNOSTIDIS, K. Modern approach to the classification system of cyanophytes. 4 – Nostocales. **Algological Studies**, v. 56, p. 247-345, 1989.

KOMÁREK, J.; ANAGNOSTIDIS, K. **Nomenclatural novelties in chroococcalean cyanoprokaryotes**. Preslia, v. 67, p. 15-23, 1995.

KOMÁREK, J.; ANAGNOSTIDIS, K. Cyanoprokaryota, 1: Chroococcales. In: Ettl, H.; Gärtner, G.; Heynig, H.; Mollenhauer, D., (eds.)

Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart: Gustav Fischer. v. 19, 545p, 1999.

KOMÁREK, J.; ANAGNOSTIDIS, K. Cyanoprokaryota II, Teil Oscillatoriales. In: BÜDEL, B.; KRIENITZ, L.; GÄRTNER, G.; SCHGERL, M. (ed.) **Süßwasserflora von Mitteleuropa.** München: Elsevier GmbH, 2005.

LOBO, E.; LEIGHTON, G. Estructuras comunitarias de las fitocenosis planctónicas de los sistemas de desembocaduras de ríos y esteros de La zona central de Chile. **Rev. Biol. Mar.**, v. 22, n. 1, p. 1-29, 1986.

MACKINNEY, G. Absorption of light by chlorophyll solutions. **J Biol Chem**, v. 140, p. 315–322, 1941.

MATTHIENSEN, A.; YUNES, J.S.; CODD, G.A. Ocorrência, distribuição e toxicidade de cianobactérias no Estuário da Lagoa dos Patos, RS. **Rev. Brasil. Biol.**, v.59, n.3, p. 361-376, 1999.

MOLICA, R.J. et al. Occurrence of saxitoxins and anatoxin-a(s)-like anticholinesterase in a Brazilian drinking water supply. **Harmful Algae**. v. 4, p. 743–753. 2005.

MÜLLER, C.C.; RHAYA-RODRIGUES, M.T.; CYBIS, L.F. Adsorção em carvão ativado em pó para remoção de microcistina em água de abastecimento público. **Rev. de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.14, n. 1, p. 29-38, 2009.

NHMRC (National Health and Medical Research Council). **Guidelines for Managing Risks in Recreational Water.** Australian Government, 2008. 216p.

OLIVER, R. L.; GANF, G. G. Freshwater Blooms. In: WHITTON, B. A.; POTTS, M. (ed.) **The Ecology of Cyanobacteria: Their diversity in time and space.** Nova York: Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 150-183.

PAERL, H.W. et al. Harmful Freshwater Algal Blooms, With an Emphasis on Cyanobacteria. **The Scientific World**, v.1, p. 76-113. 2001

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.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

REVIERS, B. **Biologia e Filogenia das Algas.** Porto Alegre: Artmed, 2006. 280p.

REYNOLDS, C.S. **Vegetation Processes in Pelagic: a Model for Ecosystem Theory.** Luhe, Alemanha: Inter Research Science Center, Ecology Institute, 1997.

ROBARTS, R. D.; ZOHARY, T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. **Journal of Marine and Freshwater Research**, New Zealand, v. 21, n. 3, p. 391-399, 1987.

SCHÄFER, A. **Fundamentos de ecologia e biogeografia das águas continentais**. Porto Alegre: UFRGS, 1985. 533p.

SCHNECK, F. et al. Environmental variability drives phytoplankton assemblage persistence in a subtropical reservoir. **Austral Ecology**, v. 36, p. 839-848. 2011.

SCHOPF, J.W. The Fossil Record: Tracing the Roots of the Cyanobacterial Lineage. In: WHITTON, B.; POTTS, M (ed.) **Ecology of Cyanobacteria: Their diversity in time and space**. Nova York: Kluwer Academic Publishers, p. 13-35. 2000.

SEJNOHOVÁ, L.; MARSALÉK, B. Microcystis. In: WHITTON, B. (ed.) **Ecology of Cyanobacteria II: Their diversity in time and space**. Nova York: Springer, p. 195-228. 2012.

SIVONEM, K.; JONES, G. Cyanobacterial toxins. In: CHORUS e BARTRAM, J. (eds). **Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health – Consequences, monitoring and Management**. Londres. Spon: 42-111. 1999.

SOTERO-SANTOS, R.B. et al. Toxicity of a cyanobacterial bloom in Barra Bonita Reservoir (Middle Tietê River, São Paulo, Brazil). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.64, p. 163–170. 2006.

SOTERO-SANTOS, R.B. et al. Occurrence and toxicity of an Anabaena bloom in a tropical reservoir (Southeast Brazil). **Harmful Algae**, v. 7, p. 590-598. 2008.

SOUZA, R.C. Morfologia e Reprodução. p. 2-8. In: SANTANA, C.L. (org). **Manual Ilustrado para Identificação e Contagem de Cianobactérias Planctônicas de Águas Continentais Brasileiras**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 58p.

SPELLMAN, F.R. **The Science of water: concepts and applications**. Taylor & Francis, 2 ed. 2008. 448p.

STRECK, E. V. et al. Solos do Rio Grande do Sul. 2 ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

THOMPSON, P.A.; JAMESON, I.; BLACKBURN, S.I. The influence of light quality on akinete formation and germination in the toxic cyanobacterium *Anabaena circinalis*. **Harmful Algae**, v.8, p. 504–512. 2009.

TUNDISI, J.G. Tropical South America: presents and perspectives: In: MARGALEF, R. (ed). **Limnology now: a paradigm of planetary problems**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994.

TUNDISI, J.G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005. 248p.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

VARIS, O.; SOMLYÓDY, L. Potential Impacts of Climatic Change on Lake and Reservoir Water Quality. Laxemburg, Austria: **International Institute for Applied Systems Analysis**, 1993.

VIDAL, L. et al. Identificación. In: **Cianobacterias planctónicas del Uruguay**. p. 37-40, 2009.

VIEIRA, J.M.S. et al. Toxic cyanobacteria and microcystin concentrations in a public water supply reservoir in the Brazilian Amazonia region. **Toxicon**, v. 45 p. 901–909. 2005.

WACHHOLZ F.; PEREIRA FILHO, W. Total de sólidos em suspensão e clorofila a no contexto espaço-temporal em reservatórios em cascata no rio Jacuí. In: II SEMINÁRIO SOBRE ESTUDOS LIMNOLÓGICOS EM CLIMA SUBTROPICAL. 2., 2011, Erechim. **Anais...** Erechim: Nix Brasil Agência Digital, 2011. CD-ROM.

WACHHOLZ, F. Influência da bacia hidrográfica e características espaço-temporais de variáveis limnológicas sobre reservatórios no Rio Jacuí – RS. 2011, 197 p. (**Tese de Doutorado**). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

WALSBY, A.E. Gas Vesicles. **Microbiological Reviews**, Mar. 1994, p. 94-144.

WCD. **Dams and development: A framework for decision making**. The World Commission on Dams, 2000.

WERNER, V.R. e LAUGHINGHOUSE, H.D. Bloom-forming and other planktonic Anabaena (Cyanobacteria) morphospecies with twisted trichomes from Rio Grande do Sul State, Brazil. **Nova Hedwigia**, v. 89, p. 17-47. 2009.

WREGGE, M. S. et al. **Atlas climático da Região Sul do Brasil**: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2011, 333p.

YAMAMOTO, Y; NAKAHARA, H. Seasonal variations in the morphology of bloom-forming cyanobacteria in a eutrophic pond. **Limnology**, v. 10, p. 185–193. 2009.

YUNES, J. et al. Florações de cianobactérias tóxicas: Mãos a obra ao problema. In: ROLAND, F.; CÉZAR, D.; MARINHO, M. (Eds.). **Lições de limnologia**. São Carlos: RiMa, p. 299- 323. 2005.