

JOSE RICARDO BAROLDI CIQUETO GARGIULO

**COMPARTIMENTO TAQUACETUBA: CONTRIBUIÇÃO DOS
TRIBUTÁRIOS E DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) NA
QUALIDADE DA ÁGUA E DO SEDIMENTO**

Sorocaba

2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*

JOSE RICARDO BAROLDI CIQUETO GARGIULO

**COMPARTIMENTO TAQUACETUBA: CONTRIBUIÇÃO DOS
TRIBUTÁRIOS E DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) NA
QUALIDADE DA ÁGUA E DO SEDIMENTO**

Tese apresentada como requisito do Programa de
Doutorado em Ciências Ambientais da Universidade
"Júlio de Mesquita Filho" na Área de Concentração
Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luiz Martins Pompêo
Coorientadora: Profa. Dra. Luciana Carvalho Bezerra
de Menezes

Sorocaba

2022

G231c

Gargiulo, Jose Ricardo Baroldi Ciqueto

Compartimento Taquacetuba: contribuição dos tributários e do reservatório Billings (SP) na qualidade da água e do sedimento / Jose Ricardo Baroldi Ciqueto Gargiulo. -- Sorocaba, 2022

84 p. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Marcelo Luiz Martins Pompêo

Coorientadora: Luciana Carvalho Bezerra de Menezes

1. Limnologia. 2. Eutrofização. 3. Reservatórios. 4. Metais pesados.
5. Macroinvertebrados bentônicos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: COMPARTIMENTO TAQUACETUBA: CONTRIBUIÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS E DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) NA QUALIDADE DA ÁGUA E DO SEDIMENTO

AUTOR: JOSÉ RICARDO BAROLDI CIQUETO GARGIULO

ORIENTADOR: MARCELO LUIZ MARTINS POMPEO

COORIENTADORA: LUCIANA CARVALHO BEZERRA DE MENEZES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCELO LUIZ MARTINS POMPEO (Participação por Parecer Circunstanciado)
Departamento de Ecologia / Instituto de Biociências - Universidade de São Paulo USP

Profª. Drª. ANA LÚCIA BRANDIMARTE (Participação por Parecer Circunstanciado)
Departamento de Ecologia / Instituto de Biociências - Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. JULIO CESAR LÓPEZ DOVAL (Participação por Parecer Circunstanciado)
Programa de Pós-graduação em Ecologia / IB / USP

Drª. SHEILA CARDOSO DA SILVA (Participação por Parecer Circunstanciado)
Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais / Universidade Federal do Acre (UFAC)

Profª. Drª. TERESA CRISTINA BRAZIL DE PAIVA (Participação por Parecer Circunstanciado)
Departamento de Ciências Básicas e Ambientais / Universidade de São Paulo (USP)

Sorocaba, 23 de março de 2022

DEDICATÓRIA E AGRADECIMENTOS

À Luz que Tudo Cria, Ama, Sabe e Determina;

À Verdadeira e Sagrada Família;

Já, ontem e amanhã o Amor Divino, Saúde e Paz.

Aos infinitos esforços que foram e são feitos pela Humanidade para alavancar sua jornada evolutiva, que marcaram e marcam vidas, lágrimas, sorrisos e persistência;

Aos professores e agricultores do Brasil e do mundo que alimentam a Vida e a Esperança;

A todos que empenham esforços para o mundo ter água límpida para a Vida;

Aos meus professores e amigos da USP, do Instituto de Pesca e da Unesp;

Às equipes dos laboratórios Lablimno USP, Instituto de Pesca e Unesp Sorocaba;

Aos meus orientadores prof. Marcelo Pompêo e profa. Luciana Menezes;

Aos meus professores Ana Lúcia Brandimarte, Cacilda Thais Mercante, Letizia Petesse e Roberto Ferraboli;

Aos professores José Arnaldo Roveda, Sandra Masalskiene Roveda, Henrique Ewbank, Viviane Moschini Carlos, Sandro Donnini Mancini e Antonio Germano Martins;

Aos meus amigos da Biociências;

À minha mãe Helaine, meus avós Helena e Hélio, ao Ricardo, Priscila, César, Rosângela e demais familiares;

RESUMO GERAL

Objetivo. A pesquisa objetivou avaliar a qualidade da água e do sedimento do Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP, Brasil), por meio da análise abiótica da água, abiótica do sedimento, incluindo metais potencialmente tóxicos e biótica da comunidade de macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores. O compartimento tem múltiplos usos como abastecimento público de água e pesca profissional. **Métodos:** Amostragem na entrada do compartimento (P1), no ponto de captação de água para transposição para abastecimento público de água (P2) e na foz dos principais tributários formadores do compartimento (P3 a P6). Coletas concentraram-se nos períodos chuvoso e seco 2017. **Resultados.** O Compartimento Taquacetuba apresentou em todos os pontos certo grau semelhante de comprometimento ambiental, com níveis na água de condutividade elétrica, clorofila α e fósforo total acima dos limites da legislação, em super ou hipereutrofia. Em relação aos metais potencialmente tóxicos do sedimento, nenhuma evidência que pudesse indicar provável efeito tóxico à biota foi encontrada. Em relação ao zoobentos, apenas foi observada presença de táxons semi-tolerante e tolerante a poluição orgânica. O P1 foi o ponto com maior estresse ambiental, com piora da qualidade da água no período chuvoso, diferentemente dos demais pontos que mostraram melhora da qualidade com chuvas. O P2 mostrou tendência a maiores concentrações de clorofila, na estiagem, correspondentes à hipereutrofia. O P3, drenagem córregos Colônia e Vermelho, na seca, mostrou tendência a maiores níveis na água de nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrogênio total. A P4, drenagem do Córrego Taquacetuba, apresentou tendência a menores valores de oxigênio dissolvido da água, na estação seca, com amostras em desacordo com a legislação, além de altas concentrações de todos os parâmetros abióticos do sedimento em ambos os períodos, porém, somente durante o período chuvoso com tendência a maiores concentrações desses parâmetros. O P5, foz rio Monos - Barragem Guarani, e o P6, foz rio Curucutu, mostraram melhores condições com tendência a maiores níveis na água de oxigênio e menor turbidez nas chuvas além de melhores condições do sedimento embora com tendência a maiores concentrações dos parâmetros durante o período chuvoso

Palavras-chave: limnologia, reservatórios, eutrofização, metais potencialmente tóxicos, bioindicadores bentônicos

ABSTRACT

Aim. The research aimed to evaluate the water and sediment quality of Taquacetuba Compartment, Billings Reservoir (SP, Brazil), through analysis of abiotic water data, abiotic sediment data, including potentially toxic metals and biotic and benthic macroinvertebrate community as bioindicators. The Taquacetuba Compartment has multiple uses such as public water supply and professional fishing activity. **Methods:** Sampling at the compartment entrance (P1), close to the water catchment point for transposition for public water supply (P2) and in the mouths of the main tributaries forming the compartment (P3 to P6). The collections were concentrated in the rainy and dry periods of 2017. **Results:** The Taquacetuba Compartment presented at all points a similar degree of environmental compromise, with levels of electrical conductivity, chlorophyll α and total phosphorus in the water above the limits of the legislation, in super or hypereutrophy. Regarding the potentially toxic metals in the sediment, no evidence was found that could indicate a probable toxic effect on the biota. Regarding zoobenthos, only semi-tolerant and tolerant taxa to organic pollution were observed. The P1, compartment entrance, presented the greatest environmental stress, with worsening of water quality in rains, while other points showed an improvement in rainfall. The P2 was evidenced by the trend of higher concentrations of chlorophyll α , during the drought, with values corresponding hypereutrophic state. The P3, drainage from the Colônia and Vermelho Streams presented in the drought a tendency towards higher concentrations in water of ammoniacal nitrogen, nitrate, and total nitrogen. The P4, drainage of the Taquacetuba Stream, showed a tendency to lower values of dissolved oxygen in the water, in the dry season, with samples in disagreement with the legislation, in addition to high concentrations of all abiotic parameters of the sediment in both periods, however, only during the rainy season with a tendency to higher concentrations of these parameters. The P5, drainage from Monos River – Guarani Dam, and the P6, drainage Curucutu River, showed better conditions, with a tendency to higher levels of oxygen in the water and less turbidity in the rains, in addition to better sediment conditions, although with a tendency to higher concentrations of the parameters during the rainy season.

Keywords limnology, reservoirs, eutrophication, potentially toxic metals, benthic bioindicators

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALSP: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo

ANA: Agencia Nacional de Águas Ministério do Meio Ambiente

ANOSIM: ANalysis Of SIMilarities / Análise de Similaridade

ANOVA: Analysis of Variance / Análise de Variância

APHA: American Public Health Association

C: Coletas

C': dominância de Simpson

CCA: Canonical Correspondence Analysis / Análise de Correspondência Canônica

CCME: Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Chl: clorofila α

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

Cond: Condutividade elétrica

CPLEA: Coordenadoria de Planejamento Ambiental

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo

DCA: Detrended Correspondence Analysis / Análise de Correspondência Destendenciada

EMAE: Empresa Metropolitana de Águas e Energia

GLM: General Linear Model / Modelo de Generalização Linear

H': diversidade de Shannon-Weaver

HPA: Avaliação da Autoridade Portuária de Hamburgo

IET: Índice de Estado Trófico

ISQG: Interim Sediment Quality Guidilines / Diretrizes Provisórias de Qualidade de Sedimentos = TEL

LabLimno/USP: Laboratório de Limnologia do Departamento de Ecologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo - USP

MS: Material Suplementar

NH_x: nitrogênio amoniacal

nMDS: non metric multidimensional scaling / escalonamento multidimensional não-métrico

NO₂: nitrito

NO₃: nitrato

NT: nitrogênio total

NTs: nitrogênio total do sedimento

O₂: oxigênio dissolvido

P: Ponto de amostragem

PCA: Principal Componente Analysis / Análise de Componente Principal

PEL: Probable Effect Level / Nível de Efeito Provável

pH: potencial Hidrogeniônico

PO₄: ortofosfato

PT: fósforo total

PTs: fósforo total do sedimento

RMSP: Região Metropolitana de São Paulo

S': riqueza de táxons

SABESP: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

Semi-T: Semi-tolerantes (organismos semi-tolerantes à poluição orgânica)

SIMPER: SIMilarity PERcentage analysis / Análise por porcentagem de similaridade

SMA: Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo

SP: Estado de São Paulo

T: Tolerantes (organismos tolerantes à poluição orgânica)

TEL: Threshold Effect Level / Limite Inicial de Efeito

Temp: temperatura da água

Turb: turbidez

U' = J': uniformidade de Pielou

ULRL / IP / SP: Laboratório de Referência em Limnologia do Instituto de Pesca da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo

UNT: Unidade Nefelométrica de Turbidez

VGQS: Sediment Quality Values / Valores Guia de Qualidade de Sedimento

VRR: Valores de Referência Regional

Z17: Colônia Z17 de Pescadores “Orlando Feliciano”

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
1 CAPÍTULO 1: COMPARTIMENTO TAQUACETUBA DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP, BRAZIL): CONTRIBUIÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS E DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) - QUALIDADE DA ÁGUA	13
1.1 ABSTRACT	13
1.2 RESUMO	13
1.3 INTRODUÇÃO	14
1.4 MATERIAL E MÉTODOS	16
1.4.1 Área de estudo	16
1.4.2 Amostragem	17
1.4.3 Análise laboratorial	18
1.4.4 Análise de dados	18
1.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
1.5.1 Variação espacial e sazonal dos parâmetros da água	21
1.5.2 PCA com dados abióticos de água	25
1.5.3 Determinação do estado trófico	27
1.6 CONCLUSÃO	28
1.7 REFERÊNCIAS	30
1.8 MATERIAL SUPLEMENTAR	33
1.8.1 MS - Investigação Inicial de Resultados	33
1.8.2 MS - Variação Espacial Vertical dos Parâmetros da Água	33
1.8.3 MS - Cálculo do Índice de Estado Trófico - IET	35
1.8.4 MS - Detalhes do Regulamento para Confronto de Resultados	35
1.8.5 MS - Tabela de correlação PCA	35
2 CAPÍTULO 2: COMPARTIMENTO TAQUACETUBA DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP, BRAZIL): CONTRIBUIÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS E DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) - DADOS ABIÓTICOS DE SEDIMENTO	36
2.1 ABSTRACT	36
2.2 RESUMO	36
2.3 INTRODUÇÃO	37
2.4 MATERIAL E MÉTODOS	39
2.4.1 Área de estudo	39
2.4.2 Amostragem	40

2.4.3	Análise laboratorial.....	40
2.4.4	Análise de dados.....	41
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
2.5.1	Variação espacial e sazonal dos parâmetros de sedimentos	43
2.5.2	PCA com dados abióticos do sedimento.....	45
2.6	CONCLUSÃO.....	47
2.7	REFERÊNCIAS	48
2.8	MATERIAL SUPLEMENTAR	51
2.8.1	MS - Investigação Inicial de Resultados.....	51
2.8.2	MS - Detalhes de Normas para Confrontamento de Resultados.....	51
2.8.3	MS - Detalhes da PCA.....	51
3	CAPÍTULO 3: COMPARTIMENTO TAQUACETUBA DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP, BRAZIL): CONTRIBUIÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS E DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) – MACROINVERTEBRADOS BENTÔNICOS COMO BIOINDICADORES.....	52
3.1	ABSTRACT	52
3.2	RESUMO.....	52
3.3	INTRODUÇÃO.....	53
3.3.1	O Reservatório Billings e Compartimento Taquacetuba.....	53
3.3.2	Comunidade de macroinvertebrados bentônicos como bioindicador	53
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	54
3.4.1	Área de estudo.....	54
3.4.2	Amostragem.....	56
3.4.3	Análise laboratorial.....	56
3.4.4	Análise de dados.....	57
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
3.5.1	Abundâncias e Densidades de Táxons Bioindicadores	59
3.5.2	Índices Bióticos	61
3.5.3	Influência dos táxons nas variações espaciais e sazonais.....	64
3.6	CONCLUSÃO.....	67
3.7	REFERÊNCIAS	68
3.8	MATERIAL SUPLEMENTAR	71
3.8.1	MS - Investigação Inicial de Resultados.....	71
3.8.2	MS - Cálculo de Índices Bióticos.....	71
3.8.3	MS - Variação das Densidades Relativas dos Táxons e Grupos de Táxons	73
3.8.4	MS - Cálculo para a transformação de Hillinger	74

4	CAPÍTULO 4: COMPARTIMENTO TAQUACETUBA DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP, BRAZIL): CONTRIBUIÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS E DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) - ANÁLISE CONJUNTA E CONCLUSÃO UNIFICADA.....	75
4.1	ABSTRACT.....	75
4.2	RESUMO.....	75
4.3	CONTRIBUIÇÃO DE DADOS ABIÓTICOS DA ÁGUA E DO SEDIMENTO E BIÓTICOS NAS VARIAÇÕES ESPACIAL E SAZONAL	76
4.4	REFERÊNCIAS	82
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
	REFERÊNCIAS.....	84

INTRODUÇÃO GERAL

O Reservatório Billings localizado no Estado de São Paulo (Brasil), abrange áreas urbanas e rurais da Região Metropolitana de São Paulo. Atualmente é um reservatório de cabeceira com formato dendrítico caracterizado por um corpo central e oito compartimentos, sendo um deles o compartimento Taquacetuba, foco desta pesquisa. O Billings é um dos mais importantes corpos de água doce do Estado por suas funções ecológicas e múltiplos usos, que incluem diluição de afluentes e esgoto doméstico, pesca artesanal profissional e amadora, abastecimento público, lazer e navegação de balsas e barcos, entre outros (Gargiulo, 2020). O reservatório também é utilizado na regulação hidráulica do rio Pinheiros. Para evitar inundações, águas desse rio, com grande aporte de esgoto urbano, são bombeadas para o Billings (EMAE, 2021), contribuindo para o aumento do estresse ambiental do reservatório (CETESB, 2019).

Este estudo avaliou a qualidade ambiental do Compartimento Taquacetuba através da análise de dados abióticos da água, abióticos do sedimento, incluindo metais potencialmente tóxicos e bióticos da comunidade de macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores, com foco na entrada do Compartimento Taquacetuba, na área próxima ao ponto de captação visando abastecimento público e nas áreas de desembocadura dos principais tributários formadores.

1 **CAPÍTULO 1: COMPARTIMENTO TAQUACETUBA DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP, BRAZIL): CONTRIBUIÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS E DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) - QUALIDADE DA ÁGUA**

1.1 **ABSTRACT**

Aim The research intended to evaluate the water quality of Taquacetuba Compartment, Billings Reservoir (Brazil), through analysis of abiotic water data. The Taquacetuba Compartment has multiple uses such as public water supply and professional fishing activity. **Methods:** Sampling at the compartment entrance, close to the water catchment point for transposition for public water supply and in the mouths of the main tributaries forming the compartment. The collections were concentrated in the rainy and dry periods of 2017. **Results:** The Taquacetuba Compartment had water quality impairment evidenced by electrical conductivity, chlorophyll α and total phosphorus above the limits provided in the legislation, in super or hypereutrophy. The P1, compartment entrance, presented the greatest environmental stress, with worsening of water quality in rains, while other points showed an improvement in rainfall. This is due to the greater influence of the central body of the Billings Dam, which presents greater environmental stress in the rainy season due to the pumping of water from the Pinheiros River to control floods. The P2, sampling point close to the site of water catchment, was evidenced by the trend of higher concentrations of chlorophyll α , especially during the drought, with values corresponding hypereutrophic state. The P3, drainage from the Colônia and Vermelho Streams, stood out for presenting in the drought a tendency towards higher concentrations in water of ammoniacal nitrogen, nitrate, and total nitrogen. The P4, drainage from the Taquacetuba Stream, showed tendency towards lower dissolved oxygen values, in dry season. The P5, drainage from Monos River – Guarani Dam, and the P6, drainage Curucutu River, were the ones that presented the best environmental conditions, evidenced by tendency to higher oxygen levels and less turbidity in rains.

1.2 **RESUMO**

Objetivo. A pesquisa objetivou avaliar a qualidade da água do Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (Brasil), por meio da análise abiótica da água. O Compartimento tem múltiplos usos como abastecimento público de água e pesca profissional. **Métodos:** Amostragem na entrada do compartimento, no ponto de captação de água para transposição para abastecimento público de água e na foz dos principais tributários formadores do compartimento. Coletas concentraram-se nos períodos chuvoso e seco 2017. **Resultados:** O Compartimento Taquacetuba mostrou comprometimento da qualidade da água com níveis de condutividade elétrica, clorofila α e fósforo total acima limites legislação, em super ou hipereutrofia. O P1, entrada do compartimento, foi o ponto com maior stress ambiental, com piora da qualidade da água no período chuvoso, já os demais pontos apresentaram melhora da qualidade com chuvas. Isso devido à maior influência no P1 do corpo central da represa Billings, que apresenta maior estresse ambiental nas chuvas pelo bombeamento de água do Rio Pinheiros para controle de enchentes. O P2, próximo ao local de captação de água, com tendência a maiores concentrações de clorofila, na estiagem, correspondentes à hipereutrofia. O P3, drenagem córregos Colônia e Vermelho, na seca, com tendência a maiores níveis nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrogênio total. O P4, foz Córrego Taquacetuba, menores valores de oxigênio dissolvido na estiagem, com amostras em desacordo com a legislação. O P5, foz rio Monos Barragem Guarani, e o P6, foz rio Curucutu, melhores condições ambientais, tendência a maiores níveis oxigênio e menor turbidez nas chuvas

1.3 INTRODUÇÃO

O Reservatório Billings está localizado ($\sim 23^\circ 50'S$, $46^\circ 40'W$) próximo ao Trópico de Capricórnio ($23^\circ 27'S$) no Estado de São Paulo (SP), sudeste do Brasil, próximo à Serra do Mar. O Reservatório Billings atende área urbana e área rural de seis municípios da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP): São Paulo, São Bernardo do Campo, Diadema, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra e Santo André. Inaugurado em 1927, foi construído para armazenamento e abastecimento de água da Usina Hidrelétrica Henry Borden, localizada em Cubatão, no litoral do Estado de São Paulo, um dos principais municípios industriais do país. O Billings, atualmente, é um reservatório de cabeceira com formato dendrítico caracterizado por um corpo central alongado e oito compartimentos principais (braços), além de inúmeros afluentes. Atualmente é um dos mais importantes corpos de água doce do Estado de São Paulo por suas funções ecológicas e múltiplos usos, que incluem diluição de afluentes e esgoto doméstico, pesca artesanal profissional e amadora, abastecimento público, lazer e navegação de balsas e barcos, entre outros (Gargiulo, 2020). Em especial, o reservatório possui em operação dois sistemas de captação de água visando abastecimento público em diversos locais da RMSP. Os sistemas de captação estão localizados no Compartimento Taquacetuba e no Compartimento Rio Grande, este último isolado do restante do reservatório Billings (SABESP, 2021). O reservatório também é utilizado para a regulação hidráulica das enchentes do Rio Tietê na região urbana da cidade de São Paulo. Nesse caso, quando as vazões provocadas pelas chuvas elevam o nível das águas do rio Tietê e de seu efluente, Rio Pinheiros, para evitar inundações, segundo (EMAE, 2021), as águas deste último são bombeadas para a Represa Billings. Devido à grande quantidade de esgoto urbano nas águas desses rios, que apresentam alto grau de eutrofização, tal bombeamento contribui para um aumento do estresse ambiental para o Sistema Billings. Assim, a reversão da água do Rio Pinheiros para o Billings, visando ao controle das enchentes, uma das

principais causas da poluição orgânica observada no reservatório, impacta diretamente o corpo central do reservatório exatamente quando os poluentes deveriam ser diluídos e transportados pelo aumento da chuva. A empresa de saneamento básico do Estado de São Paulo - SABESP administra o Sistema Produtor Taquacetuba-Guarapiranga para abastecimento público de água da RMSP (DAEE, 2010). Neste sistema, a água do Taquacetuba é bombeada de um local próximo a um ponto de amostragem desta pesquisa e transferida para a represa Guarapiranga, que fornece água para abastecimento público. Estudos realizados próximos ao ponto de captação para transposição mostram concentrações de nitrogênio e fósforo totais acima do estabelecido pela legislação (CONAMA nº 357, 2005), e a eutrofização excessiva ocorreu entre 2009 e 2010 (Menezes et al., 2016) e entre 2012 e 2013 (Gargiulo et al., 2016). A Agência Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), em seu monitoramento anual da qualidade da água na última década, também relatou essa situação de estresse ambiental nesta localidade (CETESB, 2020). A região de Taquacetuba apresenta um mosaico de ocupação urbana, atividades agrícolas, fragmentos de Mata Atlântica e terras indígenas (SMA / CPLEA, 2010). O Taquacetuba possui múltiplos usos importantes como o citado abastecimento público de água (EMAE, 2021) e atividade profissional de pesca artesanal, segundo a Colônia Z17 de Pescadores - “Orlando Feliciano” no município de São Bernardo do Campo (2017).

A presente pesquisa avaliou as condições da água do Compartimento Taquacetuba por meio da análise dos dados abióticos da água. Pretendeu-se conhecer a contribuição dos afluentes tributários e do corpo central do Reservatório Billings na qualidade da água do compartimento Taquacetuba, que inclui o local de captação de água para fins de abastecimento. Especificamente objetivou-se: a) avaliar a variação espacial e sazonal dos parâmetros da água, e b) determinar o grau de trofia das amostras.

1.4 MATERIAL E MÉTODOS

1.4.1 Área de estudo

O Compartimento Taquacetuba da Represa Billings (SP) está localizado na porção sudeste do Estado de São Paulo na divisa dos municípios de São Paulo e São Bernardo do Campo. A Figura 1 mostra os detalhes da localização da área de estudo, bem como dos pontos de amostragem (P): P1: entrada do braço Taquacetuba próximo ao corpo central do Reservatório Billings (23 ° 48'11,5 "S 46 ° 37'33,1 "W). Este local sofre maior comprometimento ambiental devido à urbanização do entorno e proximidade com a praça de embarque e desembarque da balsa de Taquacetuba (*ferry boat*) ; P2: próximo ao ponto de captação de água para transposição para o Reservatório de Guarapiranga para fins de abastecimento público (23°50'31,5"S 46°39'19,2"W); P3: área de desembocadura dos córregos “Colônia” e “Vermelho” (23°50'51,7"S 46°40'58,8"W); P4: drenagem do afluente “Taquacetuba” (23°51'14,4"S 46°39'21,2"W); P5: drenagem do afluente do rio “Monos” em direção à área indígena “Guarani da Barragem” (23°52'12,8"S 46°38'46,7"W); P6: drenagem do afluente do rio “Curucutu” em direção à área indígena Krukutu (23°51'44,6"S 46°37'04,8"W).

