

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS – CÂMPUS BOTUCATU**

Pós-graduação em Ciências Biológicas – Zoologia
Dissertação de Mestrado

**Macroinvertebrados bentônicos e contaminação por
microplásticos em ambientes de qualidade de água
contrastantes da bacia do médio Rio Tietê (SP, Brasil)**

Camila Magro

Orientador: Prof. Dr. Marcos Gomes Nogueira

Botucatu-SP

2023

Macroinvertebrados bentônicos e contaminação por microplásticos em ambientes de qualidade de água contrastantes da bacia do médio Rio Tietê (SP, Brasil)

Camila Magro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Botucatu, como parte dos Requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências Biológicas (Zoologia)

Orientador: Prof. Dr. Marcos Gomes Nogueira

Botucatu-SP

2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE BOTUCATU - UNESP
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: MARIA CAROLINA ANDRADE CRUZ E SANTOS-CRB 8/10188

Magro, Camila.

Macroinvertebrados bentônicos e contaminação por microplásticos em ambientes de qualidade de água contrastantes da bacia do médio Rio Tietê (SP, Brasil) / Camila Magro. - Botucatu, 2023

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Biociências de Botucatu
Orientador: Marcos Gomes Nogueira
Capes: 20400004

1. Eutroficação. 2. Indicadores biológicos. 3. Contaminantes emergentes na água. 4. Poluição. 5. Recursos hídricos - Desenvolvimento. 6. Macroinvertebrados bentônicos.

Palavras-chave: Bioindicadores ; Contaminantes emergentes ; Eutrofização; Poluição; Recursos hídricos.

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, Rose, pelo incentivo aos estudos e por sempre acreditar que eu seria capaz de chegar até aqui.

Ao Cursinho popular pré-universitário Desafio, oferecido pela FMB-UNESP, e todos os colaboradores de 2014 e 2015, os quais foram fundamentais para a minha aprovação na graduação. Cursar Ciências Biológicas sempre foi um sonho e isso me possibilitou chegar até a pós-graduação.

Ao meu orientador, Marcos Gomes Nogueira, por ter aceitado me orientar mesmo em tempos de pandemia e por ter enfrentado junto os desafios impostos por ela. Agradeço a oportunidade, a dedicação e os ensinamentos compartilhados.

Ao Gabriel, por todo apoio, auxílio (especialmente no R), paciência e companheirismo.

Aos amigos de Botucatu e da graduação, pela amizade, pelos momentos de descontração e pelo companheirismo ao longo desses anos de estudo.

Aos colegas do laboratório, por todas as trocas e pela convivência.

À empresa Limnética, por todo o suporte durante o trabalho de campo.

À Adriana Jorcin, pelo auxílio na identificação dos organismos.

Ao Departamento de Solos e Recursos Ambientais da FCA – Unesp pelo processamento de amostras do sedimento.

Aos servidores, professores e funcionários do departamento de Biodiversidade e Bioestatística, por todo o auxílio e serviços prestados.

Às integrantes das bancas examinadoras da minha qualificação e defesa de dissertação, Ana Maria Cirino Ruocco, Danielle Katharine Petsch e Paula Caroline dos Reis Oliveira, pelas críticas e sugestões.

À CAPES, pela bolsa concedida (Número do processo: 88887.636678/2021-00), o que tornou possível a realização desse trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Apresentação	6
Capítulo 1	7
Resumo	8
Abstract	9
Introdução	10
Objetivos	12
Material e Métodos	12
Resultados	17
Discussão.....	27
Considerações Finais	30
Referências	31
Capítulo 2	36
Resumo	37
Abstract	38
Introdução	39
Objetivos	40
Material e Métodos	40
Resultados	46
Discussão.....	51
Considerações Finais	54
Referências	55
Anexos	59
Material Suplementar	68

APRESENTAÇÃO

Entre os rios de grande porte do Estado de São Paulo, o Tietê é o mais degradado, recebendo por mais de um século cargas excessivas de poluição. Ao cruzar a maior área urbana do país, este recebe um grande aporte de efluentes não tratados e de resíduos sólidos. Essa poluição de origem antrópica tem causado problemas como a eutrofização e, recentemente, tem crescido uma preocupação com relação ao acúmulo de partículas plásticas e seus possíveis impactos sobre os organismos que ali vivem. Um grupo que merece destaque são os macroinvertebrados bentônicos, os quais são considerados bioindicadores da qualidade de água e são fundamentais para a ciclagem de nutrientes e manutenção das cadeias alimentares aquáticas.

Nesse estudo buscamos entender como a eutrofização e os microplásticos afetam a comunidade de macroinvertebrados bentônicos em ambientes de qualidade de água contrastantes na bacia do médio rio Tietê. Para fins comparativos, três locais no município de Anhembi (SP) foram selecionados para fins de amostragem: o rio Tietê, uma de suas lagoas marginais (sem nome) e um de seus tributários, o rio do Peixe, sem influência de centros urbanos. Por meio das análises comparativas demonstramos os efeitos da poluição (eutrofização e resíduos plásticos) sobre a comunidade dos macroinvertebrados bentônicos.

Com relação a estrutura dessa dissertação, optou-se pela redação seguindo o padrão de artigo científico (presentemente como versão preliminar), sendo a mesma dividida em dois capítulos:

1. “Estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos em ambientes de qualidade de água contrastantes da bacia do médio Rio Tietê (SP, Brasil)”
2. “Contaminação por microplástico nos sedimentos e macroinvertebrados da bacia do médio Rio Tietê (SP, Brasil)”

Apresenta-se ainda, como Material Suplementar, manuscrito intitulado “*Microplastic contamination in the excessively polluted Tietê River (Southeast Brazil): an unsustainable human-nature relationship*”, o qual inclui parte dos resultados relacionados à presente pesquisa. O trabalho foi submetido à revista internacional *Environmental Pollution*, tendo recebido os primeiros pareceres e encontra-se atualmente em revisão pelos autores.

Capítulo 1

“Estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos em ambientes de qualidade de água contrastantes da bacia do médio Rio Tietê (SP, Brasil)”

RESUMO

A eutrofização é um dos maiores problemas em ambientes aquáticos de água doce da atualidade e seu estágio final é praticamente irreversível. Esse fenômeno afeta diretamente a fauna aquática, incluindo os macroinvertebrados bentônicos, organismos importantes para o funcionamento das cadeias alimentares aquáticas e indicadores das condições ambientais. Em ambientes eutrofizados há uma mudança na composição da comunidade desses animais, alguns organismos podem sofrer redução populacional ou desaparecerem completamente, enquanto outros, os mais tolerantes, dominam o ambiente. O rio Tietê, no estado de São Paulo, é um exemplo de corpo d'água altamente poluído e afetado pela eutrofização devido, principalmente, ao despejo de esgoto bruto da cidade mais populosa do país, a cidade de São Paulo. Esse estudo teve como objetivo investigar o impacto da poluição do rio Tietê na comunidade de macroinvertebrados bentônicos no corpo lótico do rio, tendo em vista que a maioria das pesquisas envolvendo esse rio foram realizados nos seus reservatórios. Foram comparadas as comunidades encontradas em um trecho do rio principal, em uma de suas lagoas marginais (sem nome), a qual pode estar acumulando poluição, e em um de seus tributários não afetado por áreas urbanas, o rio do Peixe. Simultaneamente, as variáveis limnológicas da água e do sedimento foram avaliadas em cada local. As amostragens foram realizadas em dois períodos do ano (estação seca e chuvosa) de 2021. As variáveis ambientais evidenciaram as diferenças contrastantes entre os ambientes. O rio Tietê e sua lagoa marginal compartilharam características físico-químicas e altas taxas de nutrientes em ambos os períodos. O tributário foi mais bem classificado em termos de variáveis ambientais, e suas características podem auxiliar na manutenção da biodiversidade regional da bacia do médio rio Tietê. Com relação aos macroinvertebrados, foram identificados 37 táxons. Os Oligochaeta apresentaram altas densidades nos três ambientes e foram dominantes no rio Tietê e na lagoa marginal. Os maiores valores para riqueza e diversidade foram obtidos no rio do Peixe. A partir dos resultados foi possível observar que o longo histórico de degradação do Rio Tietê atua como um fator estruturador da comunidade de macroinvertebrados bentônicos, pois nesse ambiente observou-se a dominância de apenas um táxon tolerante, diferente do seu tributário não impactado. Estudos como este comprovam a importância da utilização dos macroinvertebrados bentônicos para a indicação da qualidade ambiental e podem subsidiar medidas de manejo que visem a recuperação desse importante rio paulista.

Palavras-chave: bioindicadores, eutrofização, Oligochaeta, poluição, recursos hídricos

ABSTRACT

A eutrophication is one of the most significant problems in contemporary freshwater aquatic environments, and its final stage is nearly irreversible. This phenomenon directly affects aquatic fauna, including benthic macroinvertebrates, which are crucial organisms in aquatic food chains and indicators of environmental conditions. In eutrophicated environments, there is a shift in the composition of the benthic macroinvertebrate community, with some organisms experiencing population reductions or disappearing entirely, while others, the more tolerant ones, dominate the environment. The Tietê River, located in the state of São Paulo, is an example of a highly polluted water body affected by eutrophication, mainly due to the discharge of raw sewage from the most populous city in the country, São Paulo. This study aimed to investigate the impact of Tietê River pollution on the benthic macroinvertebrate community in the lotic section of the river, as most previous research involving this river has been conducted in its reservoirs. The study compared the communities found in a stretch of the main river, in one of its unnamed marginal lagoons, which may be accumulating pollution, and in one of its tributaries unaffected by urban areas, the Rio do Peixe. Simultaneously, limnological variables of water and sediment were evaluated at each location. Sampling was conducted during two periods of the year (dry and rainy seasons) in 2021. Environmental variables revealed contrasting differences between the environments. The Tietê River and its marginal lagoon shared physicochemical characteristics and high nutrient levels in both periods. The tributary was better classified in terms of environmental variables, and its characteristics may contribute to the maintenance of regional biodiversity in the Middle Tietê River basin. Regarding macroinvertebrates, 37 taxa were identified. Oligochaetes exhibited high densities in all three environments and dominated the Tietê River and the marginal lagoon. The highest values for richness and diversity were observed in the Rio do Peixe. The results indicated that the long history of degradation of the Tietê River acts as a structuring factor for the benthic macroinvertebrate community, as this environment showed the dominance of only one tolerant taxon, unlike its unaffected tributary. Studies like this demonstrate the importance of using benthic macroinvertebrates as indicators of environmental quality and can inform management measures aimed at the recovery of this important river in São Paulo.

Key words: bioindicators, eutrophication, Oligochaeta, pollution, water resources

INTRODUÇÃO

A eutrofização é reconhecida pela comunidade científica como um dos maiores e mais difundidos problemas presentes em ambientes aquáticos de água doce a pelo menos 8 década (Harper, 1992). Esse fenômeno corresponde ao aumento na concentração de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio que, associado a alta luminosidade, promovem uma alteração na estabilidade do ecossistema, o qual passa a produzir mais matéria orgânica que sua capacidade de processá-la (Esteves, 1988; Barreto et al., 2013). Esse processo pode ter origem natural, sendo lento, contínuo e resultado do aporte de nutrientes trazidos pela chuva, ou artificial, sendo resultado do despejo de efluentes domésticos, industriais e/ou de atividades agrícolas. (Esteves, 1988; Khan e Ansari, 2005). A eutrofização de origem antrópica do ambiente aquático pode gerar diversas implicações socioeconômicas, tornando o corpo d'água inaproveitável para o abastecimento, geração de energia e lazer, e gerando problemas como a produção de gases tóxicos e fétidos, mortandade de peixes, danos às tubulações e turbinas de instalações de tratamento de água e usinas hidrelétricas, bem como prejuízos aos esportes náuticos (Esteves, 1988).

Tratando-se de organismos aquáticos, a eutrofização é um tipo de poluição que pode afetar diretamente a fauna, sobretudo devido a eventos recorrentes de baixas concentrações de oxigênio (Khan e Ansari, 2005). Nessas condições, muitas espécies apresentarão uma redução no número de indivíduos, ou desaparecerão por completo, enquanto outras, as mais tolerantes, dominarão o ambiente (Esteves, 1988). Um grupo de organismos aquáticos que está sujeito a esses impactos é o dos macroinvertebrados. Esses apresentam um tamanho superior a 0,5mm e englobam uma variedade de grupos taxonômicos, como os insetos, anelídeos, crustáceos, moluscos, entre outros (CETESB, 2012; Wetzel, 2011; Tundisi e Tundisi, 2008). Os macroinvertebrados são um grupo de grande importância ecológica, pois seus constituintes participam das cadeias alimentares, podendo ser os principais responsáveis pela passagem dos nutrientes ao longo delas (Carvalho e Uieda, 2004). Além disso, eles também são considerados ótimos indicadores das condições ambientais, uma vez que a sua presença e distribuição estão intimamente relacionadas a fatores físicos, químicos e biológicos, como a velocidade e temperatura da água, presença de predadores, concentração de oxigênio dissolvido, entre outros (Tundisi e Tundisi, 2008). Eles diferem entre si em relação à tolerância à degradação ambiental, havendo organismos sensíveis, tolerantes e resistentes a determinadas condições (Rosenberg e Resh, 1993; Callisto et al., 2001). Além disso, por serem organismos relativamente estáveis, em relação ao tempo e ao espaço, a sua presença/ausência reflete as mudanças ocorridas no ecossistema (Barbosa et al., 2001). No caso dos bentônicos, são encontrados colonizando o substrato de fundo (CETESB, 2012).

O crescimento populacional e fatores como o uso excessivo/indevido dos corpos de água, a poluição, a eutrofização e o esgotamento de lençol freático são responsáveis pela degeneração dos ambientes aquáticos (Khan e Ansari, 2005; Barreto, 2013). No Brasil e na maioria dos países em desenvolvimento, o principal aporte de matéria orgânica é advindo do esgoto bruto, que é lançado em grande escala nos cursos de água, e tem sido apontado como o principal responsável pela eutrofização dos ambientes aquáticos (Barreto, 2013).

O estado de São Paulo possui um rio muito conhecido em termos de poluição e eutrofização, o rio Tietê. Sua nascente está localizada no município de Salesópolis, na Serra do Mar, apresenta mais de mil quilômetros de extensão e atravessa todo o estado até desaguar no rio Paraná (Ripoli, 2016). Sua degradação iniciou-se no início do século XIX, acompanhando a expansão urbana e a instalação de indústrias na cidade de São Paulo, com o consequente início do processo de contaminação orgânica e inorgânica (Ripoli, 2016; Buckeridge e Ribeiro, 2018). Segundo Buckeridge e Ribeiro (2018), as principais causas da degradação dos rios da região metropolitana de São Paulo, incluindo o rio Tietê, são:

- “i) o tratamento incompleto dos volumes de esgotos produzidos (somente 30% a 40% são tratados);
- ii) o desmatamento e avanço da urbanização, que aumenta a drenagem de águas contaminadas e poluídas para os mananciais;
- iii) a poluição atmosférica – partículas e substâncias dissolvidas que são incorporadas aos rios, represas e mananciais;
- iv) as inúmeras atividades humanas que contaminam os sistemas superficiais e subterrâneos – postos de gasolina, oficinas mecânicas, depósitos de material, poços clandestinos e fossas; e
- v) as falhas na canalização de distribuição de água e contaminação a partir das diferentes fontes.”

O rio Tietê, a décadas, vêm sendo depositário de esgoto bruto da cidade mais populosa do Brasil, São Paulo, e também recebe outros tipos de resíduos e contaminantes como fertilizantes, pesticidas, herbicidas, medicamentos e plásticos (Tundisi et al., 2015). Essa situação de degradação do rio pode ser verificada a partir da evolução da mancha de anaerobiose que existe próximo a cidade metropolitana de São Paulo, onde a qualidade da água é considerada ruim ou péssima, de acordo com a resolução do Conama nº 357, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece normas e critérios para o lançamento de efluentes. Em 2022, esta mancha apresentava mais de 100km de extensão, tendo um crescimento de 43% em relação ao ano de 2021 (SOS Mata Atlântica, 2022).

A perda de espécies e alterações na estrutura das comunidades aquáticas são associadas com a poluição e a eutrofização em rios, especialmente em regiões com grandes densidades populacionais, como é o caso do Rio Tietê (Marques e Barbosa, 2001; Martinelli et al. 2002).

Dessa forma, nesse estudo procurou-se avaliar o efeito dessa poluição intensa na comunidade de macroinvertebrados bentônicos em dois períodos distintos (chuvoso e seco). Para isso, comparamos os organismos presentes em um rio extremamente poluído, uma de suas lagoas marginais (sem nome) e um de seus tributários (rio do Peixe), este último não afetado pela presença de áreas urbanas. Lagoas marginais são sistemas importantes para a manutenção e integridade da biodiversidade regional (Welcomme, 1985), mas, nesse caso, pode estar acumulando a poluição oriunda do rio principal devido a sua hidrodinâmica limitada - pequena conexão hidrológica. Tendo em vista as características intrínsecas desses organismos, como a baixa mobilidade e graus diferenciados de tolerância aos fatores ambientais, foi previsto encontrar diferenças em termos de composição, riqueza, densidade e diversidade, nos três ambientes selecionados. Também esperou-se observar uma grande densidade de organismos tolerantes nos ambientes mais impactados. Poucos estudos foram realizados no corpo lótico do rio Tietê, sendo, em sua maioria, realizados em seus reservatórios. Esse é o primeiro estudo realizado nessa localidade, com a comunidade de macroinvertebrados bentônicos, e utilizando uma de suas lagoas marginais e um tributário (rio do Peixe) como comparação.

OBJETIVOS

1. Caracterizar os diferentes ambientes (rio Tietê, sua lagoa marginal e o rio do Peixe) e períodos (chuvoso e seco) quanto as variáveis limnológicas da água e do sedimento.
2. Avaliar a estrutura das comunidades de macroinvertebrados bentônicos e comparar a composição, distribuição, riqueza, densidade absoluta e relativa e diversidade entre os diferentes pontos e períodos de coleta.
3. Avaliar a influência das variáveis ambientais sobre a distribuição dos macroinvertebrados bentônicos.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de Estudo

O estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do médio rio Tietê. A região está localizada no município de Anhembi, aproximadamente 160 km de distância, em linha reta, a jusante da cidade de São Paulo, e 350 km de distância, seguindo os meandros do rio. Foram

selecionados três ambientes distintos: o rio Tietê (22°47' 31.0" S e 48°05' 48.8" W), uma de suas lagoas marginais (sem nome) (22°47'41,70" S e 48°6'24,02" W) e um de seus tributários, localizado na margem esquerda, o rio do Peixe, sem a influência da poluição de grandes centros urbanos (22°49' 42.8" S e 48°06' 0.5" W). A seguir são apresentadas algumas imagens obtidas durante a execução dos trabalhos de campo (Figura 1):

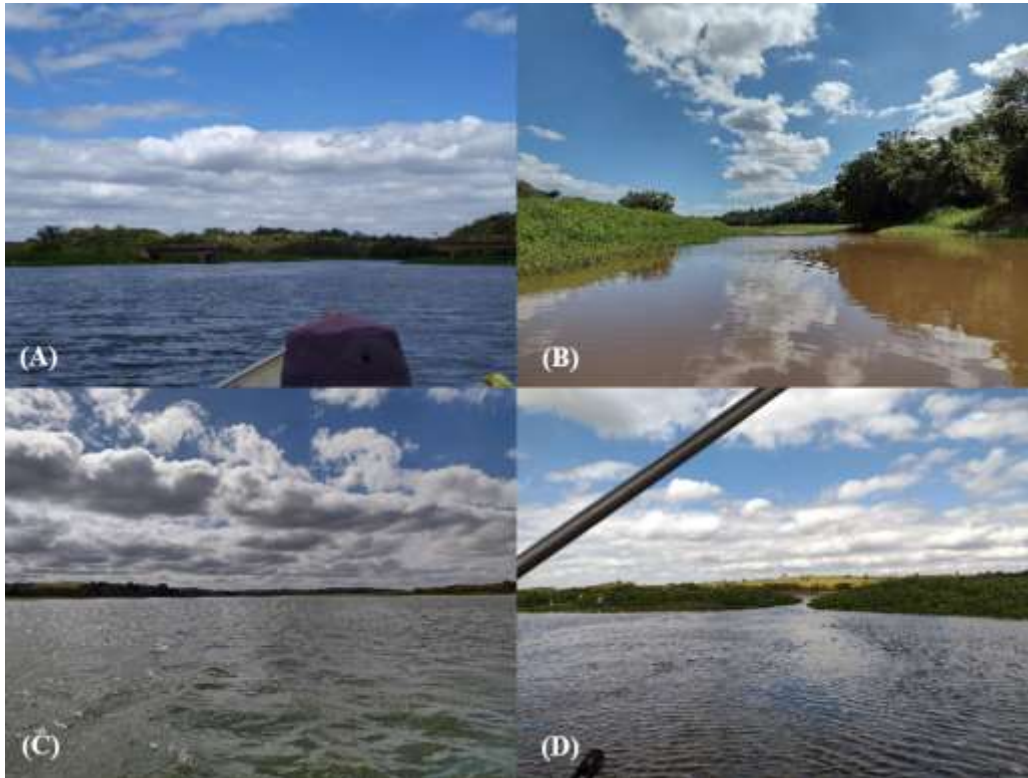


Figura 1 - Rio Tietê (A), rio do Peixe (B), lagoa marginal do rio Tietê (C) e entrada da lagoa (D). Fotos: Camila Magro, 2021.

Desenho do Estudo

As amostragens foram realizadas no final do período chuvoso (abril de 2021) e no período seco (agosto de 2021), a fim de diferenciar os efeitos da sazonalidade sobre o ambiente de estudo. A precipitação acumulada na cidade de São Paulo (estação meteorológica São Paulo-Mirante; <https://bdmep.inmet.gov.br/>) nos trimestres anterior às amostragens foi de 534 mm (janeiro, fevereiro e março) e 100 mm (maio, junho e julho), respectivamente.

Transectos longitudinais de 1 km foram estabelecidos em cada um dos ambientes estudados, sendo um no rio Tietê, um em sua lagoa marginal e um no rio do Peixe (Figura 2). O transecto do tributário foi localizado antes de sua foz junto ao rio Tietê, de modo a não ser diretamente influenciado por ele, isto é, evitando-se a zona de mistura. Cada transecto conta com

5 pontos amostrais equidistantes (considerados como réplicas), totalizando 30 pontos/amostras ao final das duas campanhas.

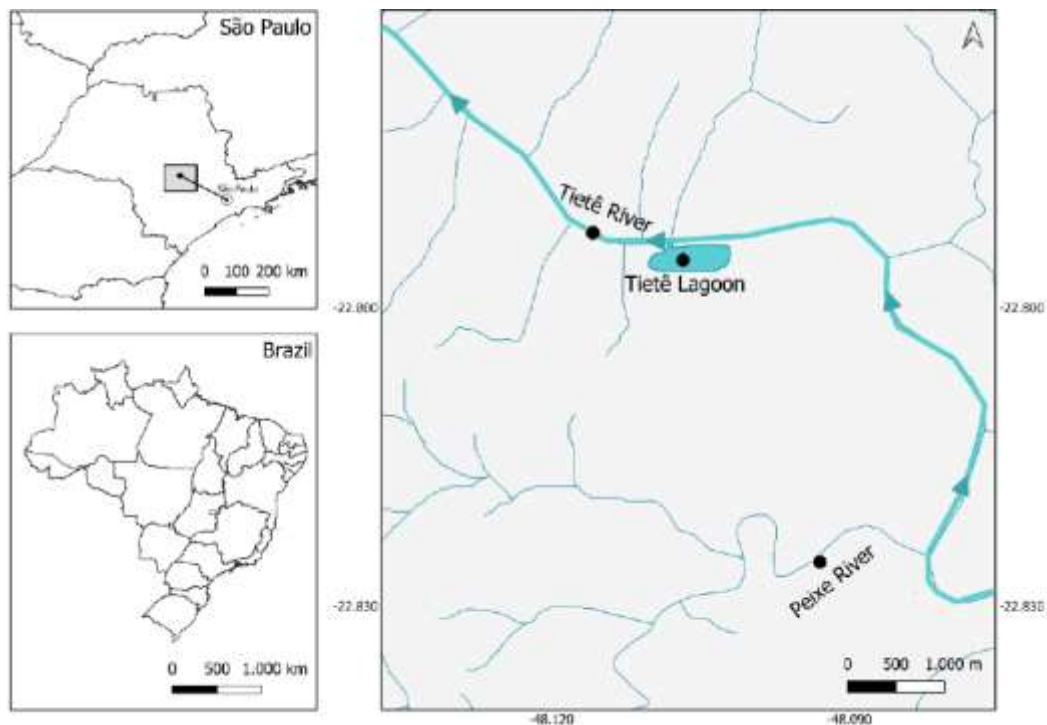


Figura 2 – Mapa da área de estudo com os três locais de amostragem: rio Tietê, lagoa marginal e rio do Peixe.

Variáveis Ambientais – Água

Em cada um dos pontos foram obtidos os parâmetros físico-químicos próximo do sedimento de fundo, com uma sonda multiparâmetros HORIBA modelo U-52, previamente calibrada (Figura 3). Foram medidos: a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, potencial de óxido redução (mV), condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$), turbidez (NTU), oxigênio dissolvido (mg L^{-1} e % saturação) e sólidos totais dissolvidos (g L^{-1}). Em cada ponto também foram medidas a profundidade (m).



Figura 3 – Uso da sonda multiparâmetros no rio do Peixe. Foto: Bruna Quirici Urbanski, 2021.

Variáveis Ambientais – Sedimento

O sedimento foi coletado em cada um dos pontos utilizando uma draga de Van Veen (Figura 4 – A) (abertura de 0.0198 m²) para a determinação de matéria orgânica (MO) (Hakanson e Jason, 1983), tamanho da partícula (AMG: areia muito grossa; AG: areia grossa; AM: areia média, AF: areia fina; AMF: areia muito fina; AS: silte e argila) (Hakanson and Jason, 1983), concentração de fósforo total (Andersen, 1976; APHA, 2017) e nitrogênio elementar (analisador elementar CHNS; marca: Perkin Elmer, modelo: EA 2400 Series II).

Amostragem e Análise de Macroinvertebrados

Os macroinvertebrados foram coletados, em trélicas, em cada um dos pontos utilizando uma draga de Van Veen (abertura de 0.0198 m²) (Figura 4 –A). Seu conteúdo era despejado em uma rede de 250 µm de abertura e lavado no próprio ambiente para eliminar o máximo de sedimento possível (Figura 4 – B). O conteúdo remanescente foi armazenado em sacos plásticos e imediatamente fixado com formol concentração de 8%.



Figura 4 – Uso da Draga de Van Veen lavagem do conteúdo coletado em rede de 250 μm , no rio do Peixe. Fotos: Bruna Quirici Urbanski, 2021.

Após a coleta, em laboratório, as amostras foram novamente lavadas com água corrente em peneira de malha de 250 μm para eliminar partículas orgânicas e inorgânicas que restaram, também sendo feita a remoção de pedras, galhos e folhas. Após a lavagem, o material foi acondicionado em potes plástico, devidamente identificados e preservados em álcool 70%. As amostras foram coradas com Rosa de Bengala a fim de facilitar a triagem.

Os organismos foram analisados sob lupas e identificados até o menor nível taxonômico possível, com o auxílio de bibliografia especializada (Lopretto e Tell, 1995; Mugnai et al., 2010; Trivinho-Strixino, 2011; Pereira et al., 2012; Thorp e Rogers, 2014; Marchese et al., 2020). Para a visualização de detalhes de caracteres morfológicos externos foi utilizado um microscópio comum. Os dados obtidos a partir da contagem dos macroinvertebrados foram convertidos em densidade (ind./m^2) e abundância relativa (%).

Análise dos Dados

Para as análises estatísticas as variáveis limnológicas foram transformadas em $\log_{10}(x-1)$, com exceção do pH. Os valores de matéria orgânica e nitrogênio foram transformados em arcoseno baseado na recomendação de Gotelli e Ellison (2016) para valores percentuais. Para discriminar as diferenças limnológicas entre os locais e os períodos estudados foi feita uma análise dos componentes principais (PCA). Foram feitos testes comparativos (two-way ANOVA ou Kruskal-

Wallis, Holm-Sidak *post hoc*) para avaliar a significância das diferenças entre os locais e períodos de estudo.

Para as comparações previstas foram utilizados os seguintes descritores de estrutura de comunidades: composição, riqueza, densidade, abundância relativa, diversidade de Shannon e equitabilidade de Pielou.

Para caracterizar a estrutura da comunidade de macroinvertebrados foi feita uma análise de agrupamento (Cluster), derivada da similaridade de Bray-Curtis, usando dados de densidade transformados em raiz quadrada. Foi feita uma PERMANOVA para verificar a se variação na estrutura da comunidade foi significativa.

Por fim, foi feito uma análise de redundância baseada em distância (dbRDA) para analisar a relação entre a comunidade dos macroinvertebrados bentônicos e as variáveis ambientais. Para isso, utilizou-se uma matriz com valores de densidade dos táxons e outra matriz com as variáveis abióticas medidas (água e sedimento). A matriz biótica foi transformada usando a distância de Hellinger para reduzir a heterogeneidade dos dados. Foi feita uma ANOVA para verificar a significância do modelo.

Essas análises foram realizadas nos softwares R (v. 4.2.1 – Pacotes: vegan e ggplot2), Primer 6.0 e SigmaPlot 11.0.

RESULTADOS

Características da Água

A temperatura foi similar nos três ambientes e em ambos os períodos. O rio Tietê apresentou os maiores valores para condutividade, total de sólidos dissolvidos e profundidade, e os menores valores para oxigênio dissolvido e turbidez, em ambos os períodos. A lagoa apresentou os maiores valores para pH, oxigênio dissolvido e turbidez, sendo essa última consideravelmente maior no período seco, e os menores valores para potencial de óxido-redução e profundidade, em ambos os períodos. O rio do Peixe apresentou os maiores valores para potencial de óxido-redução e os menores valores para condutividade e total de sólidos dissolvidos (Figura 5 e Anexo 1).

Os três ambientes diferem entre si ($p < 0,001$) para todas as medidas da água (Tabela 1). As variáveis “Temperatura” e “Oxigênio Dissolvido” não apresentaram diferença significativa para a comparação entre os períodos, e a variável “Profundidade” não apresentou diferença significativa

para a comparação Local*Período, as demais variáveis apresentaram diferença significativa para essas comparações.

Tabela 1 - Valores de F e nível de significância (*p*) resultados de uma two-way ANOVA ou Kruskal-Wallis aplicados às variáveis da água medidas no rio Tietê, lagoa marginal e rio do Peixe, em ambos os períodos.

Variáveis	Local		Período		Local*Período	
	F	<i>p</i>	F	<i>p</i>	F	<i>P</i>
Temp. (°C)	147,12	<0,001	1,38	0,252	4,52	0,022
pH	1932,4	<0,001	99,84	<0,001	9,55	<0,001
ORP (mV)	845,9	<0,001	4,85	0,038	14,9	<0,001
CD (μS cm ⁻¹)	27587,9	<0,001	2019,2	<0,001	323,6	<0,001
TU (NTU)	152,3	<0,001	42,9	<0,001	51,8	<0,001
OD (mg L ⁻¹)	203,7	<0,001	2,97	0,098	3,44	0,049
TDS (g L ⁻¹)	28497,5	<0,001	1975,5	<0,001	278,4	<0,001
Prof. (m)	57,8	<0,001	11,8	0,002	2,45	0,107

Temp: temperatura; ORP: potencial de óxido-redução; CD: condutividade elétrica; TU: turbidez; OD: oxigênio dissolvido; TDS: sólidos totais dissolvidos; Prof: profundidade.

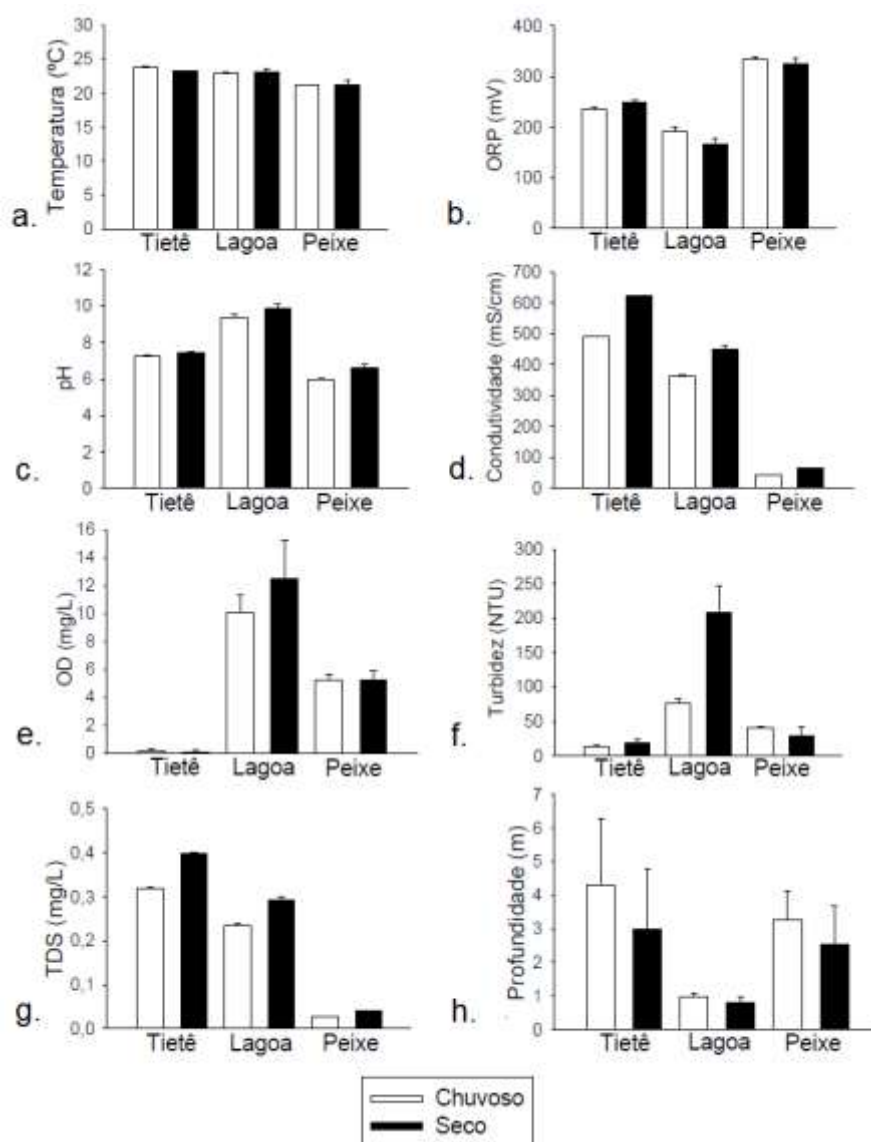


Figura 5– Médias e desvios-padrão das variáveis limnológicas da água medidas no rio Tietê, na lagoa marginal e no rio do Peixe, nos períodos chuvoso (abril) e seco (agosto). a. Temperatura. b. Potencial de óxido-redução. c. pH. d. Condutividade. e. Oxigênio dissolvido. f. Turbidez. g. Total de sólidos dissolvidos. h. Profundidade

Características do Sedimento

Os valores médios e os desvios-padrão do tamanho dos grãos (Φ) dos sedimentos, a granulometria, a porcentagem de matéria orgânica, a concentração de fósforo e nitrogênio obtidos nos três locais de coleta e nas duas estações do ano encontram-se no Anexo 1.

O Rio Tietê apresentou os maiores valores de MO em ambos os períodos (22,9 % no chuvoso e 16,7 % no seco). A lagoa apresentou porcentagens muito próximas em ambos os períodos, variando de 13,0 % a 15,8 % no período chuvoso e 13,7 % a 15,9 % no período seco. O Rio do Peixe apresentou as menores porcentagens de MO em ambos os períodos, sendo o valor máximo de 11,8 % alcançado no período chuvoso e o valor mínimo de 1,6 % alcançado no período seco (Figura 6 – a).

O rio Tietê apresentou os maiores valores de fósforo no sedimento em ambos os períodos (74,3 mg/g ps no período chuvoso e 42,8 mg/g ps no período seco). A lagoa apresentou valores relativamente próximos em ambos os períodos, variando de 35,6 mg/g ps a 45,2 mg/g ps no período chuvoso e 37 mg/g ps a 42,8 mg/g ps no período seco. O rio do Peixe apresentou os menores valores, variando de 7,9 mg/g ps a 1 mg/g d ps no período chuvoso e 3,8 mg/g ps a 0,9 mg/g ps no seco (Figura 6 – b).

O Rio Tietê apresentou as maiores porcentagens (0,85 % no período chuvoso e 0,52 % no período seco). A lagoa apresentou porcentagens muito próximas em ambos os períodos, variando de 0,30 % a 0,47 % no período chuvoso e 0,31 % a 0,40 % no período seco. O rio do Peixe apresentou as menores porcentagens em ambos os períodos, sendo o valor máximo de 0,22 % alcançado no período chuvoso e o valor mínimo de 0,03 % alcançado no período seco (Figura 6 – c).

Com relação ao tamanho dos grãos (Φ) dos sedimentos, no período chuvoso, no rio Tietê os valores de Φ variaram de 3,13 a 3,34, na lagoa variaram de 3,08 a 3,26 e no rio do Peixe variaram de 2,08 a 3,21. No período seco, no rio Tietê os valores variaram de 3,04 a 3,35, na lagoa marginal variaram de 2,88 a 3,42 e no rio do Peixe variaram de 1,73 a 2,46 (Figura 6 - d).

De acordo com a classificação de Håkanson e Jansson (1983), o rio Tietê apresentou o predomínio da fração silte na maioria dos pontos, em ambos os períodos, mas também com a ocorrência de areia fina em alguns deles. A lagoa apresentou o predomínio de silte, no período chuvoso, com a ocorrência de areia fina em um de seus pontos, e o predomínio de areia fina, no período seco, com a ocorrência de silte em um de seus pontos. O rio do Peixe apresentou o

predomínio de areia fina nos dois períodos, porém, com a ocorrência de areia média em dois de seus pontos no período seco.

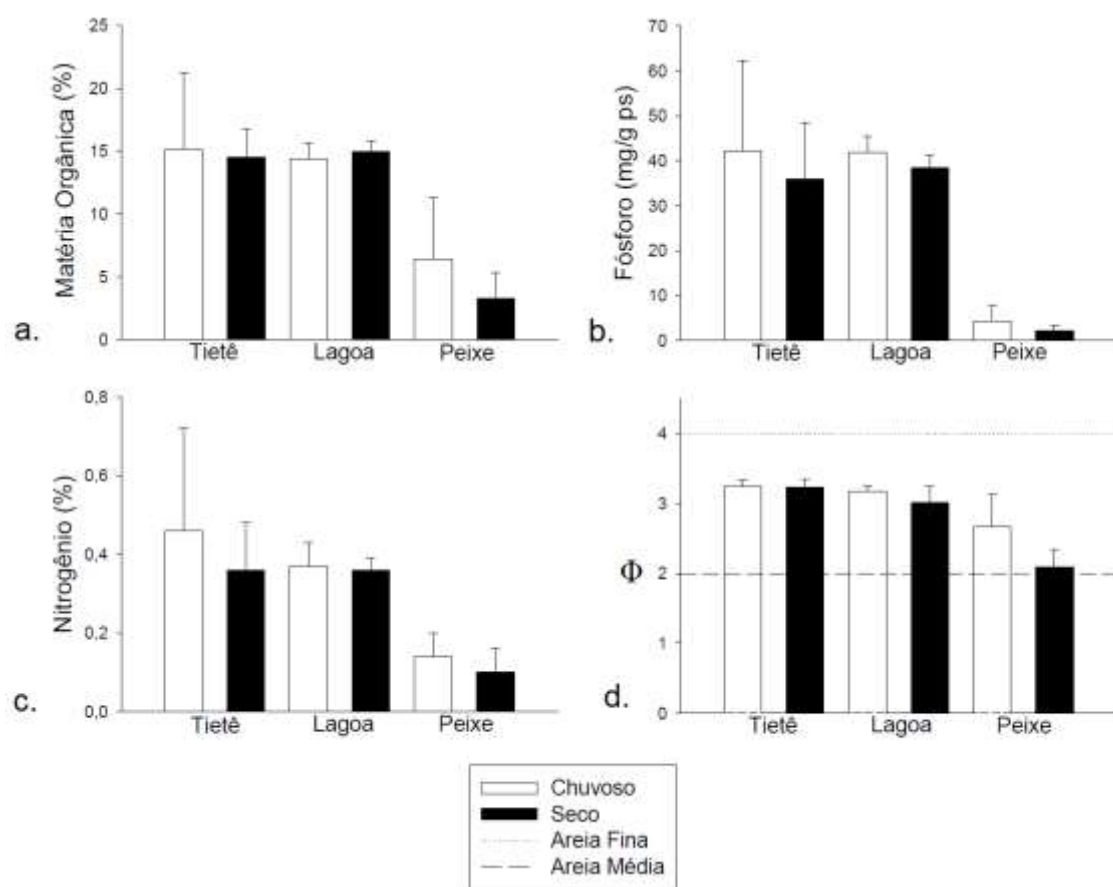


Figura 6 - Médias e desvios-padrão das variáveis limnológicas do sedimento medidas no rio Tietê, na lagoa marginal e no rio do Peixe, nos períodos chuvoso (abril) e seco (agosto). a. Matéria Orgânica. b. Fósforo. c. Nitrogênio Elementar. d. Φ .

Os três ambientes diferem entre si ($p < 0,001$) para todas as medidas do sedimento (Tabela 2). Houve diferença significativa para a comparação entre períodos e Local*Período apenas para a variável “ Φ ”.

Tabela 2 - Valores de F e nível de significância (p) resultados de uma two-way ANOVA ou Kruskal-Wallis aplicada as variáveis do sedimento obtidas no rio Tietê, lagoa marginal e rio do Peixe, em ambos os períodos.

Variáveis	Local		Período		Local*Período	
	F	p	F	p	F	P
Fósforo	46,16	<0,001	0,613	0,441	0,257	0,775
Nitrogênio	17,03	<0,001	0,803	0,379	0,128	0,881
Matéria Orgânica	27,11	<0,001	0,709	0,408	0,772	0,473
Φ /Phi	35,13	<0,001	7,819	0,010	3,410	0,050

Com relação as 4 variáveis do sedimento (fósforo, nitrogênio, matéria orgânica e Φ), os três ambientes diferem entre si ($p < 0,05$) em ambos os períodos. No entanto, o teste *post hoc* (Anexo 2) indicou que não houve diferença significativa entre lagoa e Tietê para todas essas variáveis e nos dois períodos do ano.

A análise de componentes principais (PCA) (Figura 7) foi feita com 11 variáveis, sendo que “Turbidez” e “Oxigênio Dissolvido” apresentaram os maiores valores de correlação (PC 2) (Tabela 3). A explicação no eixo 1 foi de 65,8%, no eixo 2 foi de 23,8%, somando 89,6%. O eixo 2 separa o rio do Peixe à esquerda e o rio Tietê e sua lagoa a direita. O eixo 1 separa rio Tietê e a lagoa marginal. É possível perceber uma nítida separação entre os três ambientes analisados e, particularmente para a lagoa, o efeito da sazonalidade.

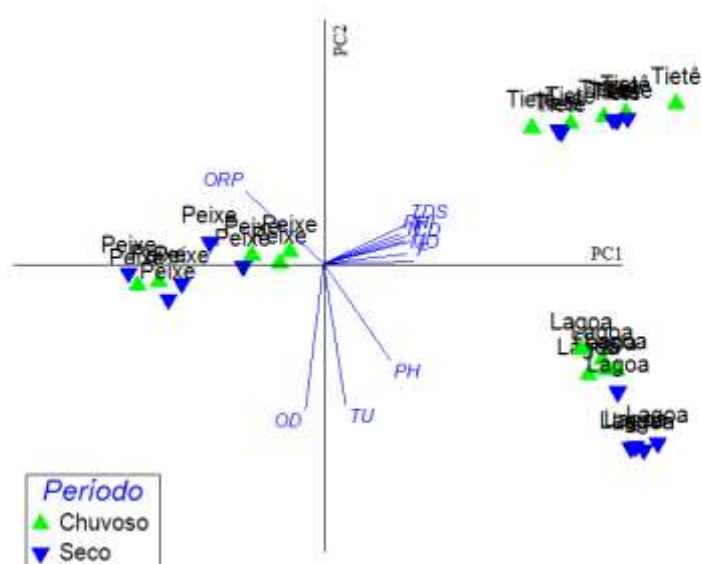


Figura 7 – Resultado gráfico PCA (PC1 e PC2), a partir das variáveis limnológicas medidas no rio Tietê, na lagoa marginal e no rio do Peixe, nos períodos chuvoso e seco.

Tabela 3 - Valores das correlações das variáveis com os PC1 e PC2.

Variável	PC1	PC2
Fósforo Total	0,366	0,009
Nitrogênio Elementar	0,330	0,093
Phi	0,310	0,120
Matéria Orgânica	0,340	0,040
Temperatura	0,339	0,112
pH	0,274	-0,396
ORP	-0,318	0,294
Condutividade	0,353	0,089

Turbidez	0,089	-0,575
Oxigênio Dissolvido	-0,073	0,596
Sólidos Dissolvidos Totais	0,342	0,162

Macroinvertebrados

As comunidades de macroinvertebrados bentônicos encontrados no rio Tietê, na sua lagoa marginal e no rio do Peixe, incluíram organismos pertencentes aos Platyhelminthes, Nematoda, Mollusca, Annelida e Arthropoda, sendo representados por um total de 37 táxons (Tabela 4).

Tabela 4 – Lista do total de táxons (categorias taxonômicas consideradas assinaladas com X) encontrados nos três locais de coleta e em ambos os períodos. (Fontes do sistema de classificação: itis.gov; Mugnai et al., 2010; Trivinho-Strixino, 2011; Pereira et al., 2012)

Platyhelminthes	
Turbellaria	X
Nematoda	X
Mollusca	
Bivalvia	
Sphaeriidae	X
<i>Corbicula flumínea</i> (Müller, 1774)	X
<i>Eupera</i> sp.	X
Gastropoda	
Ampullariidae	X
Ancylidae	X
<i>Melanoides tuberculata</i> (Müller, 1774)	X
Annelida	
Hirudinea	X
Oligochaeta	X
<i>Branchiura sowerbyi</i> (Beddard, 1892)	X
<i>Dero</i> sp. *	X
Arthropoda	
Arachnida	
Acari	X
Crustacea	
Ostracoda	X
Hexapoda	
Collembola	X
Coleoptera	X
Diptera	X
Ceratopogonidae	X
Chironomidae	
Chironominae	X
<i>Aedokritus</i> sp	X
<i>Chironomus</i> sp.	X
<i>Dicrotendipes</i> sp.	X

<i>Endotribelos</i> sp.	X
<i>Paralauterborniella</i> sp.	X
<i>Polypedilum</i> sp.	X
<i>Tanytarsus</i> sp.	X
Tanypodinae	X
<i>Ablabesmya</i> sp.	X
<i>Coelotanypus</i> sp.	X
<i>Larsia</i> sp.	X
<i>Tanypus stellatus</i> (Coquillett, 1902)	X
Ephemeroptera	X
Polymitarcyidae	X
Caenidae	X
Hemiptera	
Aphididae	X
Odonata	X
<i>Aphylla</i> sp.	X
Trichoptera	X

No rio Tietê foram encontrados 12 táxons no período chuvoso e somente 3 no seco. Na lagoa marginal foram encontrados 8 táxons no período chuvoso e 6 no seco. No rio do Peixe foram encontrados 22 táxons no período chuvoso e 29 no seco. Uma lista com todos os táxons encontrados em cada um dos pontos, nos três locais de coleta e nos distintos períodos encontra-se no Anexo 2.

Os dados obtidos a partir da contagem dos macroinvertebrados foram convertidos em densidade e abundância relativa (Anexo 4). A densidade total de indivíduos no rio Tietê foi 16.599 ind./m² no período chuvoso e 16.448 ind./m² no período seco, sendo o táxon *Oligochaeta* representante de 89% e 99% desses valores, respectivamente (Figura 8).

A densidade total de indivíduos na lagoa marginal ao rio Tietê foi de 18.788 ind./m² no período chuvoso e 6.364 ind./m² no período seco, sendo o táxon *Oligochaeta* representante de 94% e 98% desses valores, respectivamente (Figura 8).

A densidade total de indivíduos no rio do Peixe foi de 20.101 ind./m² no período chuvoso e 18.906 ind./m² no período seco. *Oligochaeta* e *Corbicula fluminea* foram os maiores representantes no período chuvoso, e *Oligochaeta* e *Ostracoda* foram os maiores representantes período seco (Figura 8).

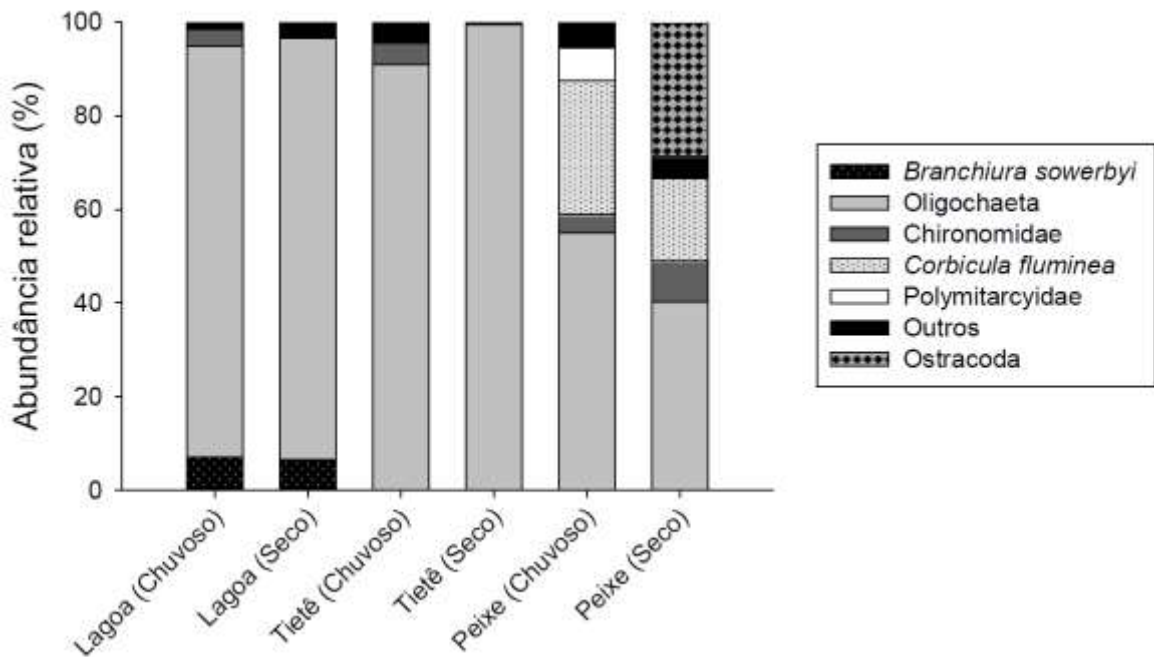


Figura 8 – Abundância relativa dos táxons pertencentes à fauna bentônica do rio Tietê, lagoa e rio do Peixe nos períodos chuvoso (abril) e seco (agosto).

Os valores médios e os desvios-padrão da riqueza, diversidade e equitabilidade obtidos nos três locais de coleta e nas duas estações do ano encontram-se no Anexo 5.

O menor valor de riqueza por ponto, apenas 1 táxon, foi observado no Rio Tietê (1 ponto no chuvoso e 4 pontos no seco). Os maiores valores de riqueza foram observados no rio do Peixe, com o máximo de 16 táxons (1 ponto no chuvoso). A lagoa marginal apresentou uma variação de 2 a 6 táxons por ponto, no período chuvoso e de 2 a 4 táxons por ponto, no período seco (Figura 9).

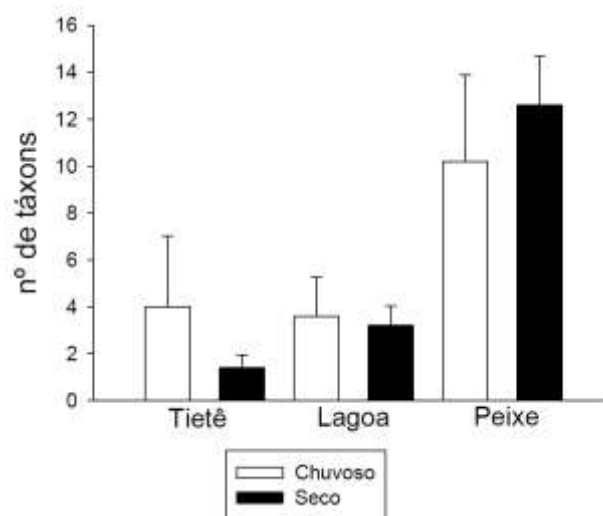


Figura 9 – Riqueza (média e desvio padrão) de táxons de macroinvertebrados bentônicos no rio Tietê, lagoa marginal e rio do Peixe, nos períodos chuvoso e seco.

No período chuvoso a maior diversidade foi encontrada no rio do Peixe (1,635 bits/ind.). A menor foi encontrada no rio Tietê (0,561 bits/ind.). No período seco a maior diversidade foi encontrada no rio do Peixe (2,061 bits/ind.). A menor foi encontrada no rio Tietê (0,04 bits/ind.) (Figura 10 – a).

No período chuvoso a maior equitabilidade foi encontrada no rio do Peixe (0,508). A menor no rio Tietê (0,292). No período seco a maior equitabilidade foi encontrada no rio do Peixe (0,576). A menor no rio Tietê (0,1). O Rio do Peixe apresentou os maiores valores de diversidade e de equitabilidade em ambos os períodos (Figura 5 – b).

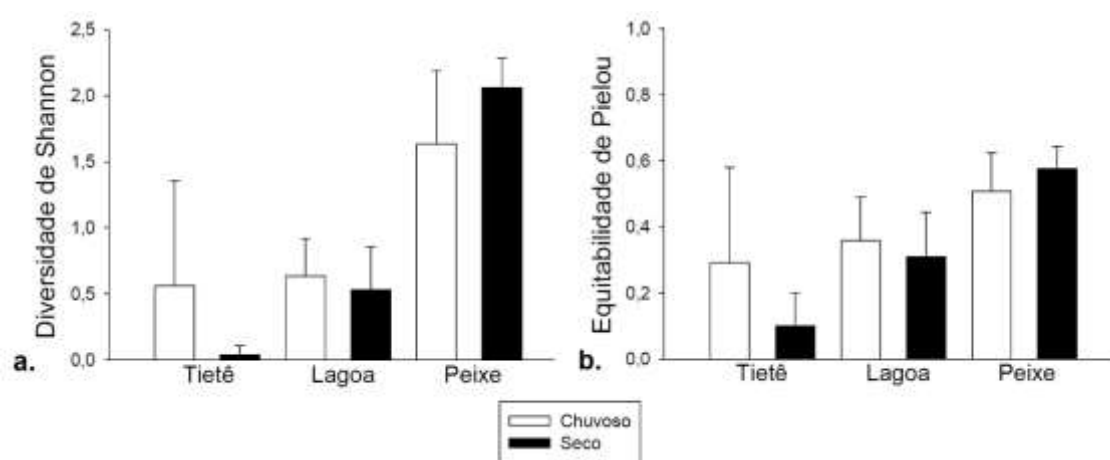


Figura 10 – (a) Diversidade (média e desvio padrão) e (b) equitabilidade (média e desvio padrão) dos macroinvertebrados bentônicos no rio Tietê, lagoa marginal e rio do Peixe, nos períodos chