

CAPÍTULO 6

HETEROGENEIDADE ESPACIAL HORIZONTAL DA QUALIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO RIO GRANDE, COMPLEXO BILLINGS, SÃO PAULO, BRASIL

Marcelo Pompêo, Pedro Kawamura, Viviane Moschini-Carlos, Sheila Cardoso da Silva, Felipe de Lucia Lobo, Patrícia do Amaral Meirinho, Marisa Dantas Bitencourt, Sergio Tadeu Meirelles

Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências, Departamento de Ecologia, R. do Matão, Trav. 14, 321, São Paulo, SP, Brasil 05508-900.

E-mail: mpompeo@ib.usp.br

RESUMO

Estudos relacionados à heterogeneidade espacial horizontal são importantes, tanto do ponto de vista ecológico quanto do ponto de vista da gestão dos recursos hídricos. Ao identificar áreas mais impactadas ou eutrofizadas, é possível melhor direcionar os esforços de monitoramento e manejo para as áreas mais críticas. O intuito deste trabalho foi verificar se há heterogeneidade espacial horizontal nas águas superficiais do reservatório Rio Grande (Complexo Billings, São Paulo, Brasil). As coletas foram efetuadas em 59 pontos distribuídos ao longo do reservatório e avaliados a profundidade da lâmina de água e do disco de Secchi, temperatura, pH, condutividade elétrica, os teores de oxigênio dissolvido, nitrito, nitrato, ortofosfato, clorofila *a*, feofitina, sólidos totais e sólidos suspensos. Os dados foram analisados por meio de Análise de Componentes Principais e dendrograma. Com base nas variáveis levantadas e no índice do estado trófico (IET), foi possível identificar três grandes compartimentos no braço Rio Grande: 1) um compartimento localizado na parte alta do reservatório, com características de zona de rio, com maiores valores de condutividade elétrica e níveis intermediários de trofia; 2) um segundo compartimento, com características de zona de transição, associado aos maiores valores de clorofila *a*, material em suspensão, feofitina, saturação de oxigênio dissolvido e maiores valores do IET; e 3) um compartimento com características de zona lacustre e tendência de baixos valores de IET, quando mais próximo à barragem. Este padrão pode ser explicado pela entrada de nutrientes, proveniente do lançamento de esgotos *in natura* das cidades vizinhas, e pelo manejo do sistema. Os dados também sugerem que a condição oligotrófica observada, particularmente próximo à zona da barragem, é artificialmente mantida, decorrente das regulares aplicações de algicidas para o controle do crescimento de organismos fitoplanctônicos.

1 INTRODUÇÃO

Cerca de 3/4 da superfície terrestre é coberta por água, sendo 97% de água salgada e apenas 3% de água doce. Do total de água doce existente, a maior parte encontra-se sob a forma de gelo nas calotas polares e geleiras, parte é gasosa e parte é líquida - representada pelas fontes subterrâneas e superficiais. Já os rios e lagos, que são nossas principais formas de abastecimento, correspondem a apenas 0,01% desse percentual, aproximadamente (TUNDISI, 2003).

A crescente expansão demográfica e industrial observada nas últimas décadas trouxe como consequência o comprometimento das águas dos rios, lagos e reservatórios e hoje o lançamento de esgotos domésticos *in natura*, ou coletado e não tratado, é uma das principais causas da poluição das águas no Estado de São Paulo (CETESB, 2013).

A poluição das águas é gerada por efluentes domésticos contendo poluentes orgânicos biodegradáveis, nutrientes e bactérias, por exemplo; efluentes industriais (poluentes orgânicos e inorgânicos, dependendo da atividade industrial); carga difusa urbana e agrícola (poluentes advindos da drenagem destas áreas: fertilizantes, defensivos agrícolas, fezes de animais e material em suspensão). A eutrofização, entendida como processo de enriquecimento com nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, gera problemas que comprometem a qualidade do corpo d'água, como aumento excessivo da produtividade primária; grande consumo de O₂ para decompor a matéria orgânica; floração de algas tóxicas; alteração do odor e do sabor da água; aumento nos custos de tratamento para fins de abastecimento. Nos países em desenvolvimento, esse problema tem sido agravado pela carência de recursos financeiros, o que impossibilita a aplicação de medidas corretivas para reverter este quadro (THORTON et al., 1990; TUNDISI, 2003).

Reservatórios são corpos de água doce artificiais, com volumes maiores do que um milhão de metros cúbicos (STRASKRABA; TUNDISI, 1999). Suas características dependem das condições e da localização da bacia hidrográfica, do tipo de uso a que são destinados, da profundidade e do tempo de retenção.

Em geral, os reservatórios são criados para múltiplas finalidades, sendo que a maioria delas inclui a retirada de água para diversos fins (geração de eletricidade, abastecimento público, etc), gerando variações de fluxo e de volume. A influência dessas variações na qualidade da água depende tanto da quantidade quanto da profundidade em que é feita essa retirada de água.

Atualmente, tendo em vista a crise da água decorrente da escassez gerada pelo aumento da demanda pela população, quadro agravado pelo mau uso feito pelo homem, gerando a degradação do meio aquático, faz-se emergencial uma melhoria da gestão sobre esse recurso. Para tal, é importante o desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de utilização, captação, armazenamento, tratamento e recuperação de nossos mananciais e, é claro, o monitoramento da sua qualidade, que é importante etapa nesse processo. Índices de qualidade, que tomam como bases aspectos físicos, químicos e biológicos são úteis para essa finalidade.

O objetivo deste estudo foi verificar a compartimentação do braço Rio Grande, reservatório do complexo Billings (São Paulo, Brasil), com ênfase na qualidade da água superficial, em particular do índice do estado trófico. Estudos relacionados à heterogeneidade espacial horizontal são importantes, tanto do ponto de vista ecológico quanto da gestão dos recursos hídricos. Do ponto de vista ecológico a observação da existência de heterogeneidade espacial horizontal permite melhor compreender aspectos da estrutura, funcionamento e dinâmica dos ecossistemas aquáticos. Ao identificar áreas mais impactadas ou eutrofizadas, do ponto de vista da gestão, é possível melhor direcionar os esforços de monitoramento e manejo para as áreas mais críticas.

2 O RESERVATÓRIO BILLINGS

O reservatório Billings localiza-se a oeste da cidade de São Paulo (São Paulo State, Brazil), a 23° 47' S e 46° e 40' W, e a uma altitude de 746 m, abrangendo áreas dos municípios de São Paulo, Santo André, São Bernardo do Campo, Diadema, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra (Figura 1). A bacia de drenagem do Complexo Billings apresenta 560 km², sendo São Bernardo do Campo o município com maior área dentro da bacia (CETESB, 1996).

Com uma área de cerca de 120 km² e um volume estimado em 1,20x10⁹ m³, o reservatório foi idealizado pelo engenheiro americano Asa Billings em 1927, com finalidade de aproveitar as águas do Alto Tietê para geração de energia elétrica nas usinas de Cubatão (CETESB, 2002). Hoje os usos de suas águas incluem abastecimento público e industrial, recepção de efluentes domésticos e industriais, geração de energia, pesca, irrigação e recreação.

Morfologicamente, o reservatório Billings apresenta um corpo central alongado e estreito, ligado a diversos braços, alguns de grande volume (Figura 1). Em função dessa formação, o afluxo de água dá-se preferencialmente ao longo do seu canal central. Isso faz com que a maior parte do volume de água presente nos braços, fique parcialmente isolada do corpo central na maior parte do tempo (CETESB, 2002), o que permite a formação de compartimentos com diferenças na qualidade de suas águas (WENGRAT; BICUDO, 2011; CARDOSO-SILVA et al., 2014).

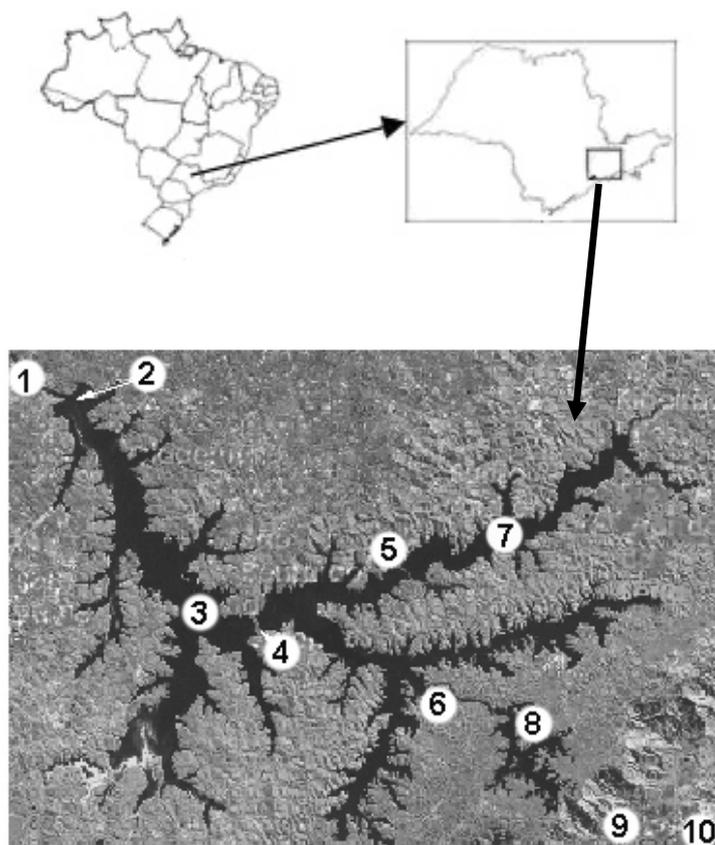


Figura 1: Bacia hidrográfica do complexo Billings. 1 – rio Pinheiros, 2 – estação elevatório de Pedreira, 3 – corpo central; 4 – Via Imigrantes; 5 – Via Anchieta; 6 – Summit Control; 7 – braço Rio Grande; 8 – reservatório Rio das Pedras; 9 – Henry Borden e ETA Cubatão, 10 – cidade de Cubatão.

A bacia hidrográfica do reservatório Billings é caracterizada pela presença de intensas atividades humanas, somado à maior densidade populacional do Estado, englobando a maior área metropolitana brasileira. Também possui uma das zonas industriais mais importantes da América Latina, o que justifica seu crescimento demográfico quase exponencial, resultante de movimentos migratórios. Apesar das condições físicas desfavoráveis (relevo acidentado, várzeas e fundos de vales), que acabam ocasionando problemas como escorregamento, erosão e assoreamento, a ocupação da área veio se acelerando (CETESB, 2002).

Não sendo as águas da represa Billings suficientes para alimentar a usina Hidrelétrica Henry Borden, por volta de 1950 as águas do rio Pinheiros foram revertidas para suprir esse déficit. O rio Pinheiros é utilizado como diluente de esgotos e em sua bacia de drenagem habitam cerca de seis milhões de pessoas, contribuindo com cerca de 280 ton/dia de esgotos. Com a ampliação da rede de coleta e de tratamento dos esgotos suas águas têm melhorado paulatinamente, no entanto, mantendo

o rio na Classe 4 (MAGALHÃES, 1992, apud KAKINAMI et al., 2004), a pior qualidade das águas segundo a legislação brasileira, a resolução Conama 357, de 2005. Com a grande entrada dessa carga de poluentes domésticos e industriais provenientes da cidade de São Paulo e a ocupação desordenada de sua bacia hidrográfica, proporcionaram um contínuo processo de degradação do reservatório Billings.

Visando reverter esse quadro, em atendimento à Resolução Conjunta SMA/SES nº 3, de 04/09/92, que autoriza o bombeamento das águas do canal do rio Pinheiros em condições específicas (em situação de risco de enchentes na Região Metropolitana de São Paulo), desde 1992 menor volume de água proveniente do rio Pinheiros foi bombeado na Usina Elevatória de Pedreira, para o corpo central. Este fato propiciou nos anos seguintes melhoria na qualidade das águas do Complexo Billings. Em 2001, no trecho próximo ao rio Pinheiros, o índice da qualidade da água da Billings recebeu média 66, equivalente ao conceito "Bom" (CETESB, 2002). Segundo a CETESB, hoje o maior problema do reservatório é o excesso de matéria orgânica despejada por meio do esgoto clandestino.

3 O BRAÇO RIO GRANDE

O braço Rio Grande abrange os municípios de São Bernardo do Campo, Santo André, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra (Figura 2). Apresenta um espelho de água com aproximadamente de 7,2 km² de área superficial e cerca de 10 km de extensão. Na porção inferior do braço, próximo à Via Anchieta, a SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, da Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento, do Estado de São Paulo) possui uma estação de captação de água para abastecimento público servindo a aproximadamente 1,2 milhões de habitantes.

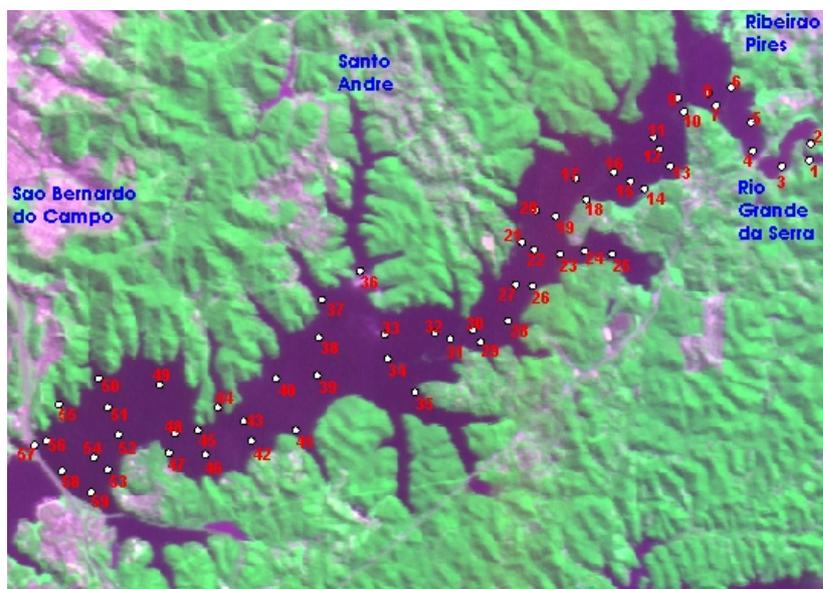


Figura 2: Localização dos pontos de coleta no braço Rio Grande, com a localização dos municípios de São Bernardo do Campo, Santo André, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra. Imagem CBERS 2.

Segundo Maier (1985), o braço Rio Grande é um ambiente eutrófico, com estratificação diurna e pouco profunda, de comportamento polimítico, possibilitando a ressuspensão de nutrientes e do material presente no sedimento.

Até 1981 este compartimento da Billings era ligado diretamente ao seu braço central. Dados fluviométricos da antiga empresa Light Serviços de Eletricidade S/A mostraram que, antes de 1981, havia um fluxo da água na época de chuva do braço central da Billings em direção ao reservatório Rio Grande, carregando a carga poluidora para este último, o que era revertido no período de seca.

Apesar disso, Kawai et al., (1976) concluíram que havia uma melhora das condições sanitárias no período de chuva, por diluição da matéria orgânica.

Visando preservar a qualidade da água, em dezembro de 1981 foi interrompida a descarga do corpo central em direção ao braço Rio Grande pela construção de uma barragem sob a rodovia Anchieta. Esta barragem separou completamente o braço do corpo central da Billings. Desde então, a região do entorno do braço Rio Grande tornou-se a sua única fonte de alimentação. Segundo Meirinho e Pompêo (2015, ver Capítulo 4 deste livro), com a separação do braço Rio Grande do restante da represa Billings, inicialmente foi observada mudança na composição do zooplâncton, indicando melhora na qualidade da água após o isolamento, porém, estudos recentes realizados após muitos anos do isolamento mostraram uma piora na qualidade da água, atribuída ao contínuo recebimento de cargas poluidoras à montante.

Esta grande carga de matéria orgânica potencializou o crescimento fitoplanctônico e, de forma a reduzir o crescimento de algas potencialmente tóxicas, particularmente cianobactérias, a SABESP faz regulares aplicações de sulfato de cobre e de peróxido de hidrogênio, principalmente na porção inferior do braço (CALEFFI, 2000; CETESB, 2008)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em 7/07/2004, e teve as coletas iniciadas às 9h30min e finalizadas às 14h30min. Durante este intervalo de tempo, num gradiente montante-jusante, foram tomadas 59 amostras de água superficial no braço Rio Grande, sendo que as primeiras amostras foram tomadas na porção rio do reservatório e as últimas na zona da barragem, próximo à estação de captação de água da Sabesp (Figura 2). Em cada ponto foram tomadas coordenadas geográficas (GPS GARMIN 72, UTM Sad 69), medida a profundidade do disco de Secchi, temperatura (T), condutividade elétrica (CE) e pH (sonda YSI mod. 63). Em cada estação de coleta também foram tomadas amostras de água para determinações de oxigênio dissolvido (OD) (método Winkler, Segundo GOLTERMAN et al., 1978) e porcentagem de saturação de OD, sólidos totais (ST) (uma alíquota de 200 ml da água bruta foi seca a 105 °C, até peso constante), e sólidos em suspensão (SS) (TEIXEIRA et al., 1965; TUNDISI, 1969). As concentrações de nutrientes foram determinadas de acordo com Mackereth et al., (1978) – nitrato e nitrito; Strickland; Parsons (1960) – ortofosfato. Foi utilizada acetona 90% como solvente na determinação dos teores de pigmentos fotossintéticos e a equação segundo Lorenzen (1967). Para as concentrações de nutrientes dissolvidos, pigmentos e material em suspensão foram empregados filtros Whatman GF/C e as absorvâncias lidas em espectrofotômetro Micronal B572.

Durante o período de coleta, após a estação número 30, foi observada uma embarcação da Sabesp, que fazia aplicações de sulfato de cobre pentahidratado, para o controle do crescimento fitoplanctônico.

Para verificar quais os principais fatores que determinaram os compartimentos eventualmente formados, foram realizadas análise de componentes principais (ACP) e um dendrograma (Pielou, 1984), utilizando o software Past (HAMMER et al., 2001), com uso de *row color/symbols*, *convex hulls* e *filled regions*.

Como as variáveis analisadas são de diferentes naturezas, com escalas de variação e unidades diferentes, não comparáveis, foi efetuada padronização dos dados (PIELOU, 1984), pelo método de *ranging*, ou seja, pela razão entre as diferenças dos valores brutos menos o valor mínimo, sobre o valor máximo menos o valor mínimo de cada variável.

Após análise preliminar com todo o conjunto de variáveis levantadas, ficou evidenciado que diversas delas tinham correlações muito altas. Entre essas variáveis altamente correlacionadas, algumas foram excluídas da análise. Dessa forma, chegou-se a uma análise final com a inclusão apenas das variáveis saturação de oxigênio dissolvido (Sat), condutividade elétrica (CE), pH, feofitina (Feo), clorofila *a* (Chl-*a*) e sólidos em suspensão (SS).

Foi calculado o Índice de Estado Trófico (IET) de Carlson (1977), empregando os valores de disco de Secchi e clorofila *a* e estabelecidos os seguintes limites: ultra-oligotrófico: 20,

oligotrófico: 21 a 40, mesotrófico: 41 a 50, eutrófico: 51 a 60; e hipereutrófico 61 (KRATZER; BREZONICK, 1981).

5 RESULTADOS

A amplitude de variação, valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação das variáveis medidas nos 59 pontos amostrados são apresentados na Tabela 1. Para ortofosfato os teores determinados apresentaram-se abaixo do limite de detecção do método (10 µg/l). No espelho de água, foi constatada situação geral de supersaturação de oxigênio dissolvido.

A análise de regressão linear simples mostrou correlações entre as diversas variáveis analisadas (Tabela 2). A elevada correlação entre SS e clorofila *a* sugere que a maior parte da fração do SS é composta por matéria orgânica. A correlação negativa entre o DS e os teores de clorofila *a* e SS também corrobora esta afirmação. Os baixos valores de SS, quando comparados com ST, sugerem elevados teores de íons, corroborado pela correlação positiva entre CE e ST. A correlação positiva entre nitrato e nitrito e clorofila *a* sugere que o nitrogênio é importante controlador do crescimento fitoplanctônico.

Neste trabalho foi observado incremento da temperatura associado à hora de coleta de cada ponto (Figura 3), condicionado pela insolação no decorrer do dia. Esse aumento relaciona-se com a forma como a coleta foi realizada, desta maneira a temperatura foi excluída das análises estatísticas.

O dendrograma da Figura 4 sugere a formação de quatro compartimentos no braço Rio Grande. O primeiro compartimento é formado pelos pontos 1 a 3, o segundo pelos pontos 4 a 13, o terceiro pelos pontos 14 a 31 e o último composto pelos pontos 32 a 59.

Na ACP (Figura 5) os *convex hulls* e *filled regions* foram organizados com base nos grupamentos observados no dendrograma. O eixo 1 explica 39,3% enquanto o eixo 2 explica 28,9%.

Tabela 1: Valores mínimos, máximos, média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) dos teores de oxigênio dissolvido (OD), porcentagem de saturação de oxigênio (%OD), temperatura (T), potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), profundidade do disco de Secchi (DS), sólidos em suspensão (SS), sólidos totais (ST), clorofila *a* (Chl-*a*), feofitina (Feo), nitrito e nitrato

	OD	OD%	T	pH	CE	DS	SS	ST	Chl- <i>a</i>	Feo	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
	mg/l	%	C		µC/cm	m	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
mínimo	6,08	74,07	18,50	7,36	201,90	0,78	1,88	97,50	1,93	1,17	4,14	184,74
máximo	11,58	139,16	21,00	9,05	434,70	2,83	6,63	249,50	10,91	181,56	70,28	575,78
média	9,33	112,50	19,79	8,40	224,91	1,72	3,95	136,34	5,69	102,57	25,58	287,53
DP	0,97	11,64	0,57	0,46	41,41	0,56	1,29	27,38	3,13	40,71	19,38	103,02
CV	10,39	10,35	2,90	5,41	18,41	32,39	32,73	20,09	54,99	39,69	75,77	35,83

Tabela 2: Matrix de correlação de oxigênio dissolvido (OD), porcentagem de saturação de oxigênio (%OD), temperatura (T), potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), profundidade do disco de Secchi (DS), sólidos em suspensão (SS), sólidos totais (ST), clorofila *a* (Chl-*a*), feofitina (Pheo), nitrito e nitrato. Correlações acima de 0,25 (*em itálico*) são significativas a $p < 0,05$ - N=59

	OD	OD%	T	pH	CE	DS	SS	ST	Chl- <i>a</i>	Feo	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
	mg/l	%	C		µS/cm	m	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
DO%	<i>0,99</i>	1										
T	-0,11	0,00	1									
pH	<i>0,30</i>	<i>0,36</i>	<i>0,57</i>	1								
EC	-0,06	-0,07	-0,12	<i>-0,44</i>	1							
SD	-0,32	-0,24	<i>0,78</i>	<i>0,28</i>	-0,16	1						
TSS	<i>0,38</i>	<i>0,31</i>	<i>-0,65</i>	-0,05	-0,06	<i>-0,85</i>	1					
TS	-0,04	-0,06	-0,20	<i>-0,42</i>	<i>0,83</i>	<i>-0,26</i>	0,06	1				
Chl- <i>a</i>	<i>0,45</i>	<i>0,38</i>	<i>-0,69</i>	-0,02	-0,15	<i>-0,86</i>	<i>0,90</i>	0,03	1			
Feo	0,08	0,02	<i>-0,55</i>	<i>-0,39</i>	0,07	<i>-0,49</i>	<i>0,38</i>	0,12	<i>0,46</i>	1		
N-NO ₂ ⁻	<i>0,45</i>	<i>0,38</i>	<i>-0,69</i>	-0,09	-0,07	<i>-0,85</i>	<i>0,88</i>	0,11	<i>0,89</i>	<i>0,50</i>	1	
N-NO ₃ ⁻	<i>0,43</i>	<i>0,38</i>	<i>-0,53</i>	-0,07	-0,10	<i>-0,62</i>	<i>0,65</i>	0,04	<i>0,69</i>	<i>0,52</i>	<i>0,88</i>	1

Os pontos 1, 2 e 3, observados na ACP e dendrograma, são determinados pela maior condutividade elétrica, relacionada com o teor de íons em suspensão. Por serem tão distintos dos demais pontos podem ser representativos da zona de rio. Já a zona compreendida entre os pontos 4 a 13 está associada aos maiores valores de feofitina, principalmente, enquanto que os pontos 14 a 31

estão associados à saturação de oxigênio dissolvido, clorofila *a*, e material em suspensão, principalmente. Independente dessa diferenciação, os pontos 4 a 31 compreendem um grande compartimento, sendo a porção com maiores valores dos índices de estado trófico (Figura 6).

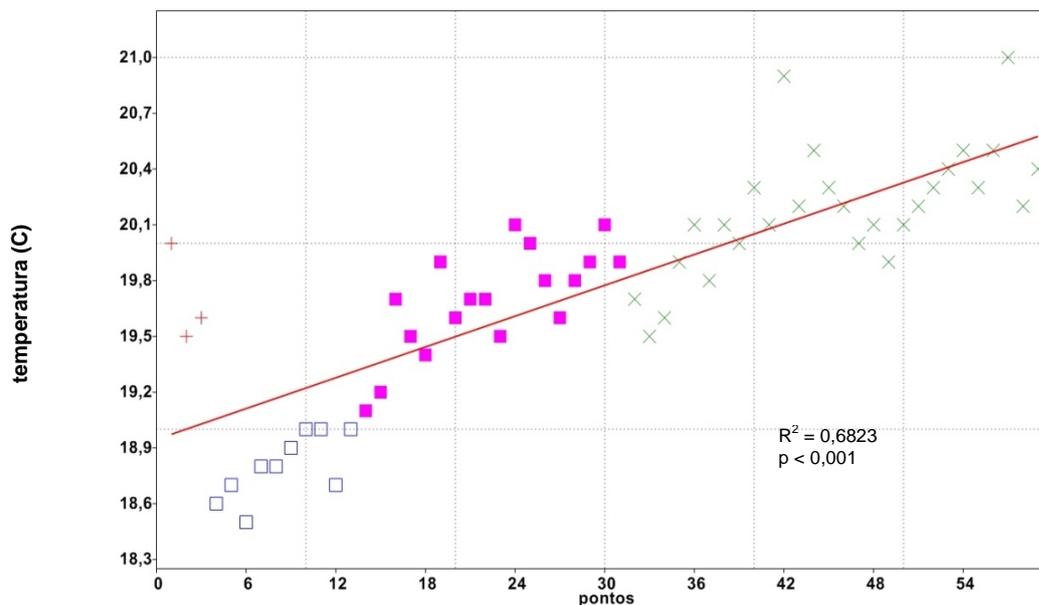


Figura 3: Temperatura da água nos 59 pontos de coleta no braço Rio Grande, do reservatório Billings. + - pontos 1 a 3; □ - pontos 4 a 13; ■ - pontos de 14 a 31; X – pontos 32 a 59. Curva de tendência linear. N = 59.

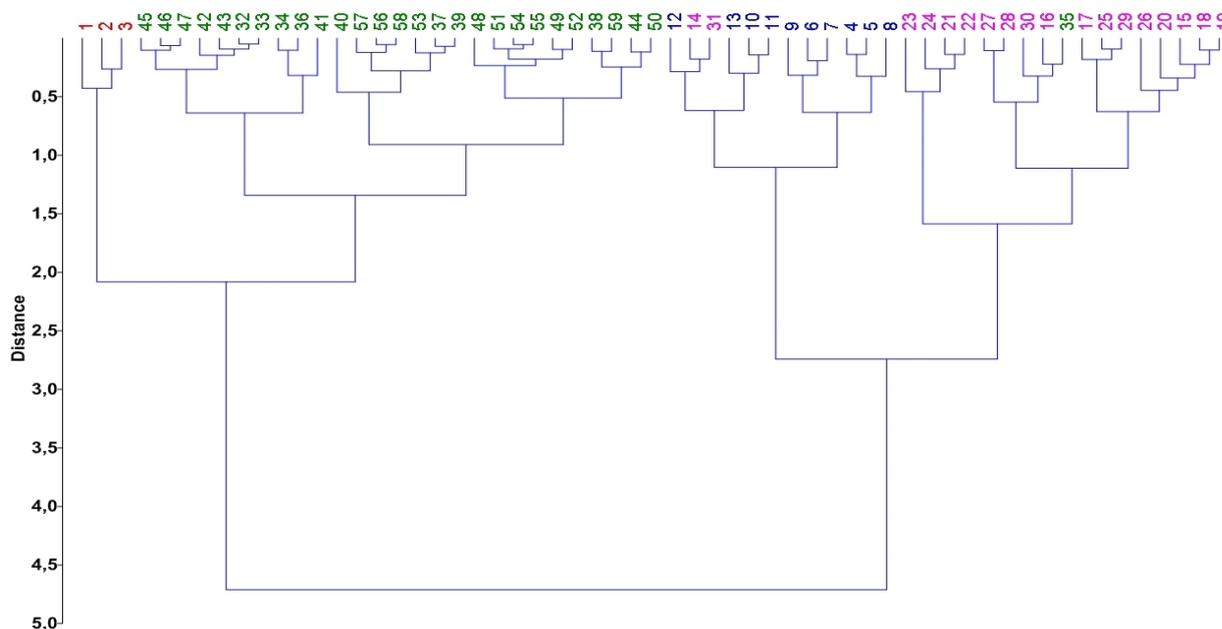


Figura 4: Dendrograma (método de Ward e distância euclidiana) com dados de porcentagem de saturação de oxigênio, potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, material em suspensão, clorofila *a* e feofitina, determinados em 59 estações de coleta no braço Rio Grande (Complexo Billings). vermelho - pontos 1 a 3; azul - pontos 4 a 13; rosa - pontos de 14 a 31; verde – pontos 32 a 59.

A porção compreendida pelos pontos 32 a 59 está associada aos menores valores de clorofila *a*, material em suspensão e saturação de oxigênio dissolvido, provavelmente reflexo da aplicação do algicida sulfato de cobre pentahidratado, observado após o ponto 30.

Ocorreram gradientes em outras variáveis. Porém, paralelamente ao incremento da temperatura, estando em geral bem correlacionados com ela (Tabela 2), sendo DS e pH positivamente relacionados; já clorofila *a*, nitrito e feofitina estão negativamente relacionados. Por

consequente, também foram preteridos na visualização da distribuição dos pontos no gráfico da ACP.

Nesse sentido, houve um prejuízo no alcance da capacidade explicativa através do gráfico da ACP, com o possível mascaramento da influência de outros gradientes, devido ao incremento da temperatura, observado ao longo do dia, decorrente da coleta ter ocorrido no sentido montante – jusante.

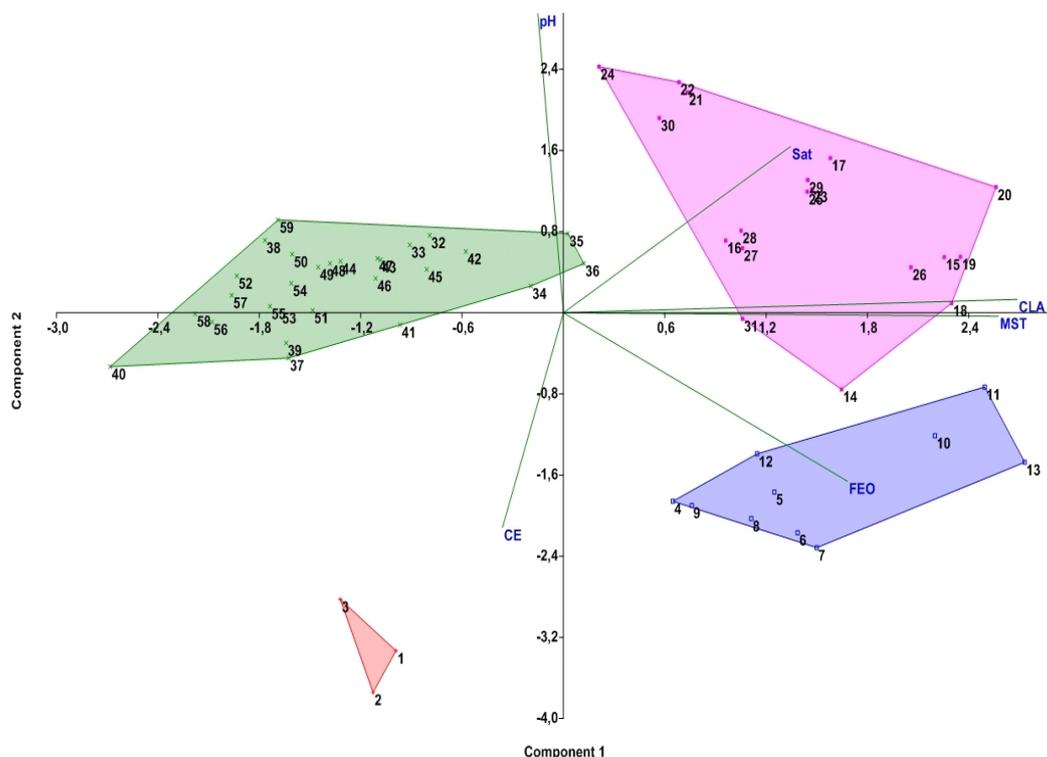


Figura 5: Análise de Componentes Principais formado pelos eixos 1 e 2. Sat: porcentagem de saturação de oxigênio, pH: potencial hidrogeniônico, CE: condutividade elétrica, MST: material em suspensão, CLA: clorofila *a*, FEO: feofitina, determinados em 59 estações de coleta no braço Rio Grande (Complexo Billings). + - pontos 1 a 3; □ - pontos 4 a 13; ■ - pontos de 14 a 31; X – pontos 32 a 59.

O cálculo do índice do estado trófico de Carlson (IET) resultou em valores que variaram da categoria oligotrófica a eutrófica, de maneira geral, com maiores valores para clorofila *a* (Chl-*a*) do que para o disco de Secchi (DS) (Tabela 3, Figura 6). Com base no valor médio o braço Rio Grande pode ser considerado eutrófico para o IETDS e mesotrófico quando considerado o IETChl-*a*. No entanto, também para o IET, é possível observar compartimentos (Figura 6). Os pontos de 1 a 3 representam os menores níveis de trofia, enquanto que a porção compreendida entre os pontos 4 a 31 pode ser considerada a porção mais enriquecida do braço Rio Grande. Após o ponto 32 observamos redução nos valores de IET e, próximo à barragem, há tendência de oligotrofia.

6 DISCUSSÃO

A temperatura está muito relacionada com o metabolismo do ambiente aquático devendo sempre ser considerada nos estudos ecológicos. Para evitar o efeito do aumento da temperatura da água ao longo do tempo de coleta, como verificado neste trabalho, a aleatorização da ordem dos pontos coletados não permitiria o padrão sistemático de incremento da temperatura, como observado. Porém, num reservatório amplo como o braço Rio Grande, para evitar este efeito, seriam necessárias diversas equipes trabalhando simultaneamente, o que levanta o problema dos recursos financeiros e humanos. Outra possibilidade seria a obtenção de menor quantidade de pontos, o que minimizaria o tempo de coleta. No entanto, provavelmente, ocorreria perda no detalhamento do

presente trabalho. Assim, a relação número de pontos / tempo de duração da coleta, deve ser analisada em cada caso.

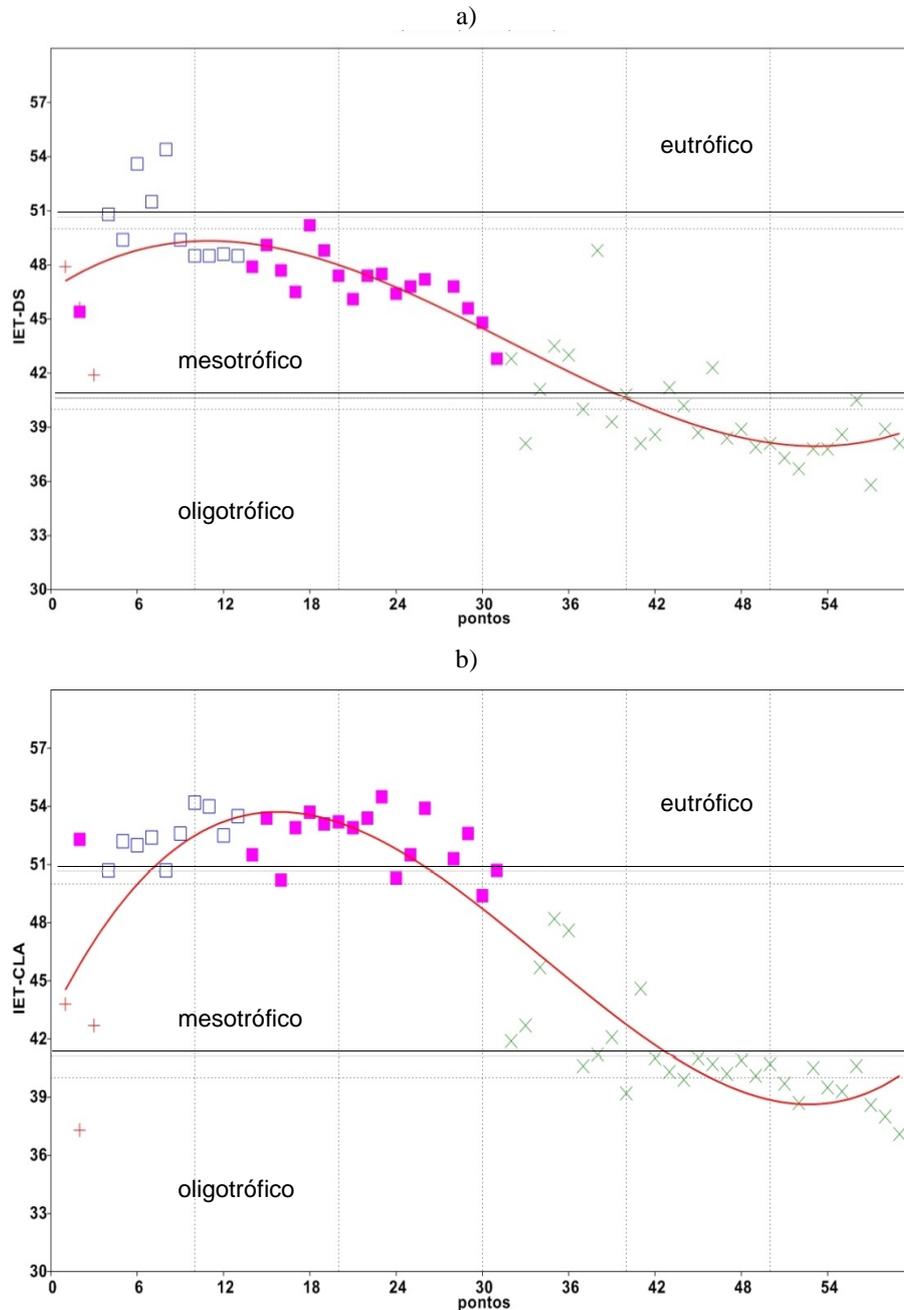


Figura 6: Índice do estado trófico (IET) para disco de Secchi (DS) (a) e clorofila *a* (CLA) (b) nos distintos pontos de coleta e respectivos limites para oligotrofia, mesotrofia e eutrofia. As curvas de tendência são uma polinomial de terceira ordem. As cores dos pontos são as mesmas representadas no dendrograma e ACP. + - pontos 1 a 3; □ - pontos 4 a 13; ■ - pontos de 14 a 31; X - pontos 32 a 59.

Ecologicamente reservatórios são sistemas de transição entre rios e lagos, com mecanismos de funcionamento específicos, dependentes da bacia e dos usos do sistema. Suas características morfológicas e sua posição na bacia hidrográfica fazem com que funcione como um acumulador de informações processadas ao longo de sua bacia hidrográfica. Essas informações são decodificadas pelas comunidades biológicas, refletidas por alterações na composição fito e zooplânctônica (TUNDISI, 1985). O reservatório torna-se então um "coletor de eventos" e um "vaso de reação", refletindo as modificações ocorridas na sua bacia (TUNDISI, op. cit.). Portanto, o reservatório é depositário de todos os eventos presentes e passados na sua bacia de drenagem, e a

dinâmica, a estrutura, o funcionamento e a caracterização do ecossistema aquático, em parte, repousa sob a influência externa (HENRY, 1990).

Tabela 3: Valores mínimos, máximos, médios, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) dos Índices de Estados Tróficos de Carlson (IET) para disco de Secchi (DS) e clorofila *a* (Chl-*a*)

	IETDS	IETChl-a
mínimo	36	37
máximo	54	55
média	44	46
DP	4,88	6,03
CV	11,13	12,99

Além da influência alóctone os reservatórios apresentam dinâmica própria, reflexo do seu tempo de residência, morfometria e profundidade (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008). Reservatórios menores também devem ser mais influenciados por fatores externos do que reservatórios de maior área e volume. Em reservatórios menores eventos externos de menor magnitude devem proporcionar maiores alterações nas características físicas, químicas e biológicas da massa d'água do que esse mesmo evento atuando em reservatórios maiores. Assim, os reservatórios apresentam dinâmica que reflete tanto a influência de fatores externos como internos.

Uma característica significativa do reservatório é a existência de gradientes horizontais e verticais e de um contínuo fluxo de água em direção à zona da barragem, no caso em questão, em direção à porção inferior do braço Rio Grande, próximo à captação de água para abastecimento público pela SABESP. Esses gradientes apresentam variações temporais que dependem do fluxo de água para o reservatório e das diferenças de nível que ocorrem durante as diversas épocas do ano (IMBERG, 1985, apud TUNDISI, 1985).

Devido à sua posição na bacia de drenagem, os reservatórios podem receber água através do escoamento superficial, mas a maior parte da água, nutrientes e a carga de sedimento são provenientes de um ou dois tributários principais localizados a considerável distância da barragem (THORTON et al., 1990). Desta forma, ao longo do gradiente horizontal em direção à barragem, três compartimentos hipotéticos podem ser considerados apresentando características físicas, químicas e biológicas distintas: as zonas de rio, de transição e lacustre (THORTON et al., op. cit.).

A zona de rio é relativamente estreita, bem misturada e as forças advectivas auxiliam no transporte de significativas quantidades de fino material particulado, como silte e argila (THORTON et al., 1990). A penetração da luz também é reduzida e geralmente limita os produtores primários. Sendo rasa e bem misturada essa zona apresenta-se mais bem oxigenada, embora a degradação de compostos orgânicos alóctones represente significativa demanda de oxigênio. Na zona de transição, há aumento da sedimentação com subsequente elevação da penetração da luz e é considerada a porção de maior produtividade primária. A zona lacustre apresenta funcionamento semelhante aos lagos, com baixa sedimentação de partículas inorgânicas e suficiente penetração da luz, mas menor produtividade primária, quando comparado com a zona de transição (THORTON et al., op. cit.).

No reservatório Rio Grande seus dois principais tributários estão localizados na porção superior desse braço. Desta forma, o fluxo da massa de água segue o sentido da porção superior para a inferior do braço. A captação de água para abastecimento público na porção inferior somado ao eventual bombeamento para o corpo central do reservatório, na região do Riacho Grande, em períodos de elevada precipitação pluviométrica, como observado no mês de maio de 2005, também reforçam o gradiente montante – jusante.

Desta forma, neste trabalho foi possível observar a formação de distintos compartimentos ao longo do braço Rio Grande. A parte alta apresenta características de zona de rio, a porção intermediária tem características de zona de transição e a porção inferior do braço apresenta características lacustres. Os dados também sugerem a compartimentação em relação à trofia do ambiente. Com base no IET a porção superior, pontos 1, 2 e 3, apresenta valores de trofia mais

baixos do que a região de transição, a porção compreendida entre os pontos 4 a 31, apresentando os maiores valores de trofia do sistema. Já os menores valores de trofia foram observados em direção à barragem. Este padrão pode ser explicado pela entrada de nutrientes proveniente do lançamento de esgotos *in natura* originários das cidades de Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra e pelo manejo do sistema, através da aplicação de algicidas. Visando controlar o crescimento fitoplanctônico, particularmente de cianobactérias, dois produtos vêm sendo rotineiramente utilizados como algicidas. Um deles é o sulfato de cobre pentahidratado e o outro o peróxido de hidrogênio. Assim, os menores teores de clorofila *a* observados na porção inferior do reservatório, particularmente nos pontos 32 a 59, neste trabalho podem ser atribuídos ao controle do crescimento de organismos fitoplanctônicos, como sugerido por Nishimura (2008), que comparou o fitoplâncton dos braços Rio Grande e Taquacetuba, outro importante braço do reservatório Billings. Portanto, de modo artificial, a porção inferior do braço Rio Grande apresenta água de melhor qualidade, sob o ponto de vista da trofia e dos teores de clorofila *a*, quando comparado com a porção acima. Caso fossem suspensas as rotineiras aplicações de algicidas os níveis de trofia na porção próxima à barragem provavelmente seriam superiores aos valores observados.

Em trabalho complementar, com a amostragem em perfil em 6 pontos do braço Rio Grande (POMPÊO et al., dados não publicados), os resultados levantados também sugerem heterogeneidade espacial, refletindo na melhoria da qualidade da água em direção a porção inferior do braço. Maier (1985), ao realizar estudo em três pontos de coleta ao longo do eixo maior do reservatório Rio Grande, também observou melhoria na qualidade de água na direção nascente-barragem.

Trabalhos mais recentes demonstraram marcado gradiente no teor de cobre no sedimento do braço Rio Grande, com significativo aumento nas concentrações no sentido montante - jusante (Figura 7) com o aumento da profundidade do braço Rio Grande (MARIANI; POMPÊO, 2008), enquanto que sugerem menores valores de clorofila *a* na água superficial (MEIRINHO, 2010), corroborando os dados levantados neste estudo. No caso do sedimento, semelhante gradiente no sentido montante- jusante foi observado nos teores de cobre no sedimento do reservatório do Guarapiranga (POMPÊO et al., 2013), também rotineiramente manejado com aplicações de sulfato de cobre e peróxido de hidrogênio.

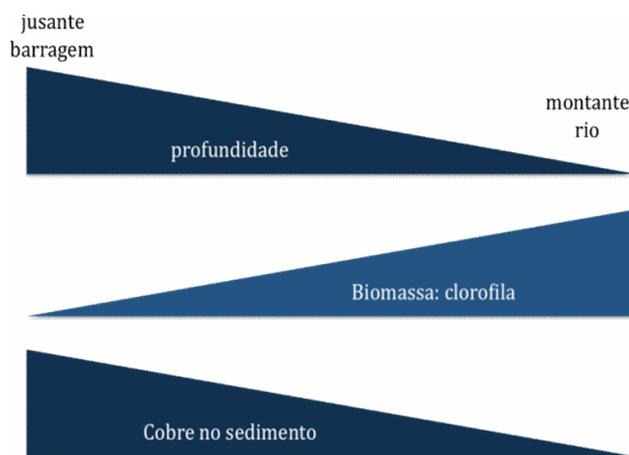


Figura 7: Gradiente esquemático da profundidade e das concentrações de clorofila e cobre no sedimento no sentido montante – jusante do braço Rio Grande.

Como observado neste trabalho, há marcado gradiente nas características físicas, químicas e de trofia, ao longo do gradiente montante – jusante no braço Rio Grande. Este gradiente permite observar zonas com características semelhantes, o que sugere a existência de compartimentos no braço, um na parte alta, outro próximo à barragem e um compartimento intermediário. Outros trabalhos executados neste braço também sugerem a existência de gradiente no sentido montante - jusante, particularmente ao observar o zooplâncton (MEIRINHO, 2010; MEIRINHO; POMPÊO, 2015, ver Capítulo 4 deste livro), e os teores de metais no sedimento, em especial para o cobre

(MARIANI; POMPÊO, 2008). Para reservatórios brasileiros também foram observados marcados gradientes montante - jusante para larvas de peixes (KIPPER et al., 2011), para desmídias perifíticas (FELISBERTO; RODRIGUES, 2005) e para macrófitas aquáticas (MOURA JÚNIOR et al., 2011), por exemplo, gradientes estes relacionados às zonas de rio, de transição e lacustre, conforme definido por Thorton et al., (1990). No entanto, neste trabalho não podemos atribuir o gradiente observado apenas às zonas definidas por Thorton et al., (1990). Os dados sugerem que a condição oligotrófica observada, particularmente na última porção do braço, próximo à zona da barragem, é artificialmente mantida, em decorrência das regulares aplicações de algicidas para o controle do crescimento de organismos fitoplanctônicos. É preciso que medidas efetivas sejam tomadas para que haja redução na entrada de nutrientes neste ecossistema, através do controle dos assentamentos urbanos na região (fontes difusas) e medidas apropriadas de saneamento básico, com efetiva coleta e tratamento de águas servidas (fontes pontuais). As efetivações destas medidas permitiriam reduzir os efeitos da eutrofização, em particular o crescimento fitoplactônico, e também permitiriam reduzir ou cessar por completo as rotineiras aplicações de algicidas no braço.

AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processos 2002/13376-4 e 2006/51705-0) e ao Departamento de Ecologia, Instituto de Biologia, Universidade de São Paulo, pelas facilidades oferecidas.

REFERÊNCIAS

- CALEFFI, S. Impacto do uso de sulfato de cobre sobre o zooplâncton na Represa Guarapiranga. In: ESPÍNDOLA, E. L. G.; PASCHOAL, C. M. R. B.; ROCHA, O.; BOHRER, M. B. C.; OLIVEIRA NETO, A. L. (Eds.). **Ecotoxicologia: perspectivas para o Século XXI**. São Carlos: RiMa, 2000.
- CARDOSO-SILVA, S.; NISHIMURA, Y. N.; PADIAL, P. R.; MARIANI, C. F.; MOSCHINI-CARLOS, V. ; POMPÊO, M. Compartimentalização e qualidade da água: o caso da Represa Billings. **Bioikos**, v. 28, n. 1, p. 31-43, 2014.
- CARLSON, R. E. A Trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, v. 22, p. 361-380, 1977.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Comunidade planctônica e clorofila-a do Complexo Billings**: out/92 a out/93. São Paulo: CETESB, Secretaria de Estado do Meio Ambiente. 1996.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2002**. São Paulo: CETESB, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2003.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2008**. São Paulo: CETESB, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2009. 528 p.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo 2013**. São Paulo: CETESB, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2014. 434 p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-/relatorios>>. Acesso em: 17 set. 2014.
- FELISBERTO, S. A.; RODRIGUES, L. Influência do gradiente longitudinal (rio-barragem) na similaridade das comunidades de desmídias perifíticas. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 28, n. 2, p. 241-254, abr.-jun. 2005.
- GOLTERMAN, H. L.; CLYMO, R. S.; OHNSTAD, M. A. M. **Methods for physical and chemical analysis of freshwaters**. 20. ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1978. 213 p. (I.B.P. Handbook, 8).
- HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 9., 2001.

- HENRY, R. **Estrutura espacial e temporal do ambiente físico e químico e análise de alguns processos ecológicos na Represa de Jurumirim (Rio Paranapanema, SP) e na sua bacia hidrográfica.** 1990. 242 f. (Livre-Docência). Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu, 1990.
- JEFFREY, S. W.; HUMPHREY, G. F. New Spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c₁ e c₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton. **Biochemie und Physiologie der Pflanzen**, v. 167, p. 191-194, 1975.
- KAKINAMI, S. H. et al. Rio Pinheiros: suas águas e suas margens. In: ROMÉRO, M. A.; PHILIPPI JR., A. ; BRUNA, G. C. (Eds.). **Panorama ambiental da Metrópole de São Paulo.** São Paulo: USP/Signus Editora, 2004. p. 191-223.
- KAWAI, H.; TANO, T.; CHINEZ, S. J. Caracterização das condições sanitárias atuais da represa Billings em vista do balanço de matéria orgânica e oxigênio dissolvido. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 15., 1976. Buenos Aires. **Anais...** São Paulo: CETESB, 1976.
- KIPPER, D.; BIALETZKI, A.; SANTIN, M. Composição taxonômica da assembleia de larvas de peixes no reservatório de Rosana, Rio Paranapanema, Brasil. **Biota Neotropica**, v. 11, n. 1, p. 421-426, 2011.
- KRATZER, C. R.; BREZONICK, P. L. A. A Carlson type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. **Water Resources Bulletin**, v. 17, p. 713-714, 1981.
- LORENZEN, C. J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations. **Limnology and Oceanography**, v. 12, n. 2, p. 343-346, 1967.
- MACKERETH, J. F. H.; HERON, J.; TALLING, J. F. Water analysis: some revised methods for limnologists. **Freshwater Biological Association**, n. 36, p. 121, 1978.
- MAIER, M. H. Limnologia de reservatórios do sudeste do Estado de São Paulo, Brasil II. Circulação e estratificação da água. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 1, n. 12, p. 11-43, 1985.
- MARIANI, C. F.; POMPÊO, M. Potentially bioavailable metals in sediment from a tropical polymictic environment - Rio Grande Reservoir, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 8, p. 284-288, 2008.
- MEIRINHO, A. M. **Compartimentalização da comunidade zooplânctônica em um reservatório tropical urbano eutrofizado (braço Rio Grande, Complexo Billings, SP).** 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- MOURA JÚNIOR, E. G.; ABREU, M. C.; SEVERI, W.; LIRA, G. A. S. T. O gradiente rio-barragem do reservatório de Sobradinho afeta a composição florística, riqueza e formas biológicas das macrófitas aquáticas?. **Rodriguésia**, v. 62, n. 4, p. 731-742, 2011.
- NISHIMURA, P. Y. **Ecologia da comunidade fitoplânctônica em dois braços da Represa Billings (São Paulo, SP) com diferentes graus de trofia,** 2008. 148 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- PIELOU, E. C. **The Interpretation of Ecological Data.** New York: Wiley-Interscience, 1984.
- POMPÊO, M. L. M.; PADIAL, P. R.; MARIANI, C. F.; CARDOSO-SILVA, S.; MOSCHINI-CARLOS, V.; SILVA, D. C. V. R.; PAIVA, T. C. B.; BRANDIMARTE, A. L. Biodisponibilidade de metais no sedimento de um reservatório tropical urbano (reservatório Guarapiranga – São Paulo (SP), Brasil): há toxicidade potencial e heterogeneidade espacial?. **Geochimica Brasiliensis**, v. 27, n. 2, p. 104-119, 2013.
- STRICKLAND, J. D.; PARSONS, T. R. A. A manual of seawater analysis. **Bull. Fish. Res. Bel. Can.**, v. 125, p. 1-185, 1960.
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G. Reservoir ecosystem functioning: theory and application. In: TUNDISI, J. G.; STRASKRABA, M (Eds.) **Theoretical reservoir ecology and its applications.** Rio de Janeiro: International Institute of Ecology/Brazilian Academy of Sciences/Backhuys Publishers, 1999. p. 565-597.
- TEIXEIRA, C.; TUNDISI, J. G.; KUTNER, M. B. Plankton studies in a mangrove. II. The standing-stock and some ecological factors. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, São Paulo, v. 24, p. 23-41, 1965.
- THORTON, K. W., KIMMEL, B. L.; PAYNE, F. E. **Reservoir limnology: ecological perspectives.** New York: John Wiley, 1990. 248p.

TUNDISI, J. G. **Produção primária, "standing-stock" e fracionamento do fitoplâncton na região lagunar de Cananéia.** 1969. 131 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1969.

TUNDISI, J. G. Represas artificiais: perspectivas para o controle e manejo da qualidade da água para usos múltiplos. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 4., 1985. **Anais...** 1985. p. 36-59.

TUNDISI, J. G. ; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia.** São Paulo: Oficina de textos, 2008. 632 p.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI:** enfrentando a escassez. São Carlos: RIMA, IIE, 2003. 248 p.

WENGRAT, S.; BICUDO, D. C. Avaliação espacial da qualidade da água em reservatório urbano (Complexo Billings, sudeste do Brasil). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 23, n. 2, p. 200-216, 2011.