As legislações atuais para avaliação da qualidade das águas superficiais no Estado de São Paulo são: i) o Decreto n. 8.468 (ALSP, 1976), que define as classes de uso, e ii) o Decreto n. 10755 (ALSP, 1977), que apresenta o enquadramento dos corpos d'água para o Estado. O Compartimento Taquacetuba é classificado na classe 1, o que indica limites mais restritivos em relação à qualidade da água, pois seu uso está relacionado ao abastecimento público.

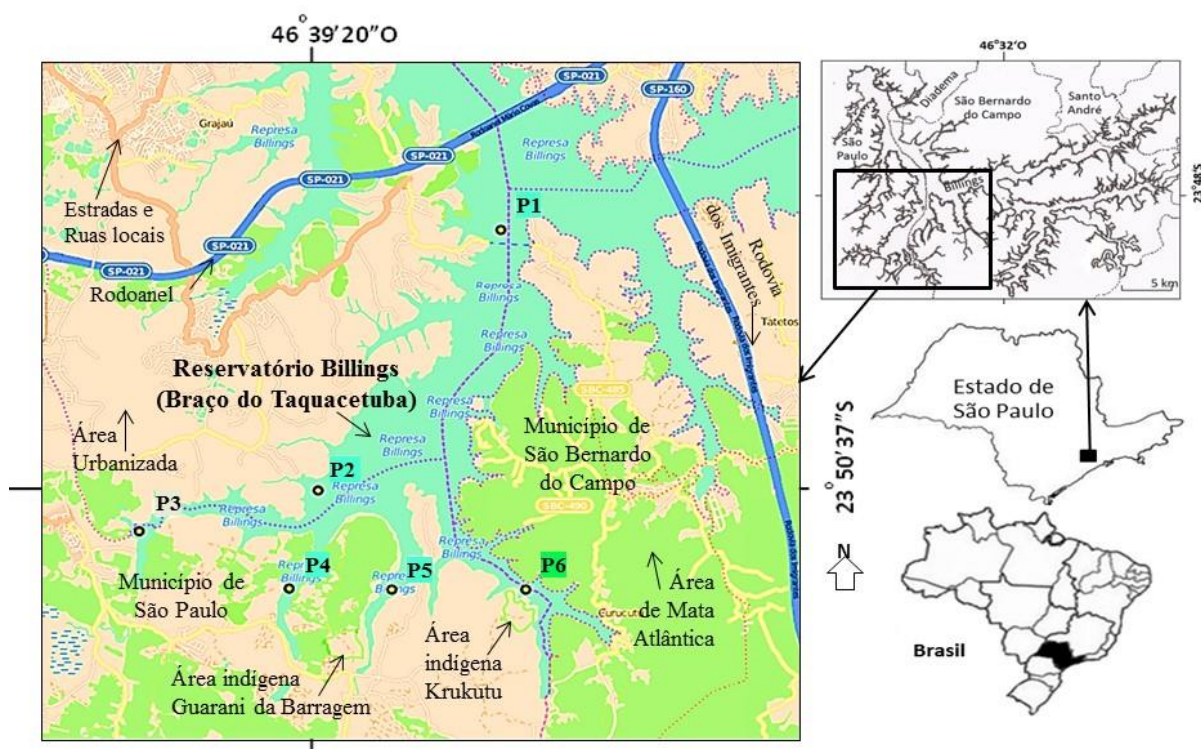


Figura 1: Área de estudo e localização dos pontos de amostragem (P) no Compartimento Taquacetuba do Reservatório Billings - Estado de São Paulo (Brasil): P1: Entrada do Compartimento Taquacetuba, próximo ao corpo central do Reservatório Billings; P2: próximo ao local de captação de água para transposição com fins de abastecimento público. Além disso, áreas de drenagem tributária: P3: Córregos Colônia e Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; P6: Rio Curucutu.

1.4.2 Amostragem

A amostragem concentrou-se em duas estações do ano de 2017: período chuvoso (fevereiro) e período seco (julho). Em cada período, foram realizadas três coletas com intervalo semanal entre elas. Essa escolha foi justificada pelos resultados de pesquisas anteriores (Gargiulo et al., 2016; Menezes et al., 2016) e monitoramento pelo órgão ambiental CETESB (2018, 2019), que indicou as variações mais contrastantes na qualidade da água parâmetros nestes dois períodos do ano para a área de estudo. Segundo Oliver e Ribeiro (2014), esta estratégia de amostragem é justificada pela localização da represa Billings em uma zona de transição climática entre o Clima Tropical Úmido de Altitude, com período de seca definido, e o Clima Subtropical Permanentemente Úmido. Assim, as coletas (C) foram realizadas em C1: 02/fev/2017, C2: 08/fev/2017, C3: 15/fev/2017, C4: 11/jul/2017, C5: 18/jul/2017 e C6: 25/jul/2017. A amostragem ocorreu a menos de 5,0 metros da margem deposicional em zona sublitorânea. Foi

medida *in situ*, segundo ANA / CETESB (2011): profundidade máxima (metros) com uma corda marcada a cada meio metro, amarrada a um peso que afundava, segurando a corda esticada; temperatura ($^{\circ}$ C), oxigênio dissolvido (mg. L⁻¹), pH, condutividade elétrica (μ S.cm⁻¹) e turbidez (UNT) medida com um Horiba U-22 multi-sonda na subsuperfície e à meio metro do fundo. Amostras de água foram coletadas com garrafa van-Dorn na subsuperfície e 0,5 metro do fundo para posterior determinação (em mg. L⁻¹) de clorofila α e compostos de nitrogênio e fosfato. As amostras foram colocadas em diferentes frascos de polietileno para processamento em laboratório.

1.4.3 Análise laboratorial

As atividades laboratoriais foram realizadas nos seguintes locais: a) Laboratório de Limnologia do Departamento de Ecologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo - USP - Lablimno / USP: preparação, filtragem, condicionamento e congelamento de amostras de água e, determinação de clorofila α ; b) Laboratório de Referência em Limnologia do Instituto de Pesca da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo - ULRL / IP / SP: determinação das concentrações dos compostos nitrogenados e fosfatados.

Imediatamente após a coleta, em Lablimno / USP, uma porção da água bruta de cada amostra foi preparada para determinação das frações de nutrientes por filtragem em Kitassato-bombeamento a vácuo com filtro de microfibra de vidro (diâmetro de 47 m), com posterior condicionamento do filtrado da água em frascos de polietileno e conservação por congelamento. O filtro obtido foi utilizado para determinar as concentrações de clorofila α (Wetzel e Likens, 2001). Para determinar as concentrações dos nutrientes totais, a água bruta foi armazenada em frascos de polietileno e preservada por congelamento. Em ULRL / IP / SP, as concentrações de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato foram determinadas (Mackereth et al., 1978), bem como fosfato inorgânico dissolvido - ortofosfato (Strickland e Parsons, 1960) e nitrogênio e fósforo totais (Valderrama, 1981), de acordo com APHA et al. (2002).

1.4.4 Análise de dados

As abordagens estatísticas seguiram os preceitos de Rutherford (2001), Sokal e Rohlf (2009) e Zar (2010). Todas as análises foram implementadas com

os softwares STATISTICA 7.0 (StatSoft, 2020), Past 3.0 (Hammer, 2021) e Bioestat 5.3 (Instituto Mamiraua, 2020), executados em Windows 7.

1.4.4.1 Investigação inicial dos resultados

A investigação inicial dos dados, considerando todos os pontos e todas as coletas, foi realizada por meio de análise estatística descritiva (mínimo, máximo, média, desvio padrão e erro, mediana, percentis 25 e 75) apresentada como Material Suplementar no item MS - Inicial Investigação de resultados (Tab.MS.1).

1.4.4.2 Variação espacial vertical dos parâmetros da água

Valores medidos em subsuperfície e meio metro do fundo foram considerados para a análise descritiva (mínimo, máximo, média, desvio padrão e erro, mediana, percentis 25 e 75), realizada para cada parâmetro. Uma análise gráfica por meio de gráficos *Box-and-whiskers Plot* (média, erro padrão e desvio padrão, com *outliers* e extremos) foi realizada para verificar a presença de *outliers* e comparar a distribuição dos valores entre as medidas realizadas apenas nessas duas profundidades. As implicações dos resultados desta abordagem levaram à consideração de todos os parâmetros abióticos da água, bem como dos valores médios entre as concentrações obtidas na subsuperfície e a meio metro do fundo, para as posteriores elaborações neste estudo. Vide item MS – Variação Espacial Vertical dos Parâmetros da Água (Tab.MS.2 e Fig.MS.1).

1.4.4.3 Estatísticas univariadas aplicadas a todas as variáveis

Como estratégia para investigar as variações dos parâmetros tanto no espaço horizontal (entre os pontos amostrais) quanto sazonais (entre os períodos amostrais), foi aplicada a cada parâmetro ANOVA *two-way* de medidas repetidas (via GLM). Neste caso, os fatores considerados foram os pontos de amostragem (seis níveis: P1 a P6) e os períodos de amostragem (dois níveis: chuvoso e seco). O teste de Tukey foi utilizado *post hoc* para individualizar as diferenças significativas dos fatores. Para atender aos requisitos do teste paramétrico, a normalidade e homogeneidade das variâncias dos resíduos foram verificadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. As transformações

foram realizadas quando necessário: a) raiz quadrada: temperatura da água; b) $\log_{10}(x + 1)$: condutividade elétrica. Testes não paramétricos foram considerados para nitrogênio amoniacal e nitrogênio total, uma vez que o critério de normalidade ou homogeneidade de variância não foi atendido mesmo após a transformação. Nestes casos, foram aplicados: o teste de Wilcoxon para comparações entre os períodos chuvoso e seco e o teste de Friedman para comparações múltiplas de variáveis entre pontos amostrais. Em Gargiulo et al. (2022) é apresentada a elaboração apenas paramétrica subsequente à transformação de NH_x e NT por raiz quadrada e exclusão de dois valores extremos de NT para obtenção dos pré-requisitos, sem contudo alterar a conclusão.

A determinação do estado trófico foi obtida por meio do cálculo do Índice de Estado Trófico - IET - de Lamparelli (2004), também utilizado pelo órgão ambiental (CETESB, 2020), a partir das concentrações de fósforo total e clorofila α da subsuperfície e de a meio metro do fundo para cada amostra investigada. Os detalhes dos cálculos da análise são apresentados no item MS de Material Suplementar - Cálculo do Índice do Estado Trófico.

1.4.4.4 Análise multivariada da qualidade da água

Para determinar a contribuição dos dados abióticos da água para a variação espacial e sazonal, a análise de componentes principais - PCA - foi aplicada para ordenar as unidades de amostragem no espaço multidimensional nos dois períodos de amostragem com base na média das variáveis: água temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, turbidez (UNT) e (mg.L^{-1}) oxigênio dissolvido, clorofila α , nitrito, nitrato e fósforo total. Foi utilizada a média das concentrações medidas em subsuperfície e meio metro do fundo após verificar a similaridade das distribuições durante a investigação inicial dos resultados. As investigações por PCA foram realizadas por meio de uma matriz de correlação devido às diferentes unidades de medida das variáveis físicas e químicas consideradas. Para interpretação da análise, foram consideradas as variáveis que apresentaram maior correlação com os dois primeiros eixos e que apresentaram explicabilidade total final maior que 50%.

1.4.4.5 Normas para confrontamento dos resultados

Os resultados das variáveis físicas e químicas da água foram confrontados com os padrões recomendados pela resolução CONAMA nº 357 (2005). No Material Suplementar é apresentado o item MS - Detalhamento do Regulamento de Confrontamento de Resultados.

1.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.5.1 Variação espacial e sazonal dos parâmetros da água

Em relação às variações dos parâmetros da água (fig.: 2) e nutrientes (compostos nitrogenados e fosfatados) (fig.: 3), foram observadas diferenças significativas entre pontos, períodos e / ou suas interações, para profundidade máxima, temperatura, pH, condutividade elétrica, série de nitrogenados e também fósforo total, com os respectivos *p*-valores inseridos nas figuras. Não foram observadas diferenças significativas para oxigênio dissolvido, turbidez, clorofila α e ortofosfato.

A profundidade máxima no ponto P4 foi maior durante a estação chuvosa, sendo este resultado esperado no período, observado apenas em um dos pontos amostrais, possivelmente devido a diferenças no local exato de amostragem. A temperatura da água, conforme o esperado, apresentou valor maior no período chuvoso, que corresponde ao verão na área de estudo. O pH foi menor no período chuvoso, variando entre 5,4 e 6,6. No período seco ficou entre 6,2 e 6,9. A condutividade elétrica foi maior no período seco; entretanto, sua variação total ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) ficou entre 165 e 300 acima de 100, segundo a CETESB (2018), um indicativo de comprometimento da qualidade da água em todos pontos e períodos amostrados.

Em relação aos compostos nitrogenados e fosfatados (fig.: 3), P1 apresentou concentrações significativamente maiores de nitrito, nitrato e fósforo total, e apresentando, nas chuvas, tendência a maiores concentrações de nutrientes. Os outros pontos de amostragem tenderam a concentrações mais altas

durante a seca. Ao analisar todos os pontos de amostragem por período, as concentrações de nutrientes foram significativamente maiores no período seco para nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrogênio total da água. Esta situação é explicada pela maior proximidade do P1 ao corpo central da Represa Billings, com maior influência do bombeamento do Rio Pinheiros por ocasião de chuva e maior densidade populacional, com lançamento de esgoto doméstico no reservatório.

Em relação à comparação dos resultados com o CONAMA nº 357 (2005), observou-se que o pH esteve abaixo do limite mínimo (6,0) apenas no período chuvoso em todos os pontos amostrais. O oxigênio dissolvido esteve em não conformidade apenas na estação chuvosa em P1 e P4. A turbidez esteve em conformidade. A clorofila α mostrou-se em não conformidade em todas as amostras, com tendência a maiores valores no período seco, com exceção de P1, que apresentou maiores valores no período chuvoso. P2 tendeu a apresentar maiores concentrações de clorofila no período seco. No entanto, em todas as coletas, foi observada em campo uma grande proliferação de algas. O reservatório tem uma longa história de proliferação de cianobactérias devido à poluição orgânica (Moschini-Carlos et al, 2009). O nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato estiveram em conformidade. Wengrat e Bicudo (2011) indicaram o corpo central do reservatório Billings e o compartimento Taquacetuba como locais de grande estresse ambiental, principalmente devido aos elevados valores nutrientes da água. Conforme apontado por Cardoso-Silva et al (2014) e este estudo, o P2 mostrou tendência a maiores valores de condutividade elétrica, considerando os dois períodos de amostragem.

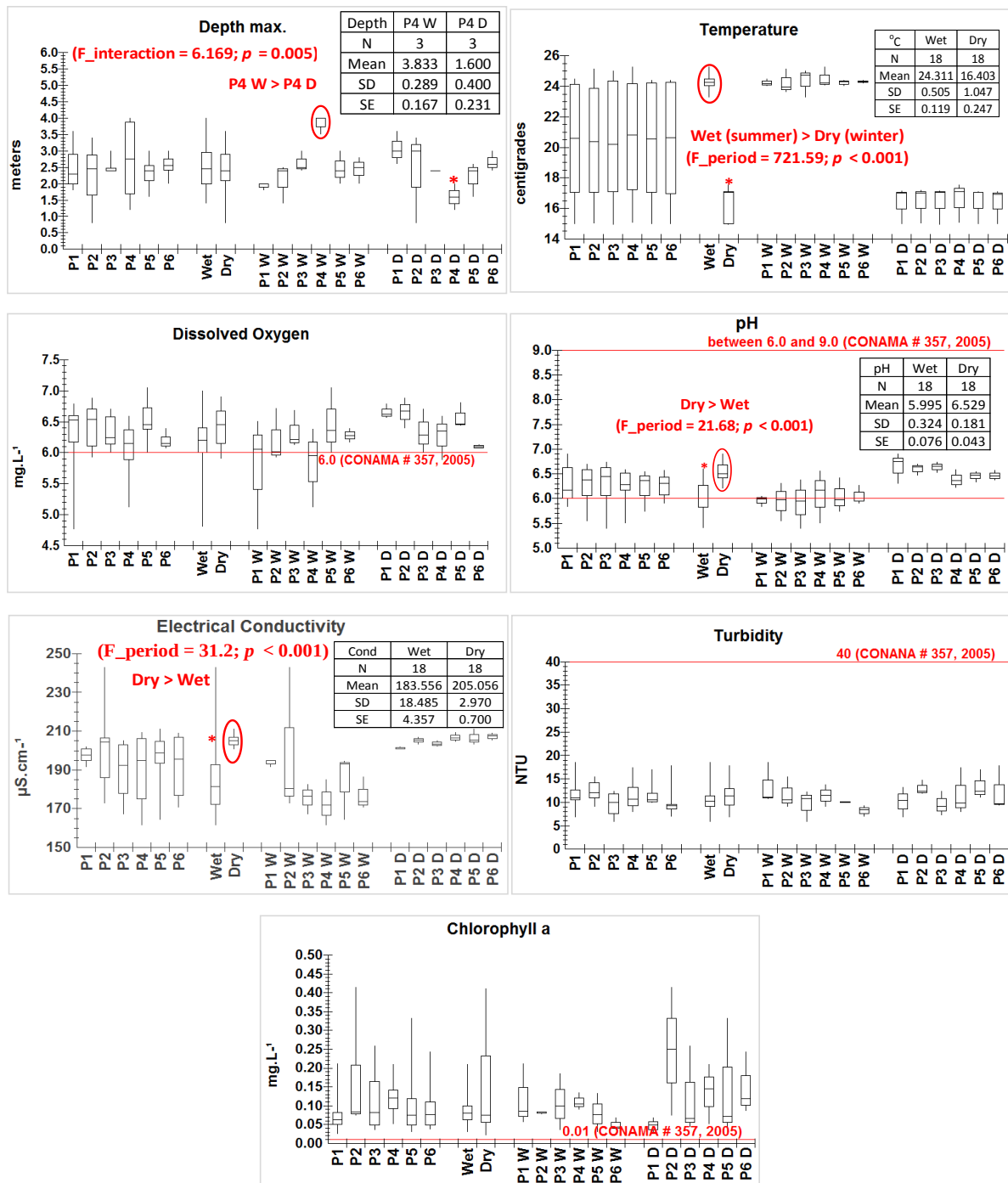


Figura 2: Variação Espacial e Sazonal dos Parâmetros da Água. Gráficos *Box-and-whiskers Plot* de 25 e 75 percentis, medianas e *whiskers* mínimo e máximo. Detalhes estatísticos (cor vermelha): diferenças significativas entre asteriscos e elipses, de acordo com o padrão ANOVA: F: Fisher, valor p. Tabelas: mediana, desvio padrão e erro. Pontos de Amostragem: P1: entrada do compartimento; P2: captação de água; P3: riachos Colônia e Vermelho, P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; e P6: Rio Curucutu. Períodos de amostragem: Wet (W): úmido e Dry (D): seco. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017. Sendo *Depth max*: Profundidade máxima (metros); *Temperature*: Temperatura em centígrados; *Summer*: Verão; *Winter* (Inverno); *Dissolved Oxygen*: Oxigênio dissolvido; pH entre 6,0 e 9,0 (CONAMA); *Electrical Conductivity*: Condutividade elétrica; *Turbidity*: Turbidez (NTU=Unidade Nefelométrica de Turbidez); *Chlorophyll a*: Clorofila α . Tabelas: mean: mediana, SD: desvio padrão e SE: erro padrão.

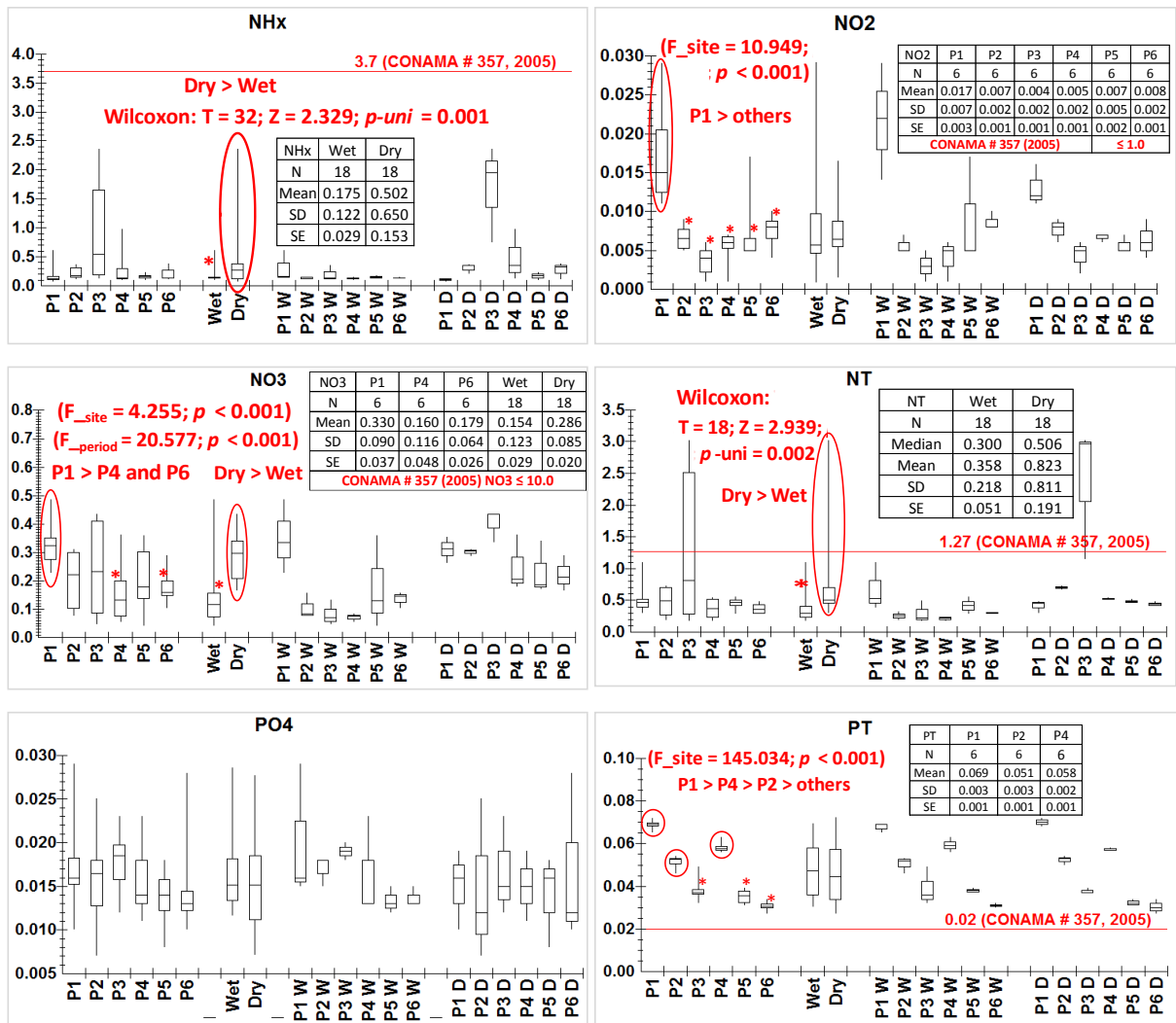


Figura 3: Variação dos nutrientes da água (mg.L^{-1}): NHx: nitrogênio amoniacal, NO2: nitrito, NO3: nitrato, NT: nitrogênio total, PO4: ortofosfato e PT: fósforo total. Gráficos Box-and-whiskers Plot de 25 e 75 percentis e medianas e whiskers mínimo e máximo. Detalhes estatísticos (cor vermelha): diferenças significativas entre asteriscos e elipses, de acordo com o padrão ANOVA: F: Fisher, valor p . Tabelas: mean: mediana, SD: desvio padrão e SE: erro padrão. Pontos de Amostragem: P1: entrada do compartimento; P2: captação de água; P3: Ribeirões Colônia e Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; e P6: Rio Curucutu. Períodos de amostragem: Wet (W): Úmido e Dry (D): Seco. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

1.5.2 **PCA com dados abióticos de água**

A Figura 4 mostra o resultado da PCA, em duas apresentações de diagrama de pontos (*convex hulls*): por ponto de amostragem (A) e por período de amostragem (B), explica 54,14% da variabilidade total. O primeiro eixo (29,66% da variabilidade) é representativo (em ambos os gráficos) do gradiente temporal, separando as amostras do período chuvoso (à esquerda) daquelas do período seco (à direita do gráfico). Temperatura está negativamente correlacionada com todas as outras variáveis, quando a temperatura aumenta, todas as outras diminuem, devido à diluição dos poluentes no verão chuvoso. Portanto, neste sistema, há uma piora da qualidade da água no período de estiagem. O segundo eixo (24,47% da variabilidade) é representativo das características tróficas da água, separando principalmente P1 dos demais pontos. As amostras P1 estão mais relacionadas às maiores concentrações de nutrientes (nitrito, nitrato e fósforo total) e turbidez, inversamente correlacionadas com oxigênio dissolvido, pH e clorofila. A relação inversa entre temperatura e oxigênio dissolvido também é evidente. A correlação entre esses dois grupos de variáveis é invertida, indicando que quando os nutrientes, a temperatura e a turbidez aumentam, o oxigênio dissolvido, a clorofila e o pH diminuem. Em relação à distribuição espacial dos pontos, no 2º eixo, é possível observar uma separação entre P1 (caracterizado por maiores concentrações de nutrientes e turbidez) e todos os demais pontos. No Material Suplementar está apresentada a tabela de correlação da PCA (Tab.MS.4).

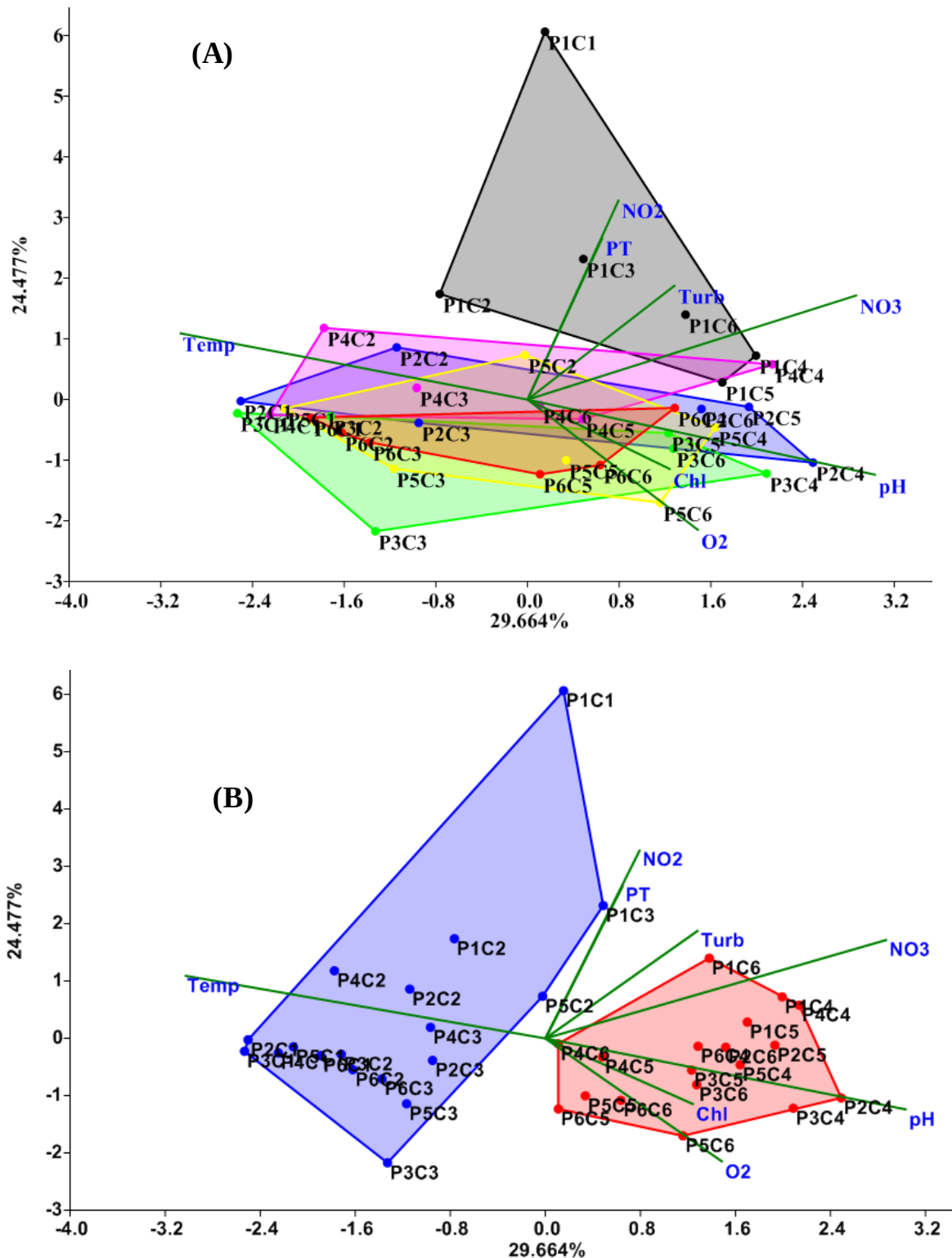


Figura 4: PCA - Dados Abióticos da Água. Análise de componentes principais para verificar a ordenação dos pontos de amostragem (P) e coletas (C) em relação à intensidade da associação entre as variáveis abióticas: Temp: temperatura da água (oC), pH: potencial de hidrogênio; UNT: turbidez. Em mL⁻¹; O2: oxigênio dissolvido; Chl: clorofila α ; NO₂: nitrito; N^o 3: nitrato e PT: Fósforo total. Cores das nuvens de dispersão (convex hulls): Gráfico (A): pontos de amostragem: preto: P1 - entrada do compartimento; azul: P2: captação de água; P3 verde: Ribeirões Vermelho e Colônia; rosa P4: Ribeirão Taquacetuba; P5 amarelo: Rio Monos - Barragem Guarani e P6 vermelho: Rio Curucutu. Gráfico (B): períodos de amostragem: azul: úmido e vermelho: seco. Compartimento de Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

1.5.3 **Determinação do estado trófico**

Os resultados do índice de estado trófico (IET) (tab.: 1) mostram que os cálculos para determinação do grau de trofia mostraram que todos os pontos e períodos amostrados pertenceram às categorias supereutrófico e hipereutrófico, indicando comprometimento da qualidade da água em todos os locais e períodos com base nos altos níveis de fósforo total e clorofila α . O P1, próximo ao corpo central do reservatório Billings, apresentou padrão diferente dos demais pontos, com aumento do grau de trofia no período das chuvas, fato relacionado ao bombeamento de água do rio Pinheiros justamente na época (chuvosa) de diluição de poluentes. O P2, na estiagem mostrou pico no valor do IET. Dentre os tributários, P5 e P6 mostraram menores valores de IET especialmente nas chuvas.

Tabela 1: Índice de estado trófico - IET. As cores mostram categoria trófica de estado (CETESB, 2020): vermelho: supereutrófico; roxo: hipereutrófico. Pontos de Amostragem: P1: entrada do compartimento; P2: captação de água; P3: riachos Colônia e Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; e P6: Rio Curucutu. Períodos de amostragem: 2017: C1 a C6; Úmido: C1 a C3 e Seco: C4 a C6. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP).

Índice de Estado Trófico - IET			Segundo CETESB (2020)	
	Úmido	Seco	Categorias	Pontuação
P1	68,98	66,83	Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$
P2	67,17	71,77	Oligotrófico	$47 < IET \leq 52$
P3	67,04	67,29	Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$
P4	68,38	68,82	Eutrófico	$59 < IET \leq 63$
P5	66,29	67,29	Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$
P6	64,46	68,76	Hipereutrófico	$IET > 67$
Todos os pontos	67,26	68,91		
Todas as amostras	68,16			

1.6 CONCLUSÃO

O presente estudo, em relação à metodologia de amostragem, mostrou que a zona sublitorânea amostrada não apresentou variações significativas em relação aos parâmetros da água analisados entre subsuperfície e meio metro de profundidade (≤ 4 m de profundidade máxima). Os resultados mais significativos foram aqueles observados entre os diferentes períodos do ano, confirmando a concentração dos esforços amostrais nos períodos chuvoso e seco na área de estudo. Em relação à qualidade da água, o Compartimento Taquacetuba em todos os pontos apresentou comprometimento da qualidade da água evidenciado em todas as amostras por níveis de condutividade elétrica, clorofila α e fósforo total acima dos limites previstos na literatura e legislação. Além do grau de trofia sempre em estado supereutrófico ou hipereutrófico. O P1 - entrada do compartimento, considerando os dois períodos de amostragem mostrou-se como o local com maior comprometimento da qualidade da água, evidenciado também pela PCA com as dispersões dos pontos (*convex hulls*) de P1 destacados em relação aos demais pontos de amostragem e correlacionados a indicativos de comprometimento ambiental. Considerando separadamente os períodos amostrais, o P1, ao contrário dos demais pontos, apresentou piora da qualidade da água durante o período chuvoso. Esta conclusão sobre P1 nas chuvas é sustentada pela tendência a uma menor concentração de oxigênio dissolvido associada à tendência a maiores níveis de turbidez, clorofila α , nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato, nitrogênio total e ortofosfato, que são indicativos de comprometimento ambiental. Esta situação também foi evidenciada pela PCA, que destacou o P1 dos demais pontos amostrais, mostrando uma maior correlação entre as coletas chuvosas com o fósforo total e nitrito. Esse fato é explicado pela maior proximidade do P1 com o corpo central da Represa Billings, que apresenta maior estresse ambiental no período chuvoso devido ao aporte d'água do rio Pinheiros por bombeamento para controle de enchentes.

O P2, ponto próximo ao local de captação de água para transposição, foi evidenciado por tendência a maiores concentrações de clorofila α principalmente durante a seca, incluindo neste período um valor de pico correspondente à condição hipereutrófica indicado pelo Índice de Estado Trófico - IET, apresentando também altas concentrações de fósforo total, que considerando ambos os períodos foram também significativamente maior em P2. Valores mais elevados de clorofila α merecem atenção, pois podem indicar a presença de cianotoxinas podendo comprometer o abastecimento público.

Em relação aos pontos de desembocadura tributária, o P3 - drenagem dos córregos Colônia e Vermelho - se destacou por apresentar na seca uma tendência a maiores concentrações na

água de nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrogênio total, sendo o único ponto neste período com valores de nitrogênio total em não conformidade com a legislação.

O P4 - drenagem do Córrego Taquacetuba - apresentou tendência a menores valores de oxigênio dissolvido, com amostras em desacordo com a legislação. Durante as chuvas, a tendência foi de menor condutividade elétrica e nitrato. Considerando os dois períodos de amostragem, o ponto P4 apresentou significativamente as maiores concentrações de fósforo total, exceto quando comparado ao P1.

Dentre os afluentes, P5 - drenagem do rio Monos - Barragem Guarani e P6 - drenagem do rio Curucutu - foram os que apresentaram as melhores condições ambientais, evidenciadas pela tendência a maiores concentrações de oxigênio dissolvido e menor turbidez nas águas durante a estação chuvosa. Porém, nas chuvas, excluindo P1, eles tenderam a apresentar maior concentração de nitrito e nitrato. O P5 e o P6 apresentaram o menor valor do Índice de Estado Trófico - IET, nas chuvas, sendo os únicos classificados como supereutrófico.

Esta pesquisa, pioneira na análise da qualidade da água nos locais amostrados próximos à foz dos principais afluentes do braço de Taquacetuba, permitiu concluir que há indícios de que os afluentes contribuem com o aporte de nutrientes para o Compartimento Taquacetuba. Mesmo com a indicação de pior qualidade da água no P1, com maior influência do bombeamento do rio Pinheiros nas chuvas, observamos que os pontos localizados nas saídas dos afluentes também apresentaram comprometimento na qualidade da água.

Tal estudo pode contribuir com medidas de gestão da qualidade da água subsidiando políticas públicas que levem em consideração a avaliação do uso e ocupação do solo no entorno desses afluentes, identificando potenciais fontes poluidoras que colaborem com o comprometimento da qualidade da água no Compartimento de Taquacetuba, bem como a implantação de Estratégias de controle de enchentes sem bombeamento de água do Rio Pinheiros para Billings.

1.7 REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas Ministério do Meio Ambiente e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - ANA / CETESB, 2011. Guia nacional de coleta e preservação de amostras água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos, Brasília, 326p. https://www.clean.com.br/downloads/Guia_Nacional_de_Coleta_e_Preservacao_de_Amostras_.pdf
- American Public Health Association – APHA. American Water Works Association – AWWA. Water Pollution Control Federation – WPCF, 2002. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed., 1085 p.). USA: AWWA. <https://www.awwa.org/Store/Product-Details/productId/65266295>
- Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo – ALESP, 1976. Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente (Decreto n.º 8.468, de 8 de Setembro de 1976). Diário Oficial do Estado de São Paulo, Poder Executivo, São Paulo, SP. <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html>
- Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo – ALESP, 1977. Dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976 (Decreto nº 10.755, de 22 de Novembro de 1977). Diário Oficial do Estado de São Paulo, Poder Executivo, São Paulo, SP. <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1977/decreto-10755-22.11.1977.html>
- Cardoso-Silva, S., Nishimura, P.Y., Padial, P.R., Mariani, C.F., Moschini-Carlos, V., e Pompêo, M.L.M., 2014. Compartimentalização e qualidade da água: o caso da Represa Billings. Bioikos (Campinas). (Online), 28, 31-43. <https://seer.sis.puc-campinas.edu.br/seer/index.php/bioikos/article/view/2522/1864>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2018. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo em 2017. Relatório anual de monitoramento ambiental. São Paulo: CETESB. 301 p. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2019. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo em 2018. Relatório anual de monitoramento ambiental. São Paulo: CETESB. 284 p. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2020. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo em 2019. Relatório anual de monitoramento ambiental. São Paulo: CETESB. 336 p. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>
- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, 2021. Monitoramento da qualidade de água. <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=43> and Dossiê Sistema Guarapiranga 2008. http://memoriasabesp.sabesp.com.br/acervos/dossies/pdf/9_sistema_guarapiranga.pdf
- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências (Resolução CONAMA nº 357, de 17 de Março de 2005). Diário Oficial da União [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>
- Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE, 2010. Portaria no. 2104 de 16 de setembro de 2010 de outorga à SABESP da concessão administrativa de reversão

- de águas para fins de abastecimento público do braço Taquacetuba para o Guarapiranga. São Paulo: DAEE. http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_content&id=68:outorgas
- Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. – EMAE, 2021. Elevatórias [online]. São Paulo: EMAE. <http://www.emaec.com.br/conteudo.asp?id=Elevat%C3%B3rias>
- Gargiulo, J.R.B.C., 2020. O Reservatório Billings. In: Pompêo, M.L.M., e Moschini-Carlos, V., orgs. Reservatórios que abastecem São Paulo: problemas e perspectivas (Cap. 6, pp. 63-81). São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. <http://ecologia.ib.usp.br/portal/publicacoes/>
- Gargiulo, J.R.B.C., Mercante, C.T.J., Brandimarte, A.L., e Menezes, L.C.B., 2016. Benthic macroinvertebrates as bioindicators of water quality in Billings Reservoir fishing sites (SP, Brazil). *Acta Limnol. Bras. Online* 28(0), e17. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2315>
- Gargiulo, J.R.B.C.; Pompêo, M.L.M.; Cardoso-Silva, S.; Petesse, M.L.; Menezes, L.C.B., 2022. Taquacetuba Compartment of Billings Reservoir (SP, Brazil): differential influence of the main water body and tributaries in the water quality. *Acta Limnologica Brasiliensia* [online], v. 34 [Accessed 31 March 2022], e4. Available from: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X1221> Epub 16 Mar 2022. ISSN 2179-975X.
- Hammer, Ø., 2021. PAST version. 3.0 - software for scientific data analysis [online]. Natural History Museum - University of Oslo. <https://www.nhm.uio.no/english/research/infrastructure/past/>
- Instituto Mamirauá, 2020. BIOESTAT v. 5.3 Programa de Estatística Para estudantes de graduação e pós-graduação, pesquisadores e professores [online]. Tefé: Instituto Mamirauá. <https://www.mamiraua.org.br/downloads/programas/>
- Lamparelli, M.C., 2004. Graus de Trofia em Corpos D'Água do Estado de São Paulo: Avaliação dos Métodos de Monitoramento [Tese de doutorado em Ciências]. São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde-20032006-075813/publico/TeseLamparelli2004.pdf>
- Mackereth, F.J.H., Heron, J., and Talling, J.F., 1978. Water analysis: some revised methods for limnologists. Kendall: Titus Wilson & Son Ltd. Freshwater Biological Association Scientific Publication, 117 p. <https://doi.org/10.1002/iroh.19790640404>
- Menezes, L.C.B., Gargiulo, J.R.B.C., e Monteiro-Junior, A.J., 2016. Qualidade da água em locais de pesca artesanal no complexo Billings, São Paulo. *Bioikos (Online)*, 30(1), 43-53. <https://seer.sis.puc-campinas.edu.br/seer/index.php/bioikos/article/view/3338/2421>
- Moschini-Carlos, V., Bortoli, S., Pinto, E., Nishimura, P.Y., Freitas, L.G., Pompêo, M.L.M., e Dorr, F., 2009. Cyanobacteria and Cyanotoxin in the Billings Reservoir (São Paulo, SP, Brazil). *Limnética (Online)*. 28(2), 273-282. <https://www.limnetica.com/en/node/495>
- Oliver, S L e Ribeiro, H., 2014. Variabilidade climática e qualidade da água do Reservatório Guarapiranga. *Estud. Av.* 28(82), 95-128. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142014000300007>
- Rutherford, A., 2001. Introducing ANOVA and ANCOVA: a GLM approach [online]. Thousand Oaks: Sage Publications Ltd. Introducing Statistical Methods series. https://www.researchgate.net/publication/246522459_Introducing_ANOVA_and_ANCOVA_a_GLM_approach
- São Bernardo do Campo. Prefeitura Municipal, 2017. Dispõe sobre permissão de uso de embarcação municipal para a Colônia de Pescadores Z-17 "Orlando Feliciano", e dá outras providências (Decreto nº 19.968, de 18 de Abril de 2017). Diário Oficial do Município, Poder Executivo, São Bernardo do Campo. <https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-bernardo-do->

[campo/decreto/2017/1996/19968/decreto-n-19968-2017-dispoe-sobre-permissao-de-uso-de-embarcacao-municipal-para-a-colonia-de-pescadores-z-17-orlando-feliciano-e-da-outras-providencias](#)

- Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo / Coordenadoria de Planejamento Ambiental. COBRAPE - Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. SMA / CPLEA, 2010. Relatório final: Faturamento da Elaboração do Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Reservatório. <http://pdpa.cobrape.com.br/Arquivos/Pdpas/PDPA-Billings.pdf>
- Sokal, R.R., and Rohlf, F.J., 2009. Introduction to biostatistics (2nd ed.). NY: Dover Public. 363 p. https://www.academia.edu/40164241/INTRODUCTION_TO_BIOS_TATIS_TIC_S_SECON_D_EDITION
- StatSoft, 2020. Statistica version 7.0 for Windows. University of Cape Town. <http://www.icts.uct.ac.za/statistica-windows>
- Strickland, J.D., and Parsons, T.R., 1960. A manual of sea water analysis. Bull. Fish Res. Bel. Can. 125, 1-185.
- Valderrama, J., 1981. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. Mar. Chem. 10(2), 109-122. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203\(81\)90027-X](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203(81)90027-X)
- Wengrat, S., Bicudo, D., 2011. Spatial evaluation of water quality in an urban reservoir (Billings Complex, Southeastern Brazil). Acta Limnol. Bras. 23(2), 200-216. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2011000200010>
- Wetzel, R.G., & Likens, G., 2001. Limnological analyses. 3rd ed. USA: Springer.
- Zar, J.H., 2010. Biostatistical analysis. 5th ed. NJ: Pearson Prent Hall.

1.8 MATERIAL SUPLEMENTAR

1.8.1 MS - Investigação Inicial de Resultados

Tabela MS 1: Estatística descritiva de dados abióticos da água (mg. L⁻¹): NHx: nitrogênio amoniacal; NO2: nitrito; NO3: nitrato; NT: nitrogênio total; PO4: ortofosfato; PT: fósforo total; Chl: clorofila α ; OD: oxigênio dissolvido. Além disso, pH: potencial de hidrogênio; Cond: condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$); UNT: turbidez (NTU: unidade nefelométrica de turbidez); Temp: temperatura (°C) e Prof: profundidade máx. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

N=36	NHx	NO2	NO3	NT	PO4	PT	Chl	OD	pH	Cond	UNT	Temp	Prof
Min	0.071	0.001	0.040	0.167	0.007	0.026	0.021	4.450	4.980	165.000	6.800	14.880	0.800
Max	2.371	0.028	0.477	3.050	0.029	0.073	0.172	6.840	6.820	299.000	25.600	24.960	4.000
Mean	0.361	0.008	0.225	0.619	0.015	0.047	0.078	5.933	6.055	197.194	13.392	20.223	2.478
Std. error	0.087	0.001	0.022	0.110	0.001	0.002	0.006	0.087	0.074	3.859	0.744	0.663	0.120
Stand. dev	0.520	0.006	0.133	0.658	0.005	0.014	0.037	0.521	0.443	23.151	4.464	3.979	0.719
Median	0.157	0.006	0.202	0.455	0.016	0.046	0.074	5.985	6.065	202.000	12.650	20.420	2.400
25 prcntil	0.120	0.005	0.107	0.277	0.012	0.033	0.047	5.700	5.900	182.000	10.200	16.985	2.000
75 prcntil	0.343	0.010	0.331	0.582	0.018	0.059	0.105	6.173	6.330	207.000	16.025	23.998	3.000

1.8.2 MS - Variação Espacial Vertical dos Parâmetros da Água

Tabela MS 2: Estatísticas descritivas de dados abióticos da água. Foram considerados os valores medidos na subsuperfície (S) e meio metro do fundo (B). Compartimento de Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

N = 36	Mean	Median	Minimum	Maximum	25 percentile	75 percentile	Range	Standard Deviation	Standard Error
Ammoniacal Nitrogen - S	0.317	0.137	0.074	2.354	0.116	0.233	2.280	0.480	0.080
Ammoniacal Nitrogen - B	0.361	0.156	0.071	2.371	0.120	0.315	2.299	0.520	0.087
Nitrite - S	0.008	0.006	0.001	0.030	0.005	0.010	0.029	0.006	0.001
Nitrite - B	0.008	0.006	0.001	0.028	0.005	0.009	0.028	0.006	0.001
Nitrate - S	0.215	0.204	0.035	0.497	0.109	0.298	0.462	0.122	0.020
Nitrate - B	0.225	0.201	0.040	0.477	0.109	0.328	0.437	0.133	0.022
Total Nitrogen - S	0.562	0.416	0.128	2.984	0.304	0.513	2.856	0.622	0.104
Total Nitrogen - B	0.619	0.455	0.167	3.050	0.280	0.578	2.883	0.658	0.110
Orthophosphate - S	0.017	0.014	0.007	0.036	0.013	0.020	0.029	0.006	0.001
Orthophosphate - B	0.015	0.016	0.007	0.029	0.013	0.018	0.021	0.005	0.001
Total Phosphorus - S	0.047	0.048	0.028	0.072	0.034	0.058	0.044	0.014	0.002
Total Phosphorus - B	0.047	0.046	0.026	0.073	0.034	0.058	0.047	0.014	0.002
Chlorophyll α - S	0.153	0.084	0.020	0.748	0.057	0.188	0.728	0.165	0.028
Chlorophyll α - B	0.078	0.074	0.021	0.172	0.048	0.103	0.150	0.037	0.006
Dissolved Oxygen - S	6.644	6.705	5.030	7.250	6.430	6.965	2.220	0.446	0.074
Dissolved Oxygen - B	5.933	5.985	4.450	6.840	5.720	6.155	2.390	0.521	0.087
pH - S	6.470	6.585	5.790	6.980	6.165	6.735	1.190	0.343	0.057
pH - B	6.055	6.065	4.980	6.820	5.910	6.330	1.840	0.443	0.074
Electric Conductivity - S	191.417	197.500	158.000	208.000	180.000	203.000	50.000	14.668	2.445
Electric Conductivity - B	197.194	202.000	165.000	299.000	182.000	207.000	134.000	23.151	3.859
Turbidity - S	9.011	9.050	4.800	14.800	7.300	10.100	10.000	2.397	0.399
Turbidity - B	13.392	12.650	6.800	25.600	10.300	15.650	18.800	4.464	0.744
Temperature - S	20.491	20.420	14.980	25.670	17.095	24.460	10.690	4.207	0.701
Temperature - B	20.223	20.420	14.880	24.960	16.990	23.995	10.080	3.979	0.663

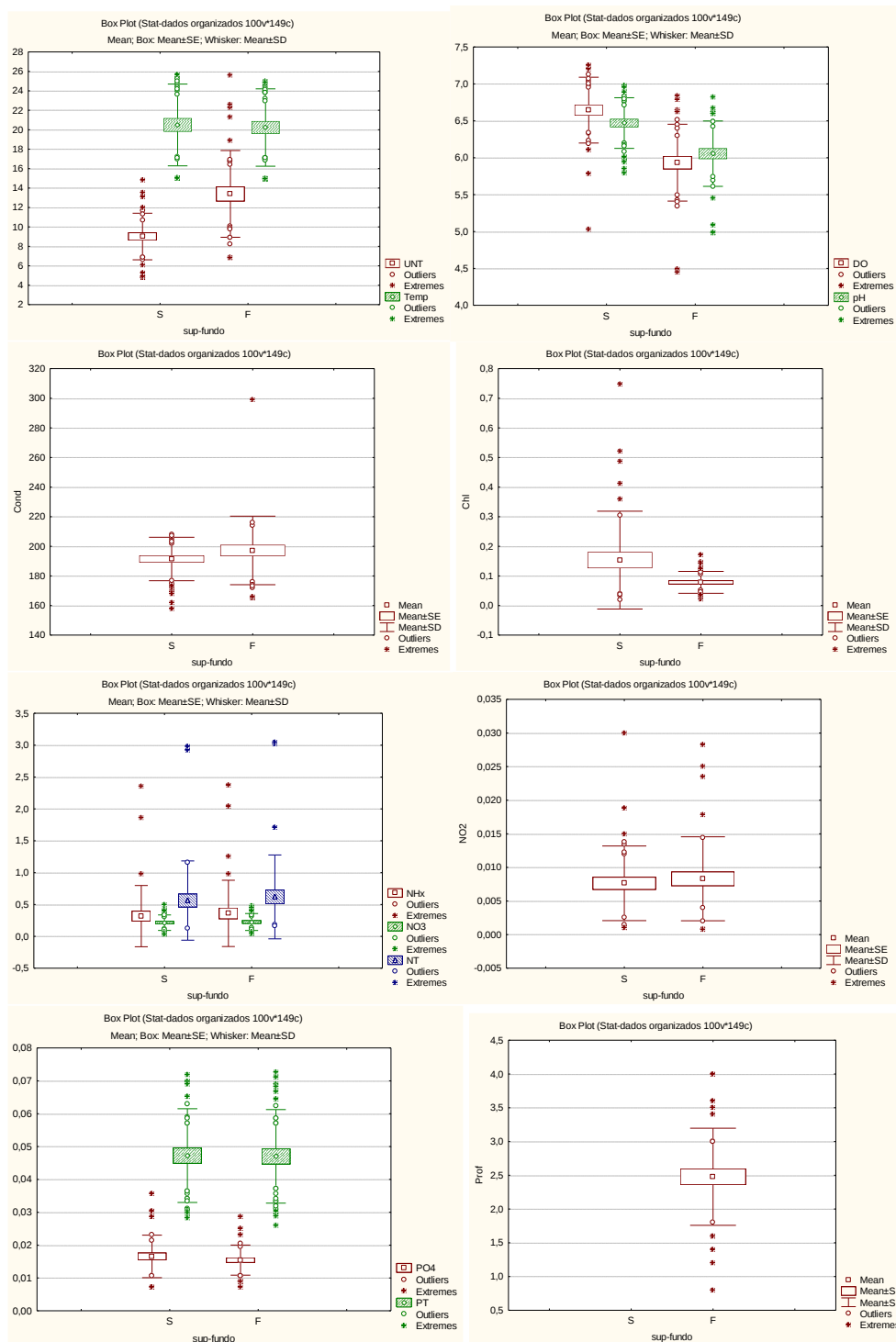


Figura MS 1: Variação dos dados abióticos da água. Foram considerados os valores medidos na subsuperfície (S) e meio metro do fundo (F). Gráficos de plotagem de caixa e bigode. Caixa: média $\pm$ erro padrão. Bigodes: média $\pm$ desvio padrão. Compartimento de Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

1.8.3 MS - Cálculo do Índice de Estado Trófico - IET

Foram consideradas as concentrações médias ($\mu\text{g.L}^{-1}$) de fósforo total (PT) e clorofila α (CL) de subsuperfície e meio metro do fundo para cada ponto ou período amostral investigado, de acordo com a CETESB (2020).

$$TSI (PT) = 10 * (6 - (1,77 - 0,42 * (\ln (PT) / \ln (2))));$$

$$TSI (CL) = 10 * (6 - ((0,92 - 0,34 * (\ln (CL)) / \ln (2))));$$

TSI final: média aritmética entre TSI (PT) e TSI (CL)

** = multiplicação*

Categoria do estado trófico:

TSI ultraoligotrófico ≤ 47 ; Oligotrófico $47 < TSI \leq 52$; Mesotrófico $52 < TSI \leq 59$;

Eutrófico $59 < TSI \leq 63$; Supereutrófico $63 < TSI \leq 67$ e Hipereutrófico $TSI > 67$

1.8.4 MS - Detalhes do Regulamento para Confronto de Resultados

Tabela MS 3: Limites para variáveis de água e sedimentos pela legislação e literatura

(1) CONAMA # 357 (2005), A área de estudo é classificada como água doce classe 1. Assim, devem ser observadas as seguintes condições e padrões de qualidade da água:
Oxigênio dissolvido não inferior a 6 mg.L^{-1} ;
Turbidez até 40 unidades de turbidez nefelométrica (NTU);
pH: entre 6,0 e 9,0;
Clorofila α não superior a $10 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$;
Fósforo total não superior a $0,020 \text{ mg.L}^{-1}$;
Nitrito: máximo $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$;
Nitrato: máximo $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$;
Nitrogênio amoniacal: $3,7 \text{ mg.L}^{-1}$, para $\text{pH} \leq 7,5$
Nitrogênio total: $1,27 \text{ mg.L}^{-1}$

1.8.5 MS - Tabela de correlação PCA

Tabela MS 4: Correlação de variáveis com os primeiros eixos da análise de componentes principais - PCA

Variáveis	Axis 1	Axis 2
Nitrito	0,2128	0,7995
Nitrato	0,7683	0,4177
Fósforo total	0,1749	0,6492
Clorofila	0,3338	-0,2795
Oxigenio Dissolvido	0,3987	-0,5232
pH	0,8124	-0,3013
Turbidez	0,3441	0,4579
Temperatura	-0,8112	0,2658

2 **CAPÍTULO 2: COMPARTIMENTO TAQUACETUBA DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP, BRAZIL): CONTRIBUIÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS E DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) - DADOS ABIÓTICOS DE SEDIMENTO**

2.1 **ABSTRACT**

Aim The research intended to evaluate the sediment quality of Taquacetuba Compartment, Billings Reservoir (Brazil), through analysis of abiotic sediment data. The Taquacetuba Compartment has multiple uses such as public water supply and professional fishing activity. **Methods:** Sampling at the compartment entrance, close to the water catchment point for transposition for public water supply and in the mouths of the main tributaries forming the Compartment. The collections were concentrated in the rainy and dry periods of 2017. **Results:** No evidence that could indicate environmental compromise was found. The mean concentrations of the parameters were in accordance with the legislation. Potentially toxic metals were below TEL and RRV, therefore toxicity was unlikely to occur. The totals sediment nitrogen and phosphorus were below the alert levels. The P1 - entrance to the compartment – unlike the other points, showed a worsening in the sediment quality in rainy season. P2 and P3 showed no evidence to indicate sediment contamination. The P4 - drainage from the Taquacetuba Stream - showed high concentrations of all abiotic parameters in both periods. P5 - drainage from the Monos River and P6 - drainage from the Curucutu River - were the ones that presented the best environmental conditions with tendency to higher concentrations of the parameters during the rainy season.

Key-works: metal, potential toxicity, nutrients, heterogeneity

2.2 **RESUMO**

Objetivo. A pesquisa objetivou avaliar a qualidade do sedimento do Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (Brasil), por meio da análise abiótica do sedimento. O Compartimento tem múltiplos usos como abastecimento público de água e pesca profissional. **Métodos:** Amostragem na entrada do compartimento, no ponto de captação de água para transposição para abastecimento público de água e na foz dos principais tributários formadores do Compartimento. Coletas concentraram-se nos períodos chuvoso e seco 2017. **Resultados** Nenhuma evidência que pudesse indicar comprometimento ambiental foi encontrada. As concentrações médias dos parâmetros estavam de acordo com a legislação. Os metais potencialmente tóxicos estavam abaixo dos limites TEL e VRR. Os totais de nitrogênio e fósforo do sedimento ficaram abaixo dos níveis de alerta. O P1 - entrada do compartimento - diferentemente dos demais pontos, apresentou piora na qualidade do sedimento no período chuvoso. O P2 e o P3 não apresentaram evidências que indicassem contaminação do sedimento. O P4 - drenagem do córrego Taquacetuba - apresentou altas concentrações de todos os parâmetros abióticos do sedimento em ambos os períodos. P5 - drenagem do rio Monos e P6 - drenagem do rio Curucutu - foram os que apresentaram as melhores condições ambientais com tendência a maiores concentrações dos parâmetros durante o período chuvoso.

Palavras-chave: metais, toxicidade potencial, nutrientes, heterogeneidade

2.3 INTRODUÇÃO

A Represa Billings (Estado de São Paulo, Brasil) apresenta uma forma dendrítica caracterizada por um corpo central alongado e oito compartimentos principais, além de numerosos tributários. O Billings é um dos mais importantes reservatórios do Estado de São Paulo devido às suas diversas funções ecológicas e múltiplos usos, que incluem a diluição de afluentes e esgoto doméstico, pesca artesanal profissional e amadora, abastecimento público de água, lazer e navegação de balsas e barcos, entre outros (Gargiulo, 2020).

O reservatório também é utilizado para a regulação hidráulica das enchentes do Rio Tietê na região urbana da cidade de São Paulo. Neste caso, para evitar inundações, durante as chuvas, quando o rio Tietê e de seu efluente, o rio Pinheiros, elevam o nível, as águas do rio Pinheiros são bombeadas para a represa Billings (EMAE, 2021). Devido à grande quantidade de esgoto urbano nas águas desses rios, que apresentam alto grau de eutrofização e presença de diversos contaminantes, tal bombeamento contribui para um aumento do estresse ambiental no sistema Billings (CETESB, 2018, 2019). O impacto do aumento pode afetar todo o reservatório Billings incluindo o Compartimento Taquacetuba onde está localizado o Sistema Produtor Taquacetuba-Guarapiranga. Este sistema transfere águas do Billings para o reservatório de Guarapiranga, o segundo maior reservatório para abastecimento público de água na Região Metropolitana de São Paulo.

Entre os vários contaminantes presentes no reservatório Billings, os metais são de preocupação especial devido à sua persistência, toxicidade e potencial de bioacumulação (considerando cada indivíduo ao longo do tempo) e, em alguns casos, biomagnificação (na cadeia trófica) (Torregroza-Espinosa et al, 2018). Embora existam algumas pesquisas com foco na concentração de metais e toxicidade nos sedimentos do reservatório Billings (Mariani & Pompêo, 2008; Cardoso-Silva et al., 2021), a área do Taquacetuba é pouco investigada,

levantando a questão sobre a possível entrada de metais por condutores tributários (Wang, 2012).

Os principais metais de interesse ambiental são cobre (Cu), zinco (Zn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e cromo (Cr), pois são os principais responsáveis pela toxicidade dos sedimentos (Shafie et al. 2013). A sequência de toxicidade na forma inorgânica desses metais é a seguinte: Cu > Zn > Ni > Pb > Cr (Luoma e Rainbow, 2008; Cardoso-Silva, 2016). Metais potencialmente tóxicos são distribuídos em vários compartimentos ambientais, principalmente no sedimento. O aumento da concentração de metais no meio ambiente está relacionado à atividade humana, como agricultura e indústria, que, por acumulação, causam contaminação ambiental, expondo a biota a riscos (Cardoso-Silva et al., 2016).

As ferramentas comumente aplicadas para investigar contaminação e toxicidade em sedimentos são: Valores de Referência Regionais - VRR que indicam concentração de metais naturais da região (Nascimento e Mozeto, 2008); e Valores Guias da Qualidade dos Sedimentos (VGQS) que indicam níveis de probabilidade de contaminação (CCME, 1999; CONAMA nº 454, 2012). Também está previsto na legislação níveis de alerta à eutrofização em relação à nutrientes (HPA, 2011; CONAMA nº 454, 2012).

De acordo com Frascareli et al. (2018), apenas uma fração da concentração de metais no sedimento está biologicamente disponível. A biodisponibilidade de metais envolve, em teoria, uma associação facilmente destrutiva entre metais e sedimentos (Sigg & Behra, 2005). Dessa forma, a análise de metais com potencial toxicidade e efeitos adversos à biota, deve ser incluída na pesquisa e monitoramento de todos os corpos d'água e, segundo Pompêo et al. (2013), especialmente em reservatórios com múltiplos usos incluindo abastecimento público e pesca profissional.

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar as condições do sedimento do Compartimento Taquacetuba por meio da análise de dados abióticos, incluindo metais potencialmente tóxicos. Pretendeu-se compreender a contribuição dos

afluentes e do corpo central do Reservatório Billings na qualidade do sedimento, incluindo um ponto amostral próximo à área de captação de água para transposição, visando abastecimento público. Especificamente, objetivamos: a) avaliar a variação espacial horizontal e temporal sazonal dos parâmetros do sedimento, e b) determinar a contribuição dos dados abióticos de sedimentos para as variações espaciais e temporais.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 *Área de estudo*

O Compartimento Taquacetuba da Represa Billings está localizado na divisa dos municípios de São Paulo e São Bernardo do Campo (Estado de São Paulo, Brasil). A figura 1 mostra os detalhes da localização da área de estudo, bem como dos pontos de amostragem (P): P1: entrada do braço Taquacetuba próximo ao corpo central do reservatório Billings (23 ° 48'11,5 "S 46 ° 37'33,1 "W); P2: próximo ao ponto de captação de água para transposição para o Reservatório de Guarapiranga para fins de abastecimento (23 ° 50'31,5 "S 46 ° 39'19,2" W); P3: drenagem dos riachos “Colônia” e “Vermelho” (23 ° 50'51,7 "S 46 ° 40'58,8" W); P4: drenagem do afluente “Taquacetuba” (23 ° 51'14,4 "S 46 ° 39'21,2" W); P5: drenagem do afluente do rio “Monos” em direção à área indígena “Guarani da Barragem” (23 ° 52'12,8 "S 46 ° 38'46,7" W); P6: drenagem do afluente do rio “Curucutu” em direção à área indígena Krukutu (23 ° 51'44,6 "S 46 ° 37'04,8"W). As legislações atuais para avaliação da qualidade das águas superficiais no Estado de São Paulo são: i) o Decreto n. 8.468 (ALSP, 1976), que define as classes de uso, e ii) o Decreto n. 10755 (ALSP, 1977), que apresenta o enquadramento dos corpos d'água para o Estado. O Compartimento Taquacetuba é classificado na classe 1, o que indica limites mais restritivos em relação à qualidade da água, pois seu uso está relacionado ao abastecimento público.

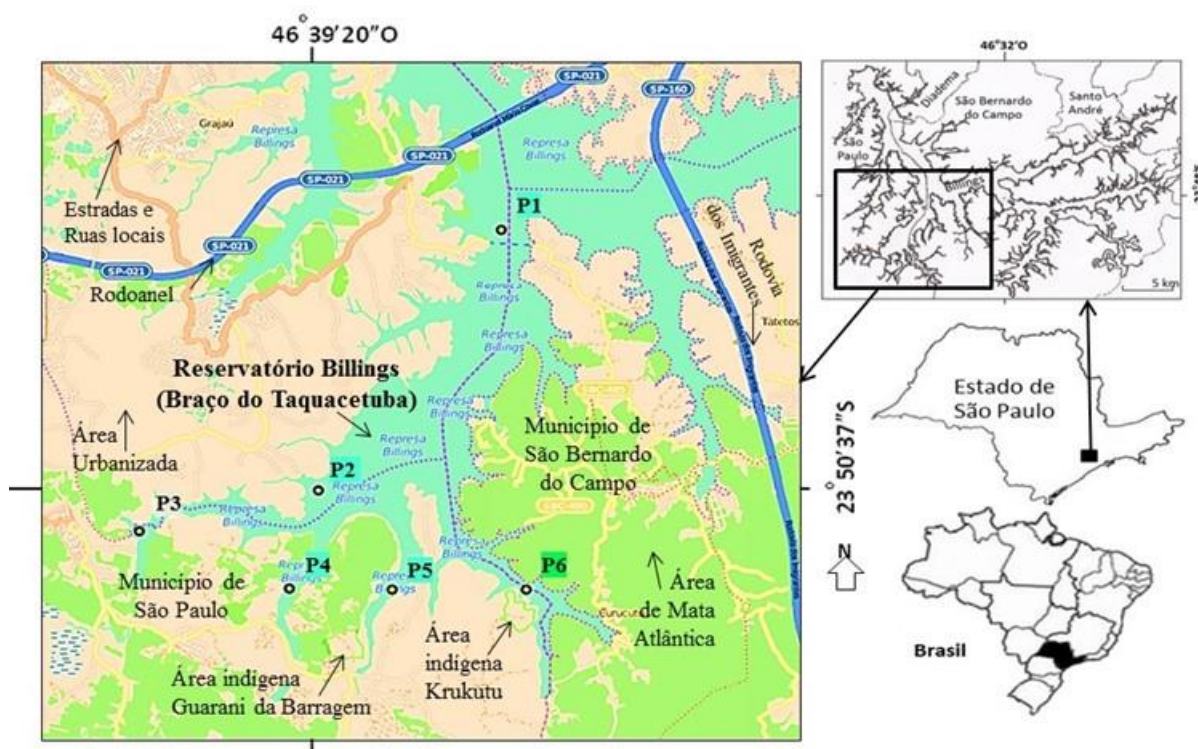


Figura 5: Área de estudo e localização dos pontos de amostragem (P) no Compartimento Taquacetuba do Reservatório Billings - Estado de São Paulo (Brasil): P1: entrada do Compartimento Taquacetuba, próximo ao corpo central do Reservatório Billings; P2: próximo ao local de captação de água para transposição com fins de abastecimento público. Além disso, áreas de drenagem tributária: P3: Córregos Colônia e Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; P6: Rio Curucutu.

2.4.2 Amostragem

A amostragem concentrou-se em dois períodos do ano: estação chuvosa (fevereiro de 2017) e seca (julho de 2017). Em cada período, foram realizadas três coletas com intervalo semanal entre elas. Assim, as coletas (C) de dados ocorreram em C1: 02/02/2017, C2: 08/02/2017, e C3: 15/02/2017 e em C4: 11/07/2017, C5: 18/07/2017 e C6: 25/07/2017. Os sedimentos da superfície (até aproximadamente 4,0 cm de profundidade no substrato) foram coletados com um pegador Ekman-Birge padrão de 225 cm² e acondicionados em frasco de polietileno.

2.4.3 Análise laboratorial

Imediatamente após a coleta, no Laboratório de Limnologia do Departamento de Ecologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo - campus capital da USP - Lablimno / USP, as amostras de sedimento foram selecionadas

em malha de 0,5 mm para exclusão de detritos como plásticos, gravetos e cascalho. Posteriormente, o sedimento foi seco em estufa a 50 ° C até não apresentar mais variação de massa. Em seguida, cada amostra foi moída e homogeneizada com almofariz de vidro e pilão. Porções das amostras foram separadas para determinar a) o nitrogênio total (NT), e b) metais potencialmente tóxicos e fósforo total (PT). O NT foi determinado pelo método do nitrogênio total Kjeldahl, de acordo com APHA et al. (2002). Para determinação dos metais e PT, o sedimento foi preparado utilizando o método 3050 B da série SW-846 da USEPA (1996), previamente descrito por Cardoso-Silva et al. (2016), que avalia a concentração de metais por meio de uma digestão ácida, capaz de dissolver praticamente todos os metais que poderiam estar biodisponíveis. Após o processamento, as amostras foram armazenadas a 4 ° C até a análise de Cu, Zn, Ni, Pb, Cr e PT por espectrofotometria de emissão atômica por plasma acoplado (ICP-OES) usando um instrumento Agilent Série 720 no Laboratório do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade “Júlio de Mesquita Filho” - ICT-UNESP, campus Sorocaba.

2.4.4 *Análise de dados*

As abordagens estatísticas seguiram os preceitos de Rutherford (2001), Sokal e Rohlf (2009) e Zar (2010). Todas as análises foram implementadas com os softwares STATISTICA 7.0 (StatSoft, 2020), Past 3.0 (Hammer, 2021) e Bioestat 5.3 (Instituto Mamiraua, 2020), executados em Windows 7.

2.4.4.1 *Investigação inicial dos resultados*

A investigação inicial dos dados, considerando todos os pontos e todas as coletas, foi realizada por meio de análise estatística descritiva (mínimo, máximo, média, desvio padrão e erro, mediana, percentis 25 e 75) apresentada como Material Complementar no item MS - Inicial Investigação de resultados (Tab.MS.1)

2.4.4.2 *Variação espacial e sazonal dos parâmetros do sedimento*

Uma análise gráfica por meio de *Box-and-whiskers Plot* foi utilizado para verificar a distribuição dos valores de cada parâmetro.

2.4.4.3 *Estatística univariada aplicadas a todas as variáveis*

Como estratégia para investigar as variações dos parâmetros tanto no espaço horizontal (entre os pontos amostrais) quanto sazonais (entre os períodos

amostrais), foi aplicada a cada parâmetro ANOVA two-way de medidas repetidas (via GLM). Neste caso, os fatores considerados foram os pontos de amostragem (seis níveis: P1 a P6) e os períodos de amostragem (dois níveis: chuvoso e seco). O teste de Tukey foi utilizado *post hoc* para individualizar as diferenças significativas dos fatores (pontos e períodos). Para atender aos requisitos do teste paramétrico, a normalidade e homogeneidade das variâncias dos resíduos foram verificadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. As transformações foram realizadas quando necessário: a) raiz quadrada: Cu, Zn, Ni, Pb, Cr e PT; b) $\log_{10}(x + 1)$: NT.

2.4.4.4 *Análise multivariada da qualidade do sedimento*

Para determinar a contribuição dos dados abióticos do sedimento na variação espacial e espacial, a análise de componentes principais - PCA - foi aplicada para ordenar as unidades de amostragem no espaço multidimensional nos dois períodos de amostragem com base na média das variáveis: Cu, Zn, Ni, Pb, Cr, NT e PT. A investigação por PCA foi realizada por meio de uma matriz de correlação devido às diferentes unidades de medida das variáveis físicas e químicas consideradas. Para interpretação da análise, foram consideradas as variáveis que apresentaram maior correlação com os dois primeiros eixos e que apresentaram explicabilidade total final superior a 50%.

2.4.4.5 *Normas para confrontamento dos resultados*

Os resultados das variáveis de sedimento foram confrontados com os padrões recomendados pelo CONAMA nº 454 (2012) para qualidade de sedimentos. Vale ressaltar que tal resolução é baseada em valores de VGQS para proteção da vida aquática e é composta por dois níveis de classificação, conforme CCME (1999), onde o Nível 1 é equivalente ao TEL (*Threshold Effect Level* / Limite Inicial de Efeito), também denominado ISQG (*Interim Sediment Quality Guidelines* / Diretrizes Provisórias de Qualidade de Sedimentos), abaixo do qual há menor probabilidade de efeito adverso à biota. O Nível 2 é equivalente ao PEL (*Probable Effect Level* / Nível de Efeito Provável), acima do qual há maior probabilidade de efeito adverso à biota, sendo incerto o efeito entre TEL e PEL. Essa resolução também coloca valores de alerta (corte) para NT e PT para subsidiar o monitoramento do processo de eutrofização, que são equivalentes aos limites fornecidos pela HPA (2011). Os dados também foram contrastados com os Valores de Referência Regionais (VRRs) de Nascimento e Mozeto (2008). Vide item MS – Detalhes do Regulamento para Confrontamento de Resultados (Tab.MS.2).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 *Variação espacial e sazonal dos parâmetros de sedimentos*

Em relação às variações dos parâmetros do sedimento (fig. 2), foram observadas diferenças significativas para todos os parâmetros na análise de interação entre pontos e período de amostragem. No entanto, as concentrações médias dos metais estavam de acordo com a legislação em vigor, com exceções observadas em P4 durante o período chuvoso, que apresentou concentrações médias de Ni acima de TEL (CCME, 1999; CONAMA # 454, 2012), porém abaixo de VRR (Nascimento e Mozeto, 2008), e também para Cr média acima de TEL e VRR, porém abaixo de PEL. O P1 em comparação aos demais pontos, durante a estação seca, apresentou concentrações significativamente menores de Cu, Zn e Ni. Durante as chuvas, P1 apresentou piora na qualidade do sedimento, com concentrações de Cu significativamente maiores que os demais pontos, exceto quando comparado ao P4. O estudo de Hortellani et al (2013) determinou provável contaminação de sedimentos por metais, com concentrações superiores às observadas neste estudo, esses autores concluíram que o compartimento tende a apresentar maiores concentrações de metais nas saídas tributárias em relação à entrada no compartimento, conclusão esta semelhante à deste estudo, especificamente com níveis mais elevados de metais no P4. Em relação à NT, o P4 apresentou concentrações médias acima do valor de alerta (corte) em ambos os períodos. P5 e P6 ficaram acima desse valor apenas no período de estiagem. Em relação ao PT, todas as amostras estavam de acordo com a legislação (HPA, 2011; CONAMA # 454, 2012).



Figura 6: Variação dos parâmetros do sedimento. Box-and-whiskers Plot gráficos de 25 e 75 percentis e medianas e whiskers mínimo e máximo. Detalhes estatísticos (cor vermelha): diferenças significativas entre asteriscos e elipses, de acordo com o padrão ANOVA: F: Fisher, valor p. Tabelas: mean: mediana, SD: desvio padrão e SE: erro padrão. Sendo (mg.kg⁻¹): Copper: Cobre; Zinc: Zinco; Nickel: Níquel; Lead: Chumbo; Chrome: Cromo; NTs: Nitrogênio Total do sedimento e PTs: Fósforo Total do sedimento. Pontos de Amostragem: P1: entrada do compartimento; P2: captação de água; P3: Colônia e Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; e P6: Rio Curucutu. Períodos de amostragem: Wet (W): Úmido e Dry (D): Seco. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

2.5.2 **PCA com dados abióticos do sedimento**

O resultado gráfico do sedimento PCA é mostrado na figura 3. Os primeiros dois eixos explicam 82% da variabilidade total dos dados. O primeiro eixo (69% da variabilidade) mostra a direção principal do aumento dos metais e nutrientes (PT e NT) no espaço multidimensional. Todos os parâmetros contribuem para a formação do eixo. Em relação aos pontos de amostragem, as maiores concentrações de metais e nutrientes pertencem ao ponto P4 em ambos os períodos e em parte a P5 e P6 no período de estiagem. As menores concentrações das variáveis medidas são observadas principalmente no período de seca no ponto P1. O P2 apresentou pouca variação entre os períodos, com concentrações intermediárias entre P1 e os demais pontos (P3, P4, P5 e P6) localizados nas áreas de afluentes, que apresentam maiores contribuições. O segundo eixo (13% da variabilidade) destaca a dispersão dos pontos de acordo com o período de amostragem, separando o chuvoso do seco. A separação não é tão marcada, pois vários pontos estão na área de intersecção das duas nuvens de dispersão (*convex hulls*). Isso ocorre porque o sedimento é um compartimento de acumulação e, portanto, não responde rapidamente à variação. Os elementos que mais contribuem para a formação do eixo são NT e Cr, que se correlacionam negativamente. No Material Suplementar está apresentada a tabela de correlação da PCA (Tab.MS.3).

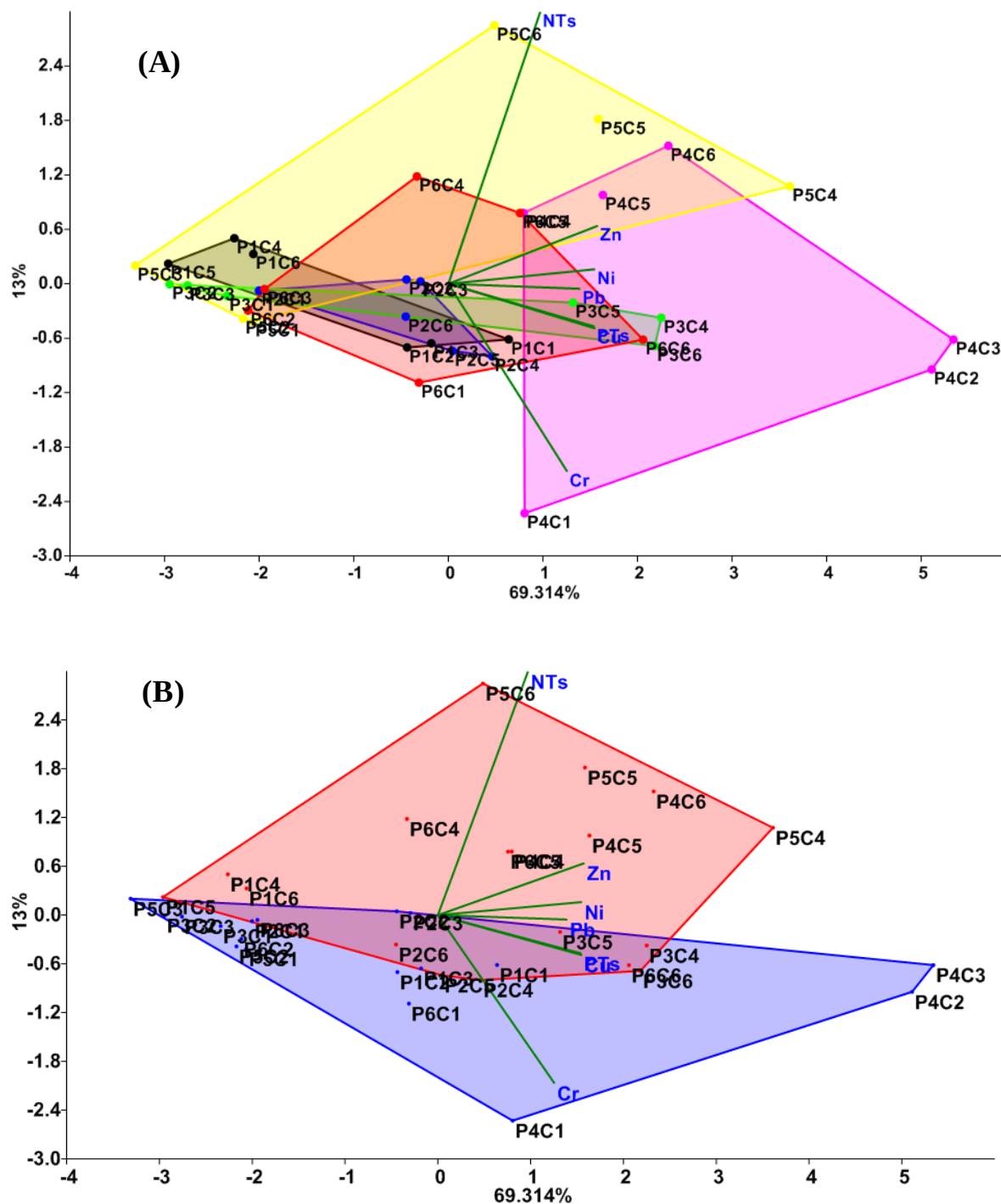


Figura 7: PCA com dados de sedimentos abióticos. Análise de componentes principais para verificar a ordenação dos pontos de amostragem (P) e coletas (C) em relação à intensidade da associação entre as variáveis abióticas (mg. Kg⁻¹): metais potencialmente tóxicos e NTs: nitrogênio total e PTs: fósforo total do sedimento. Cores das nuvens de dispersão (*convex hulls*): Gráfico (A): pontos de amostragem: preto: P1 - entrada do compartimento; azul: P2: captação de água; P3 verde: Colônia e Vermelho; rosa P4: Ribeirão Taquacetuba; P5 amarelo: Rio Monos - Barragem Guarani e P6 vermelho: Rio Curucutu. Gráfico (B): períodos de amostragem: azul: úmido e vermelho: seco. Compartimento de Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

2.6 CONCLUSÃO

O presente estudo, considerando todas as coletas, mostrou qualidade do sedimento semelhante entre os pontos de amostragem do Compartimento de Taquacetuba. Nenhuma evidência que pudesse indicar comprometimento ambiental foi encontrada. O P1 - entrada do compartimento - diferentemente dos demais pontos, apresentou piora na qualidade do sedimento no período chuvoso. Durante a estação seca, P1 apresentou significativamente os níveis mais baixos de indicadores de comprometimento da qualidade do sedimento. Esta conclusão é corroborada pelo fato da tendência de aumento da concentração, durante a estação chuvosa, de Cu, Zn, Ni, Pb, Cr e PT. Esse fato é explicado pela maior proximidade do P1 com o corpo central do reservatório Billings, que apresenta maior estresse ambiental no período chuvoso devido ao abastecimento de água do rio Pinheiros por bombeamento para controle de enchentes. O P2 – captação para transposição – e o P3 – drenagem dos tributários ribeirões Colônia e Vermelho, não apresentaram evidências que indicassem contaminação do sedimento. O P4 - drenagem do Córrego Taquacetuba- apresentou altas concentrações de todos os parâmetros abióticos do sedimento em ambos os períodos, porém a sugestão de entrada desses contaminantes independente do regime de chuvas não é suportada, pois somente durante o período chuvoso há tendência a maiores concentrações de nitrogênio total e, concentrações significativamente maiores de cobre, zinco, níquel, chumbo, cromo e fósforo total, sugerindo o carreamento desses contaminantes pelas chuvas, o que indica que o uso e ocupação do solo circundante contribuem para o aporte de contaminantes. O P5 - drenagem de o rio Monos e o P6 - drenagem do rio Curucutu - foram os que apresentaram as melhores condições ambientais, embora com tendência a maiores concentrações dos parâmetros durante o período chuvoso.

2.7 REFERÊNCIAS

- Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - USEPA. 1996. Método 3050B. Digestão ácida de sedimentos, lamas e solo. Revisão 2.
- American Public Health Association – APHA. American Water Works Association – AWWA. Water Pollution Control Federation – WPCF, 2002. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed., 1085 p.). USA: AWWA. <https://www.awwa.org/Store/Product-Details/productId/65266295>
- Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo – ALESP, 1976. Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente (Decreto n.º 8.468, de 8 de Setembro de 1976). Diário Oficial do Estado de São Paulo, Poder Executivo, São Paulo, SP. <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html>
- Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo – ALESP, 1977. Dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto n.º 8.468, de 8 de setembro de 1976 (Decreto n.º 10.755, de 22 de Novembro de 1977). Diário Oficial do Estado de São Paulo, Poder Executivo, São Paulo, SP. <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1977/decreto-10755-22.11.1977.html>
- Cardoso-Silva, S., Mizael, JOSS, Frascareli, D., Ferreira, PALF, Rosa, AH, Vicente, E., Figueira, RCL, Pompêo, MLM, Moschini-Carlos, V. 2021. Evidências paleolimnológicas ambientais mudanças em sete reservatórios subtropicais com base em metais, nutrientes e taxas de sedimentação. Catena, 206, art. não. 105432,
- Cardoso-Silva, S; Ferreira, PAL; Moschini-Carlos, V; Figueira, RCL; Pompeo, MLM. 2016. Acumulação temporal e espacial de metais pesados nos sedimentos da Represa Paiva Castro (São Paulo, Brasil). Ciências Ambientais da Terra (impressão), v. 75, p. 1-16.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2018. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo em 2017. Relatório anual de monitoramento ambiental. São Paulo: CETESB. 301 p. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2019. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo em 2018. Relatório anual de monitoramento ambiental. São Paulo: CETESB. 284 p. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>
- Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente - CCME. 1999. Diretrizes canadenses de qualidade de sedimentos para a proteção da vida aquática: tabelas de resumo. <http://st-ts.ccme.ca/>
- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 2012. Resolução n.º 454 que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob

- jurisdição nacional. Diário Oficial da União. Brasília. Disponível em <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=693>
- Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. – EMAE, 2021. Elevatórias [online]. São Paulo: EMAE. <http://www.emaec.com.br/conteudo.asp?id=Elevat%C3%B3rias>
- Frascareli, D; Cardoso-Silva, S; Mizael, JOSS; Rosa, AH; Pompêo, MLM; López-Doval, JC; Moschini-Carlos, V. 2018. Distribuição espacial, biodisponibilidade e toxicidade de metais em sedimentos superficiais de reservatórios tropicais, Brasil. Environ Monit Assess 190: 199 <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6515-8>
- Gargiulo, J.R.B.C., 2020. O Reservatório Billings. In: Pompêo, M.L.M., & Moschini-Carlos, V., orgs. Reservatórios que abastecem São Paulo: problemas e perspectivas (Cap. 6, pp. 63-81). São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. <http://ecologia.ib.usp.br/portal/publicacoes/>
- Hamburg Port Authority – HPA. 2011. Critérios para material dragado com foco especial na região do Mar do Norte. European Sediment Network <http://www.sednet.org>
- Hammer, Ø., 2021. PAST version. 3.0 - software for scientific data analysis [online]. Natural History Museum - University of Oslo. <https://www.nhm.uio.no/english/research/infrastructure/past/>
- Hortellani, MA., Sarkis, JES., Bezerra de Menezes, LC., Bazante-Yamaguishi, R., Pereira, ASA., Garcia, PFG., Maruyama, LS., Castro, PMG. 2013. Avaliação da concentração de metais nos sedimentos do reservatório Billings, Estado de São Paulo, sudeste do Brasil. Revista da Sociedade Brasileira de Química, v. 24, no. 1, pág. 58-67. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532013000100009>.
- Instituto Mamirauá, 2020. BIOESTAT v. 5.3 Programa de Estatística Para estudantes de graduação e pós-graduação, pesquisadores e professores [online]. Tefé: Instituto Mamirauá. <https://www.mamiraua.org.br/downloads/programas/>
- Luoma, SN and Rainbow, PS 2008. Metal Contamination in Aquatic Environments: Science and lateral management. Cambridge: Cambridge University. P.573
- Mariani, CF and Pompêo, MLM 2008. Metais com biodisponibilidade potencial em sedimentos de um ambiente polimítico tropical Reservatório do Rio Grande, Brasil. J Solo Sedimentos 8: 284-288
- Nascimento, MRL and Mozeto AA. 2008. Valores de referência para metais e concentrações de metais em sedimentos inferiores da bacia do rio tietê, sudeste do brasil. Soil and Sediment Contamination International Journal, 17: 3, 269-278 <http://dx.doi.org/10.1080/15320380802006996>
- 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. 2013. 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, p.104-119.
<https://geobrasiliensis.emnuvens.com.br/geobrasiliensis/article/view/364>
- Rutherford, A., 2001. *Introducing ANOVA and ANCOVA: a GLM approach* [online]. Thousand Oaks: Sage Publications Ltd. *Introducing Statistical Methods* series.
https://www.researchgate.net/publication/246522459_Introducing_ANOVA_and_ANCOVA_a_GLM_approach
- Shafie, NA. Aris, AZ. Zakaria, MP. Haris, H. Lim, WY. Isa, NM. 2013. Application of geoaccumulation index and enrichment factors on the assessment of heavy metal pollution in the sediments. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 48, p.182–190.
<https://doi.org/10.1080/10934529.2012.717810>
- Sigg, L ; Behra, R. 2005. Especiação e biodisponibilidade de metais traço em ambientes de água doce. In: AS Sigel, H .; Sigel, R .; (Ed). *Sistemas biológicos de íons metálicos*. Taylor & Francis Group, v.44, p.47-73.
- Sokal, R.R., & Rohlf, F.J., 2009. *Introduction to biostatistics* (2nd ed.). NY: Dover Public. 363 p.
https://www.academia.edu/40164241/INTRODUCTION_TO_BIOS_TATIS_TIC_S_SECON_D_EDITION
- StatSoft, 2020. *Statistica version 7.0 for Windows*. University of Cape Town.
<http://www.icts.uct.ac.za/statistica-windows>
- Torregroza-Espinosa, AC; Martinez-Mera, E.; Castaneda-Valbuena, D., Gonzalez- Marquez, LC; Torres- Bejarano, F. 2018. Nível de contaminação e distribuição espacial de metais pesados na água e sedimentos do reservatório de El Guájaro, Colômbia. *Boletim de Contaminação Ambiental e Toxicologia* 101: 61-67
- Wang, C; Liu, S; Zhao, Q; Deng, L; Dong, S. 2012. Variação espacial e avaliação da contaminação de metais pesados em sedimentos no reservatório de Manwan, rio Lancang. *Ecotoxicologia e Segurança Ambiental*. 82: 32–39 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.05.006>
- Zar, J.H., 2010. *Biostatistical analysis*. 5th ed. NJ: Pearson Prent Hall.

2.8 MATERIAL SUPLEMENTAR

2.8.1 MS - Investigação Inicial de Resultados

Tabela MS 1: Estatística descritiva de dados de sedimentos abióticos (mg. Kg⁻¹): Cu: cobre; Cr: cromo; Zn: zinco; Pb: chumbo; Ni: níquel; PTs: fósforo total do sedimento; NTs: nitrogênio total do sedimento. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

N=36	Cu	Cr	Zn	Pb	Ni	PTs	NTs
Min	0.228	0.187	0.104	0.884	0.130	20.483	269.977
Max	27.171	55.994	81.279	21.608	22.738	1551.362	19674.550
Mean	10.615	15.384	24.235	10.671	6.808	543.485	4665.926
Std. error	1.333	2.075	3.082	0.920	1.017	65.511	848.046
Stand. dev	7.999	12.452	18.490	5.522	6.104	393.064	5088.276
Median	11.748	13.589	20.970	10.888	4.912	399.114	2194.830
25 prcntil	2.173	7.368	7.686	5.596	2.736	262.095	937.320
75 prcntil	16.413	18.197	37.732	14.923	8.875	756.792	8842.890

2.8.2 MS - Detalhes de Normas para Confrontamento de Resultados

Tabela MS 2: Limites para variáveis de sedimento pela legislação e literatura

(2) CONAMA # 454 (2012) apresenta Valores Guia da Qualidade do Sedimento (VGQS) para proteção da vida aquática segundo o CCME (1999). Assim, em relação ao nível do material dragado [parâmetro] em mg.kg ⁻¹ de sedimento seco, para água doce:		
Metais Potencialmente Tóxicos	Nível 1 - abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota = TEL	Nível 2 - acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota = PEL
Cobre (Cu)	35,7	197,0
Cromo (Cr)	37,3	90,0
Zinco (Zn)	123,0	315,0
Chumbo (Pb)	35,0	91,3
Níquel (Ni)	18,0	35,9
As determinações de nutrientes para subsidiar o monitoramento do processo de eutrofização são apresentadas em valores de alerta (mg. Kg ⁻¹), conforme HPA (2011):		
Nitrogênio total Kjeldahl do sedimento = 4800,00		
Fósforo total do sedimento = 2.000,00		
(3) Valores de Referência Regional (VRR) de acordo com Nascimento e Mozeto (2008), para a subbacia do Alto Tietê, que abrange a área de estudo, sendo VRR ± desvio padrão em mg.kg ⁻¹ para:		
Cobre (Cu): 18,0 ± 6,0;		
Cromo (Cr): 36,0 ± 7,0;		
Zinco (Zn) = 82,0 ± 14,0;		
Chumbo (Pb): 61,0 ± 7,0;		
Níquel (Ni): 23,0 ± 6,0.		

2.8.3 MS - Detalhes da PCA

Tabela MS 3: Correlação das variáveis com os eixos

	PC 1	PC 2	PC 3
Cu	0.90929	-0.12471	-0.13651
Cr	0.73524	-0.52446	0.17523
Zn	0.92464	0.16214	-0.21447
Pb	0.81571	-0.01387	0.49731
Ni	0.90754	0.040648	-0.18073
PTs	0.90428	-0.11956	-0.14162
NTs	0.56824	0.75958	0.14083

3 CAPÍTULO 3: COMPARTIMENTO TAQUACETUBA DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP, BRAZIL): CONTRIBUIÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS E DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) – MACROINVERTEBRADOS BENTÔNICOS COMO BIOINDICADORES

3.1 ABSTRACT

Aim The research intended to evaluate the sediment quality of Taquacetuba Compartment, Billings Reservoir (Brazil), through analysis of benthic macroinvertebrate community. The Taquacetuba Compartment has multiple uses such as public water supply and professional fishing activity. **Methods:** Sampling at the compartment entrance, close to the water catchment point for transposition for public water supply and in the mouths of the main tributaries forming the Compartment. The collections were concentrated in the rainy and dry periods of 2017. **Results:** The Taquacetuba Compartment at all points had similar degree of impairment, corroborated by the presence of only semi-tolerant and tolerant organic pollution taxa, with P1 - entrance to the compartment - in the rainy season, unlike the other points, presenting worst environmental conditions.

Key-works Environmental impact, benthic macroinvertebrate, Tropical Reservoir

3.2 RESUMO

Objetivo A pesquisa pretendeu avaliar a qualidade do sedimento do Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (Brasil), por meio da análise comunidade de macroinvertebrados bentônicos. O Compartimento Taquacetuba tem múltiplos usos como abastecimento público de água e pesca profissional. **Métodos:** Amostragem na entrada do compartimento, próximo ao ponto de captação de água para transposição para abastecimento público e na foz dos principais afluentes que formam o compartimento. As coletas concentraram-se nos períodos chuvoso e seco de 2017. **Resultados:** O Compartimento Taquacetuba em todos os pontos apresentou grau de comprometimento semelhante, corroborado pela presença apenas de táxons semi-tolerante e tolerante a poluição orgânica, com P1 - entrada no compartimento - na época das chuvas, ao contrário dos outros pontos, apresentando piores condições ambientais.

Palavras-chave; impacto ambiental, macroinvertebrados bentônicos, reservatório tropical

3.3 INTRODUÇÃO

3.3.1 *O Reservatório Billings e Compartimento Taquacetuba*

O Reservatório Billings (Estado de São Paulo, Brasil) com formato dendrítico caracterizado por corpo central alongado e oito compartimentos principais além de inúmeros afluentes com funções ecológicas e usos múltiplos, que incluem a diluição de afluentes e esgoto doméstico, pesca profissional artesanal e amadora, abastecimento público, lazer e navegação de balsas, entre outros (Gargiulo, 2020). O reservatório também é utilizado para a regulação hidráulica das enchentes do Rio Tietê na região urbana da cidade de São Paulo. Nesse caso, quando as vazões provocadas pelas chuvas elevam o nível das águas do rio Tietê e de seu efluente, o rio Pinheiros, para evitar inundações, as águas deste último são bombeadas para a represa Billings. Devido à grande quantidade de esgoto urbano nas águas desses rios, que apresentam alto grau de eutrofização, tal bombeamento contribui para um aumento do estresse ambiental para o sistema Billings. O Compartimento Taquacetuba do reservatório Billings conta com o Sistema Produtor Taquacetuba-Guarapiranga, sistema em operação de captação de água, com fins de abastecimento público em diversas localidades da Região Metropolitana de São Paulo - RMSP.

3.3.2 *Comunidade de macroinvertebrados bentônicos como bioindicador*

A fauna bentônica é utilizada como um indicador da capacidade biogênica do sistema, desempenhando um papel importante na alimentação de peixes iliófagos (Gneri e Angelescu, 1951). O cálculo de índices de diversidade para a comunidade de macroinvertebrados bentônicos tem sido tradicionalmente utilizado, segundo Owen (1974), para inferir o grau de poluição de corpos d'água. Nas avaliações ecológicas e sanitárias de ecossistemas aquáticos, os invertebrados bentônicos são um dos grupos de organismos mais utilizados como indicadores da qualidade da água (Hellawell, 1986). Segundo Rosenberg e Resh (1993), os zoobentos são adequados para avaliação ecológica e sanitária porque são abundantes nos

sistemas aquáticos, têm capacidade de locomoção limitada, têm um ciclo de vida longo, estão diretamente expostos a impactos antrópicos, têm uma grande variedade de tolerâncias em vários graus e tipos de poluição, e permitem uma análise comparativa do ambiente antes e depois dos eventos impactantes. Os táxons mais representativos da comunidade bentônica, juntamente com análises de variáveis abióticas, fornecem um diagnóstico da qualidade da água, considerando que os macroinvertebrados bentônicos são considerados um dos melhores bioindicadores do grau de contaminação de ambientes aquáticos (Merritt e Cummins, 1996). A análise da estrutura e distribuição da comunidade bentônica é uma importante ferramenta ecológica para descrever mudanças temporais e espaciais (Callisto et al., 2005; Leal e Esteves, 1998; Mugnai et al., 2010). De acordo com Strungaru et al. (2021), os macroinvertebrados apresentam boa resposta em estudos como bioindicadores ecológicos, moldados por uma combinação sinérgica de fatores abióticos, enfatizando seu uso potencial como indicadores ecológicos confiáveis. A análise do zoobento por meio de grupos de tolerância à poluição orgânica é indicada (CETESB, 2018 e 2019), visto que a perturbação hidrológica é um filtro ambiental, permitindo a sobrevivência apenas de táxons com características de adaptação (Vineetha e Nandan, 2021). Assim, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar o Compartimento Taquacetuba por meio da análise da comunidade de macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores de qualidade ambiental.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 *Área de estudo*

O Compartimento Taquacetuba da Represa Billings está localizado na divisa dos municípios de São Paulo e São Bernardo do Campo (Estado de São Paulo, Brasil). A figura 1 mostra os detalhes da localização da área de estudo, bem como dos pontos de amostragem (P): P1: entrada do braço Taquacetuba próximo ao corpo central do reservatório Billings (23 ° 48'11,5 "S 46 ° 37'33,1" W); P2:

próximo ao ponto de captação de água para transposição para o Reservatório de Guarapiranga para fins de abastecimento público ($23^{\circ} 50'31,5''\text{S}$ $46^{\circ} 39'19,2''\text{W}$); P3: drenagem dos córregos “Colônia” e “Vermelho” ($23^{\circ} 50'51,7''\text{S}$ $46^{\circ} 40'58,8''\text{W}$); P4: drenagem do afluente “Taquacetuba” ($23^{\circ} 51'14,4''\text{S}$ $46^{\circ} 39'21,2''\text{W}$); P5: drenagem do afluente do rio “Monos” em direção à área indígena “Guarani da Barragem” ($23^{\circ} 52'12,8''\text{S}$ $46^{\circ} 38'46,7''\text{W}$); P6: drenagem do afluente do rio “Curucutu” em direção à área indígena Krukutu ($23^{\circ} 51'44,6''\text{S}$ $46^{\circ} 37'04,8''\text{W}$).

As legislações atuais para avaliação da qualidade das águas superficiais no Estado de São Paulo são: i) o Decreto n. 8.468 (ALSP, 1976), que define as classes de uso, e ii) o Decreto n. 10755 (ALSP, 1977), que apresenta o enquadramento dos corpos d'água para o Estado. O Compartimento Taquacetuba é classificado na classe 1, o que indica limites mais restritivos em relação à qualidade da água, pois seu uso está relacionado ao abastecimento público.

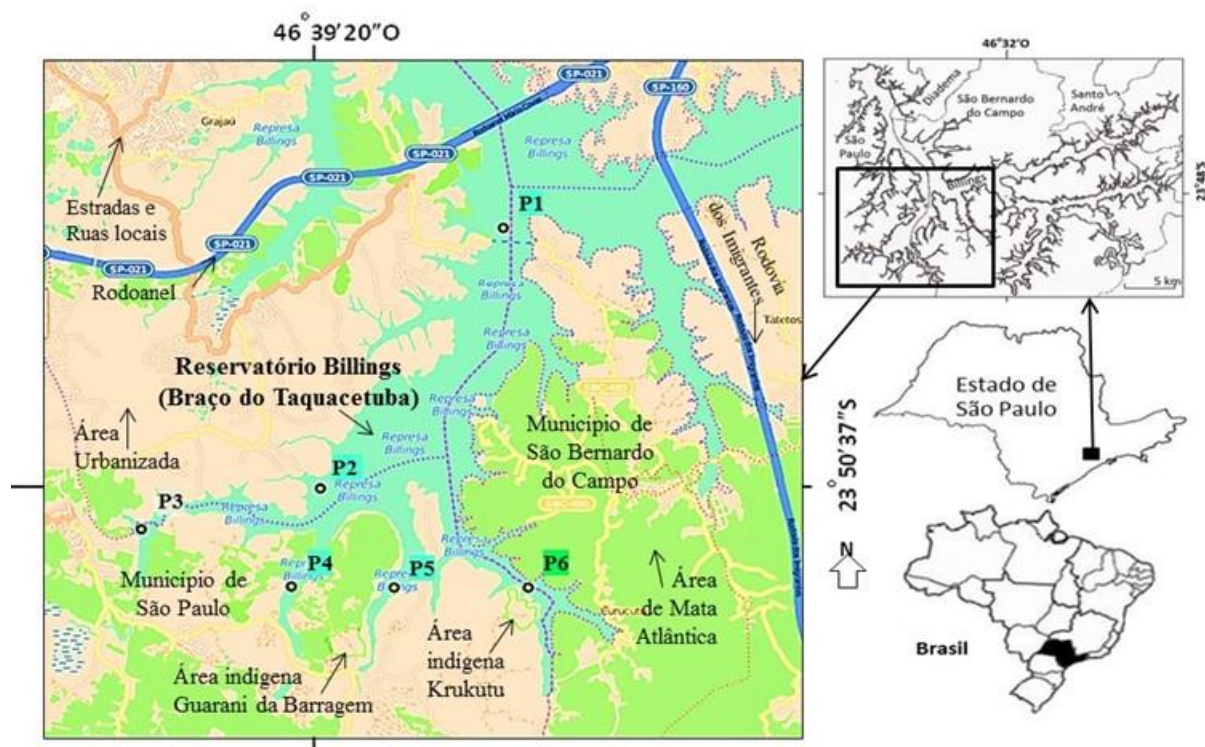


Figura 1: Área de estudo e localização dos pontos de amostragem (P) no Compartimento Taquacetuba do Reservatório Billings, Estado de São Paulo (Brasil): P1: Entrada do Compartimento Taquacetuba, próximo ao corpo central do Reservatório Billings; P2: próximo ao ponto de captação de água para transposição com fins de abastecimento público. Além disso, áreas de drenagem tributária: P3: Córregos Colônia e Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; P6: Rio Curucutu.

3.4.2 Amostragem

A amostragem concentrou-se em dois períodos do ano: em fevereiro de 2017, correspondente ao período chuvoso, e em julho do mesmo ano, correspondente ao período de seca. Em cada período, foram realizadas três coletas com intervalo semanal entre elas. Assim, as coletas (C) dos dados ocorreram em C1: 02/02/2017, C2: 08/02/2017, C3: 15/02/2017, C4: 11/07/2017, C5: 18/07/2017 e C6: 25/07/2017.

A amostragem ocorreu a menos de 5 metros da margem deposicional na zona sublitorânea, o sedimento de superfície (até aproximadamente 4 cm de profundidade no substrato) foi coletado com um pegador Ekman-Birge padrão de 225 cm² com um total de 3 lançamentos em cada ponto de amostragem e lavado em malha de 250 µm para excluir a porção argilosa do sedimento e separar a matéria orgânica total com organismos de interesse (ANA / CETESB, 2011; Brandimarte et al., 2015). Em seguida, essas amostras foram embaladas e preservadas em frascos de polietileno em solução de formalina (formaldeído 4%) para posterior análise. O sedimento obtido nos três lançamentos de amostrador em cada ponto de amostragem foi integrado para formar uma única amostra, conforme Pérez (1996),

3.4.3 Análise laboratorial

No Laboratório de Referência em Limnologia do Instituto de Pesca da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo - ULRL / IP / SP, as amostras foram flotadas conforme Brandimarte e Anaya (1998) para redução da porção arenosa. Seguido pela triagem dos organismos sob microscópio estereoscópico (aumento de 10 a 80 vezes), com identificação até o nível taxonômico necessário, que poderia ser utilizado como ferramenta bioindicadora, segundo Sawyer (1986), Borror e DeLong (1988), Pennak (1991), Merritt e Cummins (1996), Pérez (1996) e CETESB (2018). As espécies foram identificadas usando as chaves de Macan (1975), Borror e DeLong (1988), Pennak (1991), Merritt e Cummins (1996), Trivinho-Strixino e Strixino (1995), Pérez (1996) e Mugnai et al. (2010).

3.4.4 Análise de dados

As abordagens estatísticas seguiram os preceitos de Rutherford (2001), Elliott (1977), Sokal e Rohlf (2009) e Zar (2010). Todas as análises foram implementadas com os softwares STATISTICA 7.0 (StatSoft, 2020), Past 3.0 (Hammer, 2021) e Bioestat 5.3 (Instituto Mamiraua, 2020), executados em Windows 7.

3.4.4.1 Investigação inicial dos resultados

A investigação inicial dos dados bióticos, considerando todos os pontos e todas as coletas, também foi realizada por meio de análise estatística descritiva (mínimo, máximo, média, desvio padrão e erro, mediana, percentis 25 e 75) apresentada como Material Complementar no item MS - Investigação inicial dos resultados (Tab.MS.1).

3.4.4.2 Estatísticas Univariadas

Como estratégia para investigar as variações espacial horizontal e temporal sazonal, foi aplicada a ANOVA *two-way* de medidas repetidas (via GLM) às métricas consideradas para o estudo. Neste caso, os fatores considerados foram os pontos de amostragem (seis níveis: P1 a P6) e os períodos de amostragem (dois níveis: chuvoso e seco). O teste de Tukey foi utilizado *post hoc* para individualizar as diferenças significativas dos fatores. Para atender aos requisitos do teste paramétrico, a normalidade e homogeneidade das variâncias dos resíduos foram verificadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente.

3.4.4.3 Comunidade de macroinvertebrados bentônicos como bioindicador

Como estratégia para esta investigação, segundo Elliott (1977), Ricklefs (2011), Begon et al. (2007), Odum e Gary (2008), foram determinadas as métricas descritas a seguir, com detalhamento dos cálculos contidos no item de Material Suplementar MS - Cálculo de Índices Bióticos: a) densidade relativa como o número de indivíduos por táxon encontrado em cada amostra calculada por metro quadrado; b) abundância relativa à porcentagem de cada táxon por ponto e coleta de amostra e por grupos de táxons organizados de acordo com o grau de tolerância

à poluição orgânica (CETESB, 2018), representando os grupos: (i) tolerante e (ii) semi - tolerante; c) diversidade de Shannon-Weaver (H') pelo padrão logarítmico de base 2 (Bits); d) Riqueza (S') expressa como o número total de táxons, com identificação dos organismos até o nível taxonômico que foram bioindicadores da qualidade da água; e) uniformidade de Pielou ($U' = J'$) mostrando a distribuição dos indivíduos por táxon em cada amostra; e f) dominância de Simpson (C') mostrando a representatividade dos táxons em relação ao número total de indivíduos em cada amostra. As apresentações dos resultados dessas análises seguiram por gráficos de barras e *Box-and-whiskers Plot*.

3.4.4.4 *Influência de grupos taxonômicos nas variações espaciais e sazonais*

Para esta investigação, foram utilizados dados sobre as densidades relativas (organismos.m⁻²) de cada táxon em cada ponto e período de amostragem. Para facilitar a visualização desses dados, os gráficos dessas variações são apresentados como Material Suplementar no item MS - Variação das Densidades Relativas dos Táxons e Grupos de Táxons (Fig.MS.1 e MS.2)

A influência dos táxons nas variações espaciais e sazonais foi investigada a partir da avaliação conjunta dos resultados de três estratégias estatísticas: (1) análise nMDS - escalonamento multidimensional não-métrico usado para verificar a ordenação de pontos e coletas quanto à distribuição de similaridade dos táxons zoobentos. Para este processo, foi utilizada a medida de distância por dissimilaridade de Bray & Curtis (1957), e esta é indicada para medidas de densidades relativas (organismos por metro quadrado). Antes da análise, as transformação de Hellinger foram aplicadas aos dados para obter nível de tensão (*Shepard plot-stress*) inferior a 0,2. Esta transformação foi escolhida por permitir o ajuste dos dados com muitas observações (valores) iguais a zero (= 0), situação que ocorria uma vez que alguns táxons foram encontrados apenas em alguns pontos e / ou para algumas coletas. Os detalhes do cálculo dessa transformação estão relatados no Material Suplementar item MS – Cálculo para a Transformação de Hellinger; (2) O teste não paramétrico ANOSIM - *ANalysis Of Similarities* foi

aplicado para verificar as diferenças na distribuição de similaridade apresentada pelo nMDS. Este teste é usado para testar diferenças significativas entre dois ou mais grupos (Clarke, 1993). Nesse caso, foi aplicada a medida de distância de DISSIMILARIDADE de Bray & Curtis (1957), como na análise de nMDS, com permutação de $N = 9999$. O resultado da estatística ANOSIM é indicado por R e varia entre 0 e 1, sendo significativo quando $p < 0,05$. Quanto mais próximo o valor R se aproxima de zero, maior será a similaridade entre os grupos (sem separação entre os grupos). Portanto, este teste é um reflexo da DISSEMELIHANÇA. O teste *post hoc* de Bonferroni foi aplicado em comparações ponto a ponto entre todos os pares de grupos; e (3) SIMPER - análise por porcentagem de SIMilaridade foi aplicada para verificar quais dos principais táxons foram responsáveis pela diferença observada entre grupos de amostras (Clarke, 1993), com medida de distância de dissimilaridade de Bray & Curtis (1957),

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 *Abundâncias e Densidades de Táxons Bioindicadores*

A Figura 2 mostra as abundâncias relativas à porcentagem de táxons bioindicadores para cada coleta em cada ponto de amostra (fig.: 2A), e as abundâncias de grupos de táxons (fig.: 2B) de acordo com o grau de tolerância à poluição orgânica e táxon exótico encontrado, segundo com CETESB (2018, 2019) e Mandaville (2002), sendo: a) TOLERANTE: Naididae (Ehrenberg, 1828) e Pomacea (Perry, 1811); b) SEMI-TOLERANTE: Chironomini (Zavřel, 1917; Newman, 1834), *Helobdella stagnalis* (Linnaeus, 1758), Tanypodinae (Skuse, 1889; Kieffer, 1906), Ceratopogonidae (Newman, 1834) e Chaoborus (Lichtenstein, 1800); e c) EXOTIC: Corbicula (Megerle von Mühlfeld, 1811). O táxon Corbicula foi mantido separado dos demais, para evidenciar a presença de um táxon exótico, mesmo sendo tolerante, não representou variação nos

resultados estatísticos quando adicionado aos demais do grupo tolerante, dada sua baixa densidade e presença pontual em poucas coletas e pontos de amostragem.

De acordo com a figura 2A, Naididae, Chironomini e Chaoborus foram os únicos táxons encontrados em todos os pontos de amostragem durante os dois períodos, com densidade média, considerando todos os pontos e coleções, acima de 19 organismos por metro quadrado, em comparação a outros grupos com médias abaixo de 8, indicando pouca representatividade destes outros grupos. A presença considerável desses três táxons resistentes à poluição orgânica, associada à ausência de táxons sensíveis à poluição, sugere uma situação de comprometimento ambiental em todos os locais e períodos analisados, dadas as características de bioindicação desses grupos que indicam águas eutrofizadas (Merritt e Cummins, 1996; Pérez, 1996). O ponto P3 foi o único a apresentar Tanypodinae nos dois períodos, mas não difere estatisticamente dos demais. Os demais táxons, Ceratopogonidae, Pomacea e *Helobdella stagnalis* foram observados em baixa densidade apenas em P1, com ocorrência de *H. stagnalis* principalmente em P1, embora tenha sido observado também em P4. Essa situação mostra uma tendência de diferenciar P1 dos demais pontos, investigados nas abordagens subsequentes. A ausência de organismos sensíveis à poluição orgânica neste estudo difere das observações nas mesmas épocas do ano por Menezes et al. (2016) entre 2009 e 2010 em localidades próximas às localidades de P1 e P2 da presente pesquisa. Esses autores identificaram Ephemeroptera Polimitarcyidae, considerados sensíveis (CETESB, 2018), em locais classificados pelos autores como supereutróficos. Gargiulo et al. (2016) também identificaram Polimitarcyidae entre 2012 e 2013 em local classificado pelos autores como hipertrófico, próximo ao P2. A presença desses organismos sensíveis em locais de elevado grau de trofia, especialmente hipertrofia, pode sugerir que eles foram possivelmente transportados por tributários do braço de Taquacetuba. Porém, a ausência desses organismos no presente estudo, inclusive na foz dos afluentes (P3 ao P6), sugere uma piora na qualidade da água dos afluentes ao Taquacetuba,

principalmente porque P1 e P2 não diferiram em relação ao grau de trofia das citações acima, que realizaram cálculos com os mesmos métodos utilizados neste estudo. Diferenças significativas nas densidades relativas para táxons foram observadas para zoobentos entre pontos ou períodos apenas ao agrupar táxons por grau de tolerância à poluição. O grupo TOLERANTE não apresentou diferenças significativas. No entanto, o grupo SEMI-TOLERANTE apresentou diferenças entre os pontos da amostra (Friedman: $\text{Chi}^2 = 13,069$; $p = 0,023$), com P3 tendo uma densidade maior de SEMI-TOLERANTE diferindo de P4 (Wilcoxon - post hoc entre P3 e P4: $T = 0,0$; $Z = 2,023$; $p = 0,043$). Em relação à diferença entre os períodos, o período chuvoso foi caracterizado por uma densidade maior do que o período seco (Wilcoxon: $T = 26,5$; $Z = 2,367$; $p = 0,018$). Porém, esta situação não corrobora a consideração de melhor qualidade ambiental nos locais e períodos com maior presença de semi-tolerantes.

3.5.2 Índices Bióticos

Em relação aos índices bióticos (fig. 3), diferenças significativas na variação foram observadas apenas no espaço horizontal para densidade total de organismos e riqueza de táxons. Maior densidade foi encontrada em P1 e P3 em relação a P4 e em P3 em relação a P6. Para riqueza, P1 apresentou maior número de táxons do que P3, P4, P5 e P6. Não foram observadas diferenças significativas para diversidade, uniformidade ou dominância. Os resultados dessas métricas mostraram que P1, considerando os dois períodos de amostragem, apresentou densidade e riqueza significativamente maiores que os demais pontos. No entanto, mostrou, durante o período chuvoso, em relação ao período seco, uma tendência à menor diversidade e maior dominância.

Esses observados evidenciaram uma melhor condição ambiental no período de seca no P1, confirmando a influência negativa do bombeamento da água do rio Pinheiros no período de chuvas, dada a proximidade deste ponto ao corpo central da Billings, estar mais sujeito a esta situação desfavorável, afetando a manutenção da qualidade da água e sedimentos no reservatório.

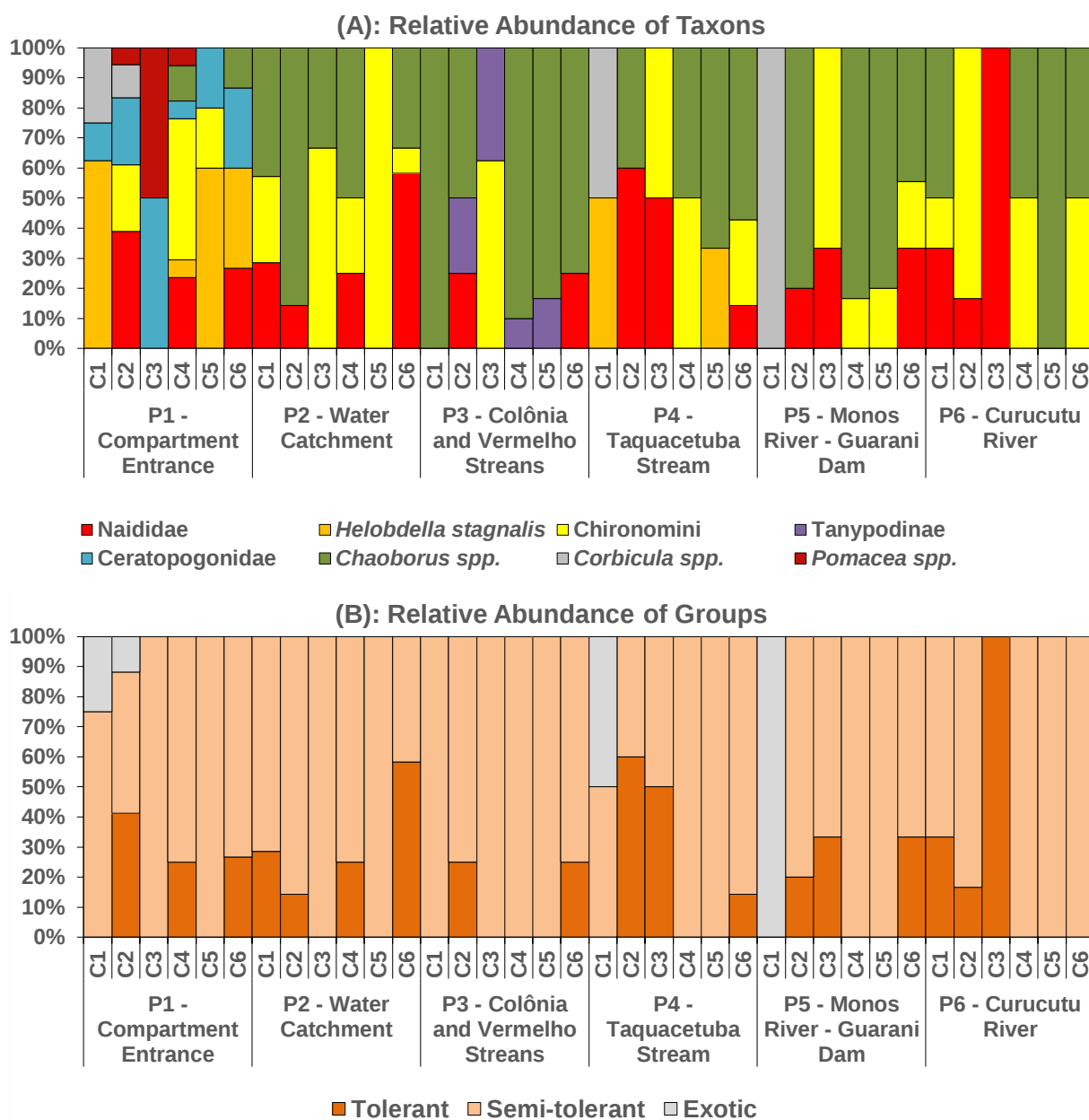


Figura 2: Abundâncias relativas de Zoobentos por pontos de amostra (P) e coletas (C) de Táxons bioindicadores (A) e Grupos (B) de táxons indicadores do grau de tolerância à poluição orgânica e táxon exótico. *Tolerant*: Tolerantes: Naididae e Pomacea; *Semi-tolerant*: Semi-tolerantes: Chironomini, *Helobdella stagnalis*, Ceratopogonidae, Tanypodinae e Chaoborus e *Exotic*: Exótico: Corbicula. P1: entrada do compartimento; P2: captação de água; P3: Colônia e Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; e P6: Rio Curucutu. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

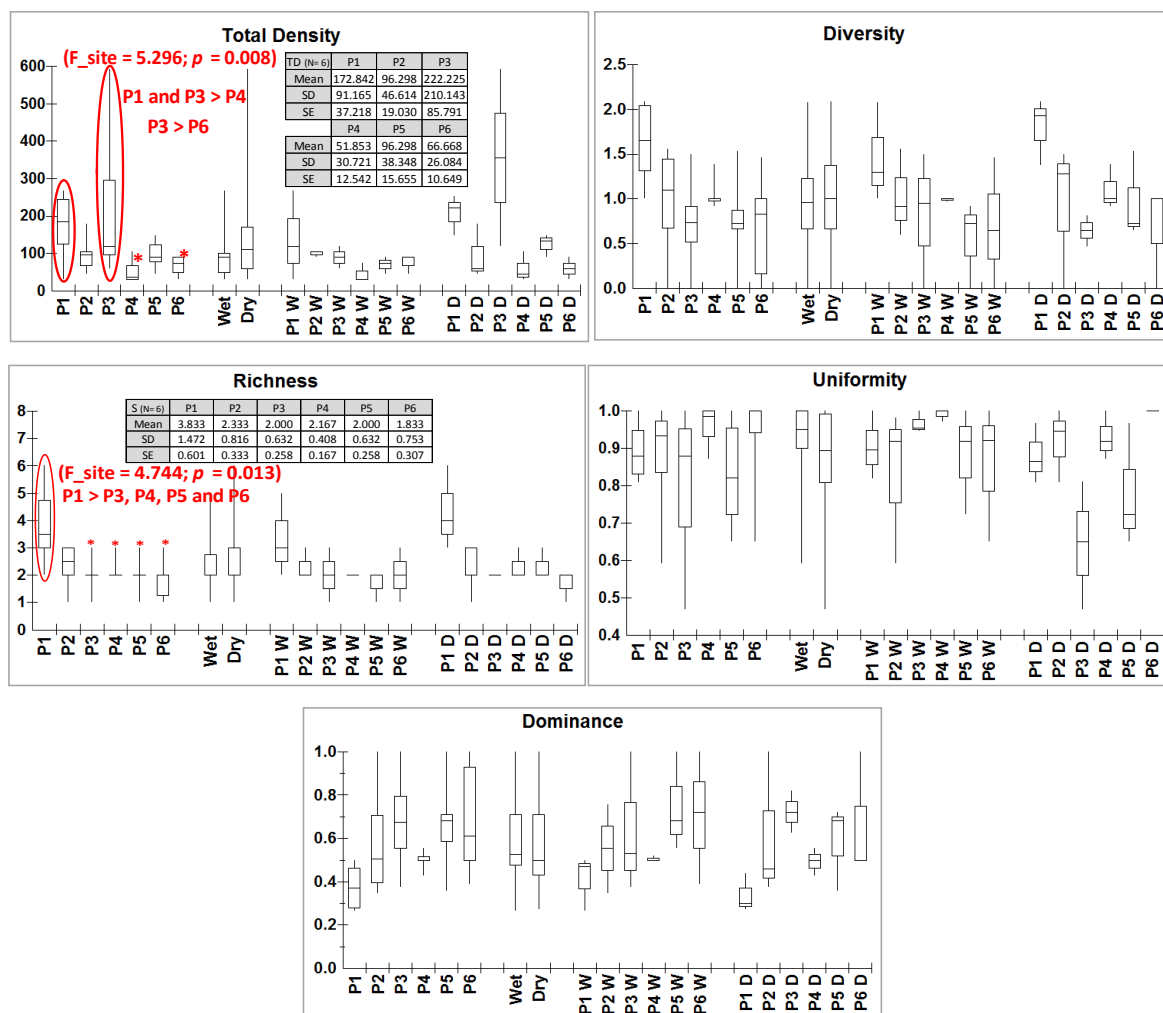


Figura 8: Variações dos índices bióticos. Gráfico *Box-and-whiskers Plot* de percentis 25 e 75 e medianase *whiskers* mínimo e máximo. *Total Density*: Densidade total (organismos/m²); *Diversity*: Diversidade; *Richness*: Riqueza; *Uniformity*: Uniformidade e *Dominance*: Dominância. Detalhes estatísticos (cor vermelha): diferenças significativas entre asteriscos e elipses, de acordo com o padrão ANOVA: F: Fisher, valor p. Tabelas: *mean*: mediana, SD: desvio padrão e SE: erro padrão. Pontos de Amostragem: P1: entrada do compartimento; P2: captação de água; P3: Colônia e Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; e P6: Rio Curucutu. Períodos de amostragem: W: úmido e D: seco. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

3.5.3 *Influência dos táxons nas variações espaciais e sazonais*

A análise nMDS apresentada na figura 4 teve um nível de tensão (Shepard plot-stress) inferior a 0,2, embora estivesse muito próximo deste valor. O estresse para a análise entre os pontos amostrais foi igual a 0,189 e para a análise entre os períodos foi igual a 0,191. Portanto, as representações gráficas podem ser consideradas reproduções fiéis da dissimilaridade (Bray & Curtis, 1957) dos dados originais. A grande sobreposição de polígonos indica uma baixa dissimilaridade tanto entre os pontos de amostra (fig. 4A) e entre os períodos de amostra (fig. 4B). A variação espacial mostrou que apenas uma tendência proeminente em P1 (entrada do compartimento) sugere uma maior dissimilaridade desta característica em relação aos demais pontos amostrais.

O resultado do ANOSIM, de Bray & Curtis (1957), apresentou $R = 0,1511$, com valor de $p = 0,0037$, e o teste post hoc de Bonferroni indicou que P1 foi significativamente distinto de todos os outros pontos de amostragem, corroborando com significância a tendência de dissimilaridade de P1 destacada nos resultados do gráfico nMDS. Não houve diferenças significativas nas diferenças entre os períodos.

A análise SIMPER foi usada para determinar as contribuições individuais de cada táxon, uma vez que ANOSIM indicou diferenças na densidade relativa de zoobentos entre os pontos de amostra. Os resultados são mostrados na tabela 1. A dissimilaridade total média (Bray & Curtis, 1957) entre todos os pontos foi de 61,88%. Os táxons que mais contribuíram (destacados em amarelo na tabela) para a dissimilaridade (média > 10) entre os pontos de amostra foram os organismos semitolerantes à poluição orgânica, Chaoborus e Chironomini, e os tolerantes Naididae. Este último é o principal tolerante observado nesta pesquisa, pois apresenta maior densidade relativa ao longo dos pontos e coletas de amostras. No entanto, ao analisar os resultados especificamente para o ponto de amostra P1 (indicado pela coloração verde na tabela), parece que os táxons que mais contribuem (indicados por números vermelhos na tabela) são Ceratopogonidae,

Helobdella stagnalis, Naididae e Chironomini. Tal resultado é consequência da ocorrência exclusiva neste ponto de Ceratopogonidae e Pomacea e, quase exclusivamente de *Helobdella stagnalis*, com exceção de exemplar no ponto amostral P4.

Em contraste, como Naididae e Pomacea são táxons tolerantes à poluição (valores sublinhados na tabela), é possível visualizar uma sequência de contribuições para a dissimilaridade dos pontos de amostra em relação apenas aos táxons tolerantes (sublinhados na tabela) como segue: P1> P2> P6> P4> P5> P3. Na relação semitolerante, Chaoborus, Chironomini, *Helobdella stagnalis*, Ceratopogonidae e Tanypodinae foram os seguintes: P1> P3> P2> P4> P6> P5. Assim, P1 mostrou-se mais dissimilar em relação aos demais pontos, tanto em relação aos organismos tolerantes quanto semitolerantes. Então, a análise SIMPER, em relação à contribuição de cada táxon dadas suas densidades relativas, corrobora o significativo distinção de P1 em relação aos outros pontos da amostra, com contribuição principalmente dos tolerantes Naididae e Pomacea e, dos semi-tolerantes Chironomini, *H. stagnalis* e Ceratopogonidae.

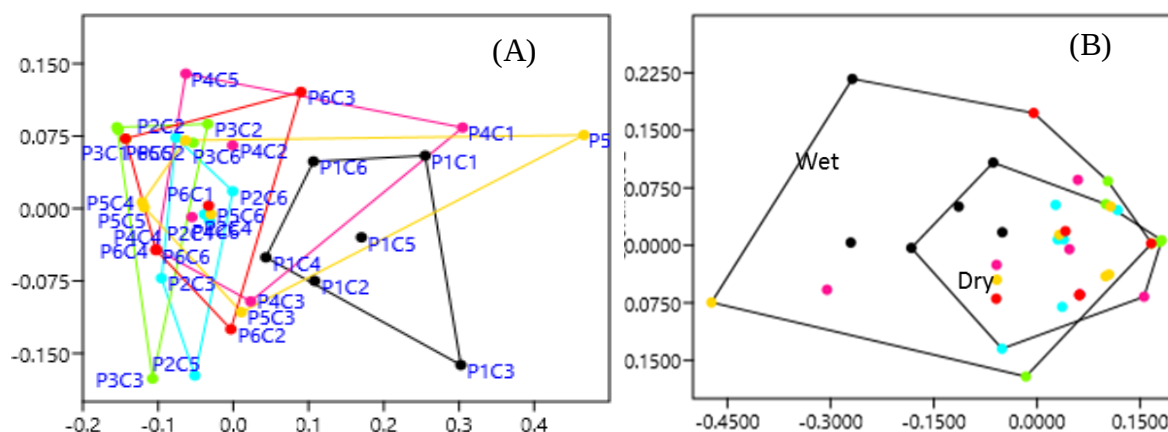


Figura 49: Resultado do gráfico nMDS mostra os polígonos que representam os pontos de amostragem (A) e os períodos chuvoso e seco (B). Onde, cores: preto: P1 - entrada do compartimento; azul: P2: captação de água; P3 verde: Colônia e Vermelho; rosa P4: Ribeirão Taquacetuba; P5 amarelo: Rio Monos - Barragem Guarani e P6 vermelho: Rio Curucutu. Compartimento da Represa Billings de Taquacetuba (SP).

Tabela 1: Resultado de SIMPER. Onde *Av, dissim*: dissimilaridade média; *Contrib, %*: contribuição percentual e; *% Cumulativa*: porcentagem cumulativa. Sublinhado: taxa tolerante à poluição. Sublinhado: taxa tolerante à poluição. Destaque em amarelo: taxa de contribuição mais alta. Destaque em verde: resultados P1: entrada do compartimento. Outros pontos de amostragem: P2: captação de água; P3: Colônia e Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; e P6: Rio Curucutu. Períodos de amostragem: W: úmido e D: seco. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

SIMPER results				Averages per sampling point					
<i>H-Taxons</i>	<i>Av, dissim</i>	<i>Contrib, %</i>	<i>Cumulative %</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>
Chaoborus	15.40	24.89	24.89	0.12	0.57	0.74	0.49	0.56	0.52
Chironomini	13.41	21.67	46.57	0.27	0.52	0.13	0.33	0.36	0.46
Naididae	11.48	18.55	65.12	0.27	0.36	0.17	0.31	0.27	0.33
H. stagnalis	6.24	10.08	75.20	0.40	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00
Ceratopogonidae	4.86	7.86	83.06	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Corbicula	4.79	7.74	90.80	0.14	0.00	0.00	0.12	0.17	0.00
Tanypodinae	3.53	5.71	96.51	0.00	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00
Pomacea	2.16	3.49	100.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	61.877	99.99							

3.6 CONCLUSÃO

O presente estudo mostrou que o compartimento Taquacetuba em todos os pontos apresentou grau de comprometimento ambiental semelhante, corroborado pela presença de apenas táxons semi-tolerantes e tolerantes à poluição orgânica, com P1 - entrada no compartimento - na estação chuvosa, ao contrário dos demais pontos, apresentando piora nas condições ambientais. Esse fato é explicado pela maior proximidade do P1 com o corpo central do reservatório Billings, que apresenta maior estresse ambiental no período chuvoso devido ao aporte de água do rio Pinheiros por bombeamento para controle de enchentes. Esta conclusão é corroborada pela tendência em relação aos índices bióticos, que apresentam menor densidade total de organismos, menor diversidade de Shannon, menor riqueza de táxons e maior dominância de Simpson. A análise nMDS destacou o P1 mais dissimilar dos demais pontos de amostragem em relação à influência dos táxons, corroborado pela ANOSIM com diferença significativa de P1 em relação aos demais pontos, e a análise SIMPER indicou P1 mais dissimilar do que os outros pontos, principalmente com maior contribuição dos organismos tolerantes Naididae e Pomacea, este último exclusivo de P1, além dos semitolerantes Chironomini, *Helobdella stagnalis* e Ceratopogonidae. O P2 – captação para transposição - foi evidenciado, excetuando P1, por haver uma tendência de maior diversidade em relação aos demais pontos. Em relação aos pontos de drenagem tributária, o P3 - drenagem dos afluentes dos córregos Colônia e Vermelho -. Em relação aos táxons semi-tolerantes, apresentou tendência na estação seca a maiores densidades de Chaoborus e Tanypodinae, táxons com maior capacidade de mobilidade na água, mostrando que as métricas da água indicativas de contaminação ambiental não influenciaram no agravamento da comunidade de macroinvertebrados bentônicos. O P4 - drenagem do córrego Taquacetuba - apresentou tendência a maior uniformidade e menor variação de dominância. P5 e P6 se destacaram por não apresentarem táxons tolerantes à poluição durante a seca. Esses pontos estão localizados próximos a reservas indígenas, o que sugere maior preservação ambiental no entorno desses afluentes.

3.7 REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas Ministério do Meio Ambiente e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - ANA / CETESB, 2011. Guia nacional de coleta e preservação de amostras água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos, Brasília, 326p. https://www.clean.com.br/downloads/Guia_Nacional_de_Coleta_e_Preservacao_de_Amostras_.pdf
- Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo – ALESP, 1976. Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente (Decreto n.º 8.468, de 8 de Setembro de 1976). Diário Oficial do Estado de São Paulo, Poder Executivo, São Paulo, SP. <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html>
- Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo – ALESP, 1977. Dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976 (Decreto nº 10.755, de 22 de Novembro de 1977). Diário Oficial do Estado de São Paulo, Poder Executivo, São Paulo, SP. <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1977/decreto-10755-22.11.1977.html>
- Begon, M.; Townsend, CR; Harper, JL (2007) Ecologia: de possui a ecossistemas. Artmed. Porto Alegre.
- Borror, DJ e DeLong, DM 1988. Introdução ao estudo dos insetos. 3a.ed. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 652p.
- Brandimarte, AL e Anaya, M. 1998. Bottom fauna flotation using a solution of sodium chloride. Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie, Stuttgart 26 (5): 2358-2359. <https://doi.org/10.1080/03680770.1995.11901170>.
- Brandimarte, AL; Anaya, M; Mariani, CF; Bispo, DS; Pompêo, MLM 2015. Capítulo 20: Comunidade de invertebrados bentônicos em reservatórios do Estado de São Paulo: aspectos temporais e espaciais. In: Pompêo, MLM; Moschini-Carlos, V; Nishimura, PY; Cardoso-Silva, S e López-Doval, JC (Organizadores) Ecologia de reservatórios e interfaces, São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, ISBN 978-85-85658-52-6. <http://ecologia.ib.usp.br/reservatorios/>
- Bray, JR e Curtis, JT 1957. An Ordenation of Upland Forest Communities of Southern Wisconsin. Ecological Monographs, 27, 325-349. <http://dx.doi.org/10.2307/1942268>
- Callisto, M; Esteves, FA; Gonçalves Jr., JF & Fonseca, JJJ 2005. Macroinvertebrados bentônicos como indicadores de fragilidade ecológica de pequenos rios (igarapés) em uma região de mineração de bauxita na Amazônia brasileira. Amazoniana, 15 (1/2): 1-9.
- Clarke, KR 1999). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. Austral Ecology, 18 (1), 117-143. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2018. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo em 2017. Relatório anual de monitoramento ambiental. São Paulo: CETESB. 301 p. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2019. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo em 2018. Relatório anual de monitoramento ambiental. São Paulo: CETESB. 284 p. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>
- Elliott, JM. 1977. Statistical analysis of samples of benthic invertebrates. Freshwater Biological Association. Ambleside. 157 p.

- Gargiulo, J.R.B.C., 2020. O Reservatório Billings. In: Pompêo, M.L.M., & Moschini-Carlos, V., orgs. Reservatórios que abastecem São Paulo: problemas e perspectivas (Cap. 6, pp. 63-81). São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. <http://ecologia.ib.usp.br/portal/publicacoes/>
- Gargiulo, J.R.B.C., Mercante, C.T.J., Brandimarte, A.L., & Menezes, L.C.B., 2016. Benthic macroinvertebrates as bioindicators of water quality in Billings Reservoir fishing sites (SP, Brazil). *Acta Limnol. Bras. Online* 28(0), e17. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2315>
- Gneri, FS e Angelescu, V. 1951. La nutrición de los peces iliofagos en relacion con el metabolismo general del ambiente aquático. Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia e Instituto Nacional de Investigación de las Ciencias Naturales - Ciencias Zoológicas, Buenos Aires 2: 1-44.
- Hammer, Ø., 2021. PAST version. 3.0 - software for scientific data analysis [online]. Natural History Museum - University of Oslo. <https://www.nhm.uio.no/english/research/infrastructure/past/>
- Hellawell, JM 1986. Biological Indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management. Nova York: Elsevier Science, 546 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-4315-5> .
- Instituto Mamirauá, 2020. BIOESTAT v. 5.3 Programa de Estatística Para estudantes de graduação e pós-graduação, pesquisadores e professores [online]. Tefé: Instituto Mamirauá. <https://www.mamiraua.org.br/downloads/programas/>
- Leal, JFF. e Esteves, FA., 1999. Densidade e biomassa de *Campsurus* sp. (Ephemeroptera) e outros macroinvertebrados em um lago amazônico impactado por rejeitos de bauxita (Lago Batata, Pará, Brasil). *Amazoniana*, 15 (3/4): 193-209.
- Macan, TT. 1975. Invertebrados de agua dulce: guia de animales. Pamplona, EUSA. 118p.
- Mandaville, SM 2002. Benthic Macroinvertebrates in Freshwaters Taxa de Tolerance Values, Metrics, and Protocols http://www.biosbcc.net/bio130/labs/Stream/BenthicInvert_PollutionTolerance.pdf (antigo site) também citado como Mandaville, S.M. (2002) Benthic Macroinvertebrates in Freshwater—Taxa Tolerance Values, Metrics, and Protocols, Project H-1. Soil & Water Conservation Society of Metro Halifax, Nova Scotia. <http://www.chebucto.ns.ca/science/SWCS/H-1/tolerance.pdf>
- Menezes, L.C.B., Gargiulo, J.R.B.C., & Monteiro-Junior, A.J., 2016. Qualidade da água em locais de pesca artesanal no complexo Billings, São Paulo. *Bioikos (Online)*, 30(1), 43-53. <https://seer.sis.puc-campinas.edu.br/seer/index.php/bioikos/article/view/3338/2421>
- Merritt, RW & Cummins, KW 1996. Uma introdução aos insetos aquáticos da América do Norte. Kendale / Hunt Publ.Comp. 862p.
- Mugnai, R; Nessimian, JL; Baptista, DF 2010. Manual de identificação de Macroinvertebrados aquáticos do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Editora Technical Books
- Odum, EP; Barrett, GW 2008. Fundamentos de ecologia. Cengage Learning. São Paulo.
- Owen, TL. 1974. Handbook of common methods in limnology., The CV Mosby Company. Saint Louis 154p.
- Pennak, RW. 1991. Invertebrados de água doce dos Estados Unidos: Protozoa a Mollusca. 3.ed. Publicação Wiley-interscience. 628 p.
- Pérez, GR 1996. Guia para o estudo de los macroinvertebrados acuáticos do Departamento de Antioquia. Presencia. Bogotá. 217p
- Ricklefs, RE. 2011. A Economia da Natureza. 6ª. Ed. Guanabara / Koogan, Rio de Janeiro. 546p.
- Rosenberg, DM e Resh, VH (eds.) 1993. Biomonitoramento de água doce e macroinvertebrados bentônicos, Chapman & Hall. Nova York 487p.

- Rutherford, A., 2001. *Introducing ANOVA and ANCOVA: a GLM approach* [online]. Thousand Oaks: Sage Publications Ltd. *Introducing Statistical Methods* series. https://www.researchgate.net/publication/246522459_Introducing_ANOVA_and_ANCOVA_a_GLM_approach
- Sawyer, RT (1986) *Leech Biology and Behavior*. Clarendon Press Vol. II, p. 419-793, 1065p. Oxford
- Sokal, R.R., & Rohlf, F.J., 2009. *Introduction to biostatistics* (2nd ed.). NY: Dover Public. 363 p. https://www.academia.edu/40164241/INTRODUCTION_TO_BIOS_TATIS_TIC_S_SECON_EDITION
- StatSoft, 2020. *Statistica version 7.0 for Windows*. University of Cape Town. <http://www.icts.uct.ac.za/statistica-windows>
- Strungaru SA, Pohontiu CM, Nicoarace M, Teodosiu C, Baltag ES, Jijie R, Plavan G, Pacioglu O, Faggio C. 2021. Resposta de comunidades de macroinvertebrados aquáticos a múltiplos estressores antropogênicos em um rio tributário de várzea. *Toxicologia Ambiental e Farmacologia* Volume 87, 103687 <https://doi.org/10.1016/j.etap.2021.103687>
- Trivinho-Strixino, S. e Strixino, G. 1995. *Larvas de Chironomidae (Diptera) do Estado de São Paulo: guia de identificação e diagnose dos gêneros*. São Carlos, PPG-ERN / UFSCar. 229 p.
- Vineetha, S., Nandan, SB Características biológicas e combinações de características de macroinvertebrados bentônicos em um pantanal abaixo. 2021. *Perturbação Hidrológica*. *Proceedings of the Zoological Society* <https://doi.org/10.1007/s12595-021-00379-1>
- Zar, J.H., 2010. *Biostatistical analysis*. 5th ed. NJ: Pearson Prent Hall.

3.8 MATERIAL SUPLEMENTAR

3.8.1 MS - Investigação Inicial de Resultados

Tabela MS 1: Estatística descritiva da densidade relativa (organismos.m⁻²) dos táxons do zoobento.

Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

N=36	Naididae	Pomacea spp.	Chironomini	H. stagnalis	Tanyptodinae	Ceratopogonidae	Chaoborus spp.	Corbicula spp.
Min	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Max	103.705	14.815	118.520	88.890	59.260	59.260	533.340	44.445
Mean	18.930	1.235	21.399	7.819	4.938	5.350	54.733	3.292
Std. error	4.595	0.692	4.701	3.709	2.573	2.445	16.451	1.681
Stand. dev	27.571	4.153	28.208	22.254	15.437	14.667	98.706	10.086
Median	7.408	0.000	14.815	0.000	0.000	0.000	29.630	0.000
25 prcntil	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
75 prcntil	29.630	0.000	29.630	0.000	0.000	0.000	59.260	0.000

3.8.2 MS - Cálculo de Índices Bióticos

a) Densidades absolutas por amostra e densidade relativa por metro quadrado. A densidade absoluta é definida como o número de indivíduos por táxon encontrado em cada amostra. A densidade relativa representa a estimativa de organismos presentes por metro quadrado, obtida pela multiplicação de cada valor de densidade absoluta pelo “fator de estimativa” (= ~ 14,81) obtido pela divisão da área a ser estimada por 1 m² (10000 cm²) pela área amostrada de 675 cm², este último igual à área amostrador de 225 cm² multiplicado por 3 que é igual ao número total de lançamentos do amostrador para formar uma amostra (Pérez, 1996);

b) Abundância relativa. Percentual de cada táxon por ponto, coleta e por grupos de táxons organizados de acordo com a CETESB (2018), sendo: Tolerante (T) e Semiotolerante (Semi-T) à poluição orgânica;

c) Diversidade de Shannon-Weaver (H'). Obtido pelo cálculo: $H' = -\sum p_i \cdot \log_2(p_i)$, onde $p_i = n_i / N$. Onde: H' : índice de Shannon-Weaver; p_i = abundância relativa (representatividade) do táxon (i) na amostra; n_i = abundância de cada táxon; N = Número total de indivíduos por amostra; $\log_2$: logaritmo de base 2 (bits);

d) Riqueza (S). Número total de táxons. A identificação taxonômica dos organismos foi até o nível necessário para que pudessem ser utilizados como bioindicadores da qualidade da água;

e) Uniformidade de Pielou ($U' = J'$). Obtido pelo cálculo: $J' = H' / S$. Onde: J' : uniformidade de Pielou; H' : Shannon-Weaver; S : número total de táxons.

f) Dominância de Simpson (C'), calculando: $C' = \sum (p_i)^2$, com $p_i = n_i / N$. Onde: C' : dominância de Simpson; p_i = abundância relativa (representatividade) do táxon (i) por amostra; n_i = abundância de cada táxon; N = Número total de indivíduos por amostra.

3.8.3 MS - Variação das Densidades Relativas dos Táxons e Grupos de Táxons

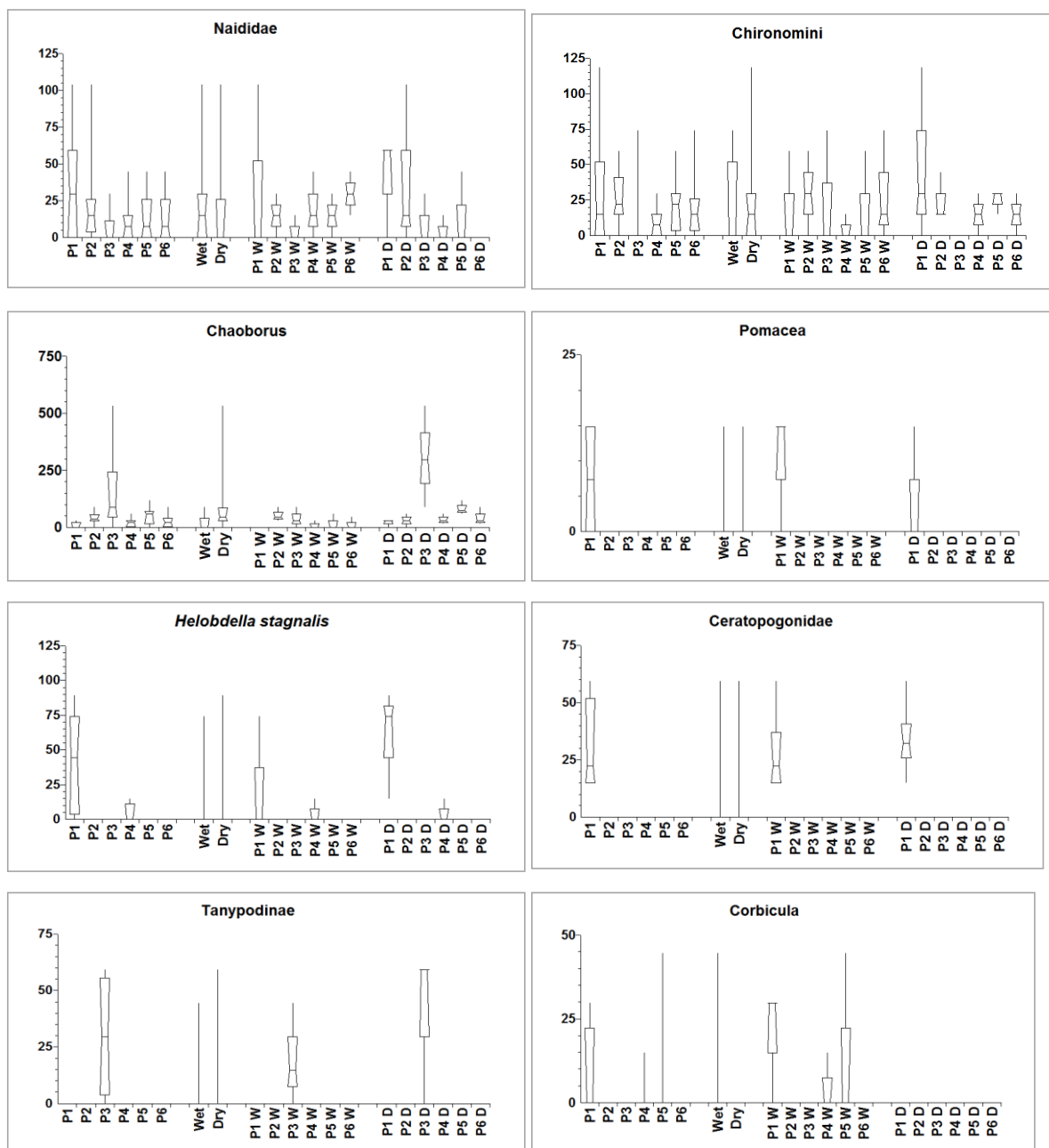


Figura MS1: Variação das densidades relativas dos táxons (organismos.m⁻²). Gráficos *Box-and-whiskers Plot* de 25 e 75 percentis e medianas e *whiskers* mínimo e máximo. Pontos: P1: entrada do compartimento; P2: captação de água; P3: Colônia e Streans Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; e P6: Rio Curucutu. Períodos de amostragem: W: úmido e D: seco. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

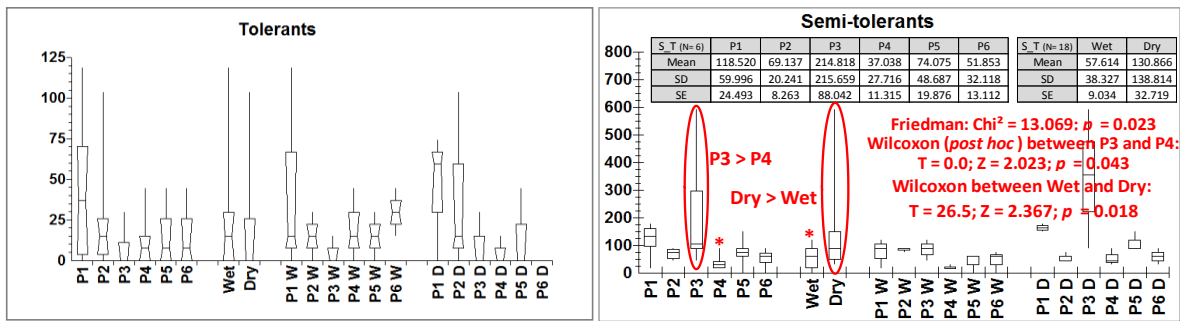


Figura MS 2: Variação das Densidades Relativas (organismos. m⁻²) dos Grupos de Tolerância à Poluição Orgânica. Gráficos *Box-and-whiskers Plot* de 25 e 75 percentis e medianas e *whiskers* mínimo e máximo. Detalhes estatísticos (cor vermelha): diferenças significativas entre asteriscos e elipses, de acordo com o padrão ANOVA: F: Fisher, valor p. Tabelas: *mean*: mediana, SD: desvio padrão e SE: erro padrão. Pontos de Amostragem: P1: entrada do compartimento; P2: captação de água; P3: Colônia e Streans Vermelho; P4: Ribeirão Taquacetuba; P5: Rio Monos - Barragem Guarani; e P6: Rio Curucutu. Períodos de amostragem: W: úmido e D: seco. Compartimento Taquacetuba, Reservatório Billings (SP), 2017.

3.8.4 MS - Cálculo para a transformação de Hillinger

A transformação de Hellinger é obtida calculando:.. Onde: Di = densidade relativa de cada táxon (organismos. M⁻²) em uma amostra; DT = densidade total de organismos.m⁻² (de todos os táxons). $\sqrt{D_i/DT}$

4 CAPÍTULO 4: COMPARTIMENTO TAQUACETUBA DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP, BRAZIL): CONTRIBUIÇÃO DOS TRIBUTÁRIOS E DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO BILLINGS (SP) - ANÁLISE CONJUNTA E CONCLUSÃO UNIFICADA

4.1 ABSTRACT.

Aim. Present the conclusion from the joint analysis obtained in three study approaches to evaluate the environmental conditions of the Taquacetuba Compartment - Billings Reservoir.

Methods. The research involved sampling at the compartment entrance, close to the water catchment point for transposition for public supply and in the mouths of the main tributaries forming the compartment, during rainy and dry periods of 2017, to obtain abiotic data from water, abiotic from sediment, including potentially toxic metals and biotics from the benthic macroinvertebrate community. The joint analysis was developed through the canonical correspondence analysis - CCA. **Results.** The Taquacetuba Compartment, at all points and collections, presented similar environmental quality with a certain degree of impairment, with exclusive presence of zoobenthic taxa indicative of organic pollution. The entrance to the compartment, unlike the other sampling points, showed a worsening of environmental conditions in the rainy season. The point near the water catchment was evidenced by the trend of higher concentrations of chlorophyll, with values of hypereutrophy. The drainage areas of the tributaries tended to the worst sediment conditions; however, there was no evidence that could indicate an adverse effect on the biota.

Keywords: water quality, potentially toxic metals from sediment, zoobenthos, tropical reservoir

4.2 RESUMO

Objetivo. Apresentar a conclusão da análise conjunta obtida em três abordagens do estudo para avaliar as condições ambientais do Compartimento Taquacetuba - Reservatório Billings.

Métodos. A pesquisa envolveu amostragens na entrada do compartimento, próximo ao ponto de captação de água para transposição para abastecimento público e na foz dos principais afluentes formadores do compartimento, durante os períodos chuvoso e seco de 2017, para obtenção de dados abióticos da água, abióticos do sedimento, incluindo metais potencialmente tóxicos e bióticos da comunidade de macroinvertebrados bentônicos. A análise conjunta foi desenvolvida por Análise de Correspondência Canônica - CCA. **Resultados.** O Compartimento de Taquacetuba, em todos os pontos e coletas, apresentou qualidade ambiental semelhante com certo grau de comprometimento, com presença exclusiva de táxons do zoobento indicativos de poluição orgânica. A entrada no compartimento, ao contrário dos demais pontos de amostragem, mostrou piora das condições ambientais no período chuvoso. O ponto próximo à captação de água foi evidenciado pela tendência de maiores níveis de clorofila, com valores de hipereutrofia. As áreas de drenagem dos afluentes tenderam às piores condições de sedimentos, porém sem evidência que pudesse indicar efeito adverso à biota.

Palavras-chave: qualidade da água, metais potencialmente tóxicos do sedimento, zoobentos, reservatório tropical

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar as condições ambientais do Compartimento Taquacetuba por meio da análise associada de dados abióticos de água, abióticos do sedimento, incluindo metais potencialmente tóxicos, e dados bióticos da comunidade de macroinvertebrados bentônicos, como bioindicadores de qualidade ambiental. Vale ressaltar que não foram encontrados na literatura estudos de integração para o Compartimento Taquacetuba com amostragens simultâneas na foz dos principais afluentes que formam o Compartimento, na área próxima à captação de água para abastecimento público e próximo à entrada do Compartimento Taquacetuba próximo ao corpo central do reservatório Billings. É necessário monitorar constantemente a qualidade da água associada à identificação de fontes poluentes, o que pode levar ao manejo adequado do corpo d'água (Onyena et al., 2021).

Vale ressaltar que, em relação às concentrações de oxigênio dissolvido, não foram observadas diferenças significativas entre os locais e épocas amostrados e que este parâmetro permaneceu em uma média (mg.L^{-1}) de 6,289 ($\pm 0,451$), ou seja, de acordo com a legislação, estando acima do limite mínimo de 6,0 mg.L^{-1} (CONAMA nº 357, 2005). Assim, as concentrações de oxigênio dissolvido não representam um fator limitante para os organismos bentônicos identificados nesta pesquisa (Merritt e Cummins, 1996; Pérez, 1996). A pesquisa permitiu a obtenção simultânea no campo de amostras para os desenvolvimento de três abordagens de estudo: abióticos de água, abióticos de sedimentos e bióticos pela comunidade de macroinvertebrados bentônicos. Os resultados são apresentados em quatro capítulos diferentes: três com cada uma das abordagens, e este capítulo que traz a análise conjunta e a conclusão unificada envolvendo dados das três abordagens.

4.3 CONTRIBUIÇÃO DE DADOS ABIÓTICOS DA ÁGUA E DO SEDIMENTO E BIÓTICOS NAS VARIAÇÕES ESPACIAL E SAZONAL

A análise conjunta permitiu verificar a contribuição de dados abióticos de água e do sedimentos e bióticos na variação espacial e sazonal. Assim, a relação entre a matriz ambiental e a matriz biótica foi investigada por meio da análise de correspondência canônica - CCA. A escolha desta ferramenta foi motivada pela resposta unimodal da matriz biótica utilizada. Esta resposta foi verificada de acordo com Lepš e Šmilauer (1999) através de DCA *Detrended Correspondence Analysis* / Análise de Correspondência Destendenciada. Os resultados da DCA

mostraram que o comprimento do gradiente do primeiro eixo foi maior que 3, indicando resposta unimodal, validando o uso da CCA como ferramenta adequada para esta investigação. Para melhorar a interpretação do resultado da análise, foram excluídas as variáveis com correlações mais fracas com os dois primeiros eixos. As variáveis foram removidas uma de cada vez, e após cada retirada, o gráfico era inspecionado para verificar as alterações. As sete variáveis de qualidade da água do fundo incluídas na análise foram as seguintes: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) e nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e nitrogênio e fósforo total da água (em m.L^{-1}). As quatro variáveis do sedimento foram: cobre, zinco, níquel e fósforo total do sedimento (em mg.kg^{-1}). Para a matriz biótica dos zoobentos, foram consideradas as densidades relativas dos seguintes táxons: Naididae, Pomacea, Chironomini, *Helobdella stagnalis*, Tanyptodinae, Ceratopogonidae, Chaoborus. e Corbicula.

O CCA (fig : 1) explicou 82,15% da variabilidade total, e o primeiro eixo (59,65%) mostrou (gráfico A) a separação das nuvem de dispersão do ponto P1 e parte do ponto P4 dos demais. Os pontos P1 e P4 estão relacionados a nitrito, nitrato, fósforo total e os táxons *Helobdella stagnalis*, Ceratopogonidae (semi-tolerante) e Pomacea (tolerante). Os táxons Corbicula, Naididae e Chironomini estão associados à temperatura da água, enquanto Chaoborus e Tanyptodinae estão relacionados a variáveis do sedimento: fósforo total e os metais Zn, Cu e Ni, todos relacionados principalmente a P3, P5 e P6. Em relação à variabilidade temporal (gráfico B) não mostra a influência do componente abiótico na matriz biótica.

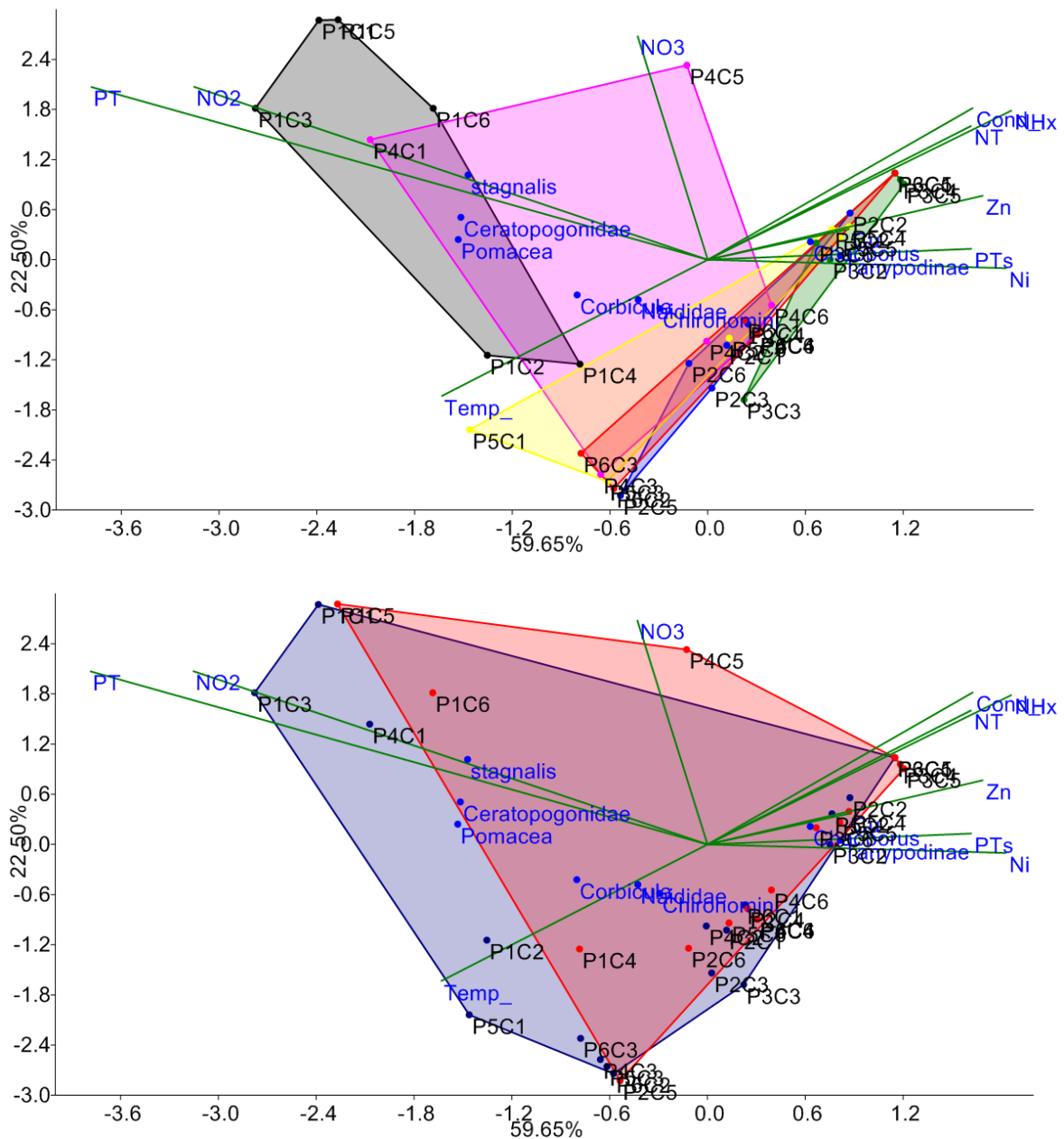


Figura 1: CCA - Abióticos Água e Sedimento e Taxa Bioindicadora para verificar a ordenação dos pontos de amostragem (P) e coletas (C) em relação à intensidade da associação entre as variáveis. Água: Temp.: temperatura (oC), Cond: condutividade elétrica ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$). Em mL^{-1} : NHx: nitrogênio amoniacal, NO2 nitrito, NO3: nitrato, NT: nitrogênio total, PT: fósforo total. Sedimento ($\text{mg}.\text{kg}^{-1}$): Cu: cobre, Zn: zinco, Ni: níquel, PTs: fósforo total do sedimento. Zoobentos: densidade do táxon (organismos. m^{-2}): Naididae, Pomacea, Chironomidae, H. stagnalis, Tanypodinae, Chaoborus e Corbicula. Cores das nuvens de dispersão (convex hulls): Gráfico (A): pontos de amostragem: Preto: P1 - entrada do compartimento; Azul: P2: captação de água; P3 Verde: Colônia e Vermelho; Rosa P4: Ribeirão Taquacetuba; P5 Amarelo: Rio Monos - Barragem Guarani e P6 Vermelho: Rio Curucutu. Gráfico (B): períodos de amostragem: azul: úmido e vermelho: seco. Compartimento de Taquacetuba,

Conclui-se que, em relação à qualidade ambiental, o presente estudo mostrou que o Compartimento Taquacetuba em todos os pontos possuía qualidade de água semelhante e com um certo grau de comprometimento, sendo que P1 - entrada no compartimento - no período chuvoso, ao contrário dos outros pontos, apresentou piora nas condições ambientais. Esse fato é explicado pela maior proximidade do P1 com o corpo central do reservatório Billings, que apresenta maior estresse ambiental no período chuvoso devido ao aporte de água do rio Pinheiros por bombeamento para controle de enchentes. Esta conclusão é corroborada, em relação aos parâmetros da água, pela tendência a uma menor concentração de oxigênio dissolvido associada à tendência a maiores concentrações de turbidez, clorofila α , nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato, nitrogênio total e ortofosfato, indicativos de comprometimento ambiental. Situação evidenciada pela análise de componentes principais (PCA) com dados abióticos da água (capítulo 1) que indicou maior correlação entre P1 e nitrito, nitrato, turbidez e fósforo total. Este maior comprometimento ambiental em P1 é confirmado em relação aos parâmetros do sedimento (capítulo 2), que no período chuvoso tenderam a apresentar maior concentração de cobre, zinco, níquel, chumbo, cromo e fósforo total. A situação de piora na qualidade da água e do sedimento no P1 durante o período chuvoso também é corroborada pela tendência em relação aos índices bióticos (capítulo 3), que apresentam menor densidade total de organismos, menor diversidade de Shannon, menor riqueza de táxons e maior dominância de Simpson.

A análise CCA apresentada neste capítulo, correlaciona principalmente P1 com nitrito e fósforo total com Pomacea que é tolerante e, Ceratopogonidae e *Helobdella stagnalis* que são semi-tolerantes à poluição orgânica. Assim, observamos a maior diferenciação de P1 com piora da qualidade ambiental durante as chuvas.

Embora P1 tenha apresentado indícios de pior qualidade da água nas chuvas, o P2 – captação para transposição - foi evidenciado por apresentar tendência a maiores concentrações

de clorofila α principalmente durante a seca, incluindo um valor de pico correspondente à hipereutrofia mostrado no IET (capítulo 1), apresentando altas concentrações de fósforo total, que considerando os dois períodos também foi significativamente maior em P2. Esses maiores valores de clorofila α merecem atenção especial, pois P2 representa o ponto mais próximo do local de captação de água para abastecimento, e altos valores de clorofila α podem indicar a presença de cianotoxinas que em níveis elevados podem comprometer o abastecimento público. Em relação aos pontos de drenagem tributária, P3 - drenagem dos afluentes Colônia e Vermelho - destacaram-se por apresentar na estiagem tendência a maiores concentrações na água de nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrogênio total, sendo o único ponto neste período com valores de nitrogênio total em não conformidade com a legislação. Em relação aos táxons, apresentou tendência na estação seca a maiores densidades de Chaoborus e Tanypodinae (semi-tolerantes), táxons com maior capacidade de mobilidade, mostrando que as métricas da água indicativas de contaminação ambiental não influenciaram no agravamento da comunidade de macroinvertebrados bentônicos. P4 - drenagem do córrego Taquacetuba - apresentou altas concentrações de todos os parâmetros abióticos do sedimento (capítulo 2) em ambos os períodos, porém a sugestão de entrada desses contaminantes independentemente do regime de chuvas não é suportada, pois somente durante o período chuvoso há tendência a maiores concentrações de nitrogênio total e, significativamente maiores concentrações de cobre, zinco, níquel, chumbo, cromo e fósforo total, sugerindo o carreamento desses contaminantes pelas chuvas, o que indica que o uso e a ocupação do solo circundante contribui para o aporte de contaminantes. A análise de CCA mostra uma grande correlação de P4 com fósforo total, nitrito e nitrato na água e, com o táxon tolerante Naididae e o exótico Corbicula ambos com resistência conhecida à poluição orgânica. Dentre os afluentes, P5 - drenagem do rio Monos e P6 - drenagem do rio Curucutu - foram os que apresentaram as melhores condições ambientais, evidenciado pela tendência a maiores concentrações de oxigênio dissolvido na água durante o

período chuvoso (capítulo 1). O P5 apresentou o menor valor de IET, sendo o único classificado como supereutrófico considerando os dois períodos amostrais. P6 se destacou por não apresentar táxons tolerantes à poluição durante a seca (capítulo 3). Esses pontos estão localizados próximos a reservas indígenas, o que sugere maior preservação ambiental no entorno desses afluentes.

Esta pesquisa, pioneira na análise da qualidade da água na foz dos principais afluentes do braço de Taquacetuba, permitiu concluir que há indícios de que os afluentes contribuem com o aporte de nutrientes e contaminantes químicos do entorno. Mesmo com a indicação de pior qualidade da água no P1, com maior influência do bombeamento do rio Pinheiros nas chuvas, observamos que os pontos localizados nas saídas dos afluentes também apresentaram comprometimento na qualidade da água. Tal estudo pode contribuir com medidas de gestão da qualidade da água subsidiando políticas públicas que levem em consideração a avaliação do uso e ocupação do solo no entorno desses afluentes, identificando potenciais fontes poluidoras que colaboram com o comprometimento da qualidade da água no Compartimento de Taquacetuba.

O estudo mostrou que o bombeamento de água do rio Pinheiros para o reservatório Billings para evitar inundações em áreas urbanas, causa danos ambientais ao Compartimento de Taquacetuba. Isso ocorre exatamente quando as chuvas contribuiriam para a recuperação do manancial por meio da diluição e transporte dos poluentes. Este fato é evidenciado pelas piores condições ambientais durante as chuvas na entrada do compartimento, mais sujeito à influência do bombeamento de água do rio Pinheiros, dada sua maior proximidade com o corpo central do reservatório Billings. Assim, outras estratégias políticas de gestão desses recursos hídricos devem ser implementadas para que as enchentes sejam evitadas sem o bombeamento.

4.4 Referências

- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências (Resolução CONAMA nº 357, de 17 de Março de 2005). Diário Oficial da União [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>
- Lepš, J e Šmilauer, P 1999. Multivariate Analysis of Ecological Data. Faculdade de Ciências Biológicas da Universidade da Boêmia do Sul: Ceské Budejovice
- Merritt, RW & Cummins, KW 1996. Uma introdução aos insetos aquáticos da América do Norte. Kendale / Hunt Publ.Comp. 862p.
- Onyena AP, Nkwoji AJ e Chukwu, O (2021) Evaluation of hydrochemistry and benthic macroinvertebrates in Chanomi Creek, Niger Delta Nigeria. Estudos Regionais em Ciências Marinhas. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101907>
- Pérez, GR 1996. Guia para o estudo de los macroinvertebrados acuáticos do Departamento de Antioquia. Presencia. Bogotá. 217p

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Compartimento Taquacetuba mostrou comprometimento da qualidade da água com níveis de condutividade elétrica, clorofila α e fósforo total acima limites legislação, em super ou hipereutrofia. Em relação ao sedimento, nenhuma evidência que pudesse indicar comprometimento ambiental foi encontrada. Foi observada em relação à comunidade de macroinvertebrados bentônicos, presença apenas de táxons semi-tolerante e tolerante a poluição orgânica, com ausência de táxons sensíveis. O Taquacetuba mostrou maior estresse ambiental durante as chuvas na área próxima à entrada do compartimento devido a influência do bombeamento de água do Rio Pinheiros para controle de enchentes. Porém, na estiagem, a área próxima ao ponto de captação de água visando abastecimento público, mostrou elevado grau de trofia. A contaminação proveniente do entorno ficou evidenciada com tendência de aumento de contaminantes da água especialmente na estiagem, nas áreas de desembocadura dos tributários formadores.

Para garantir a qualidade ambiental do reservatório Billings, o controle do uso e ocupação do solo do entorno é fundamental, garantindo áreas de vegetação, além de coleta e tratamento de esgoto das áreas urbanas, com de estratégias para controle de inundações que não envolvam o bombeamento de água do rio Pinheiros para o reservatório.

REFERÊNCIAS

- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2019. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo em 2018. Relatório anual de monitoramento ambiental. São Paulo: CETESB. 284 p. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>
- Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. – EMAE, 2021. Elevatórias [online]. São Paulo: EMAE. <http://www.emae.com.br/conteudo.asp?id=Elevat%C3%B3rias>
- Gargiulo, J.R.B.C., 2020. O Reservatório Billings. In: Pompêo, M.L.M., & Moschini-Carlos, V., orgs. Reservatórios que abastecem São Paulo: problemas e perspectivas (Cap. 6, pp. 63-81). São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. <http://ecologia.ib.usp.br/portal/publicacoes/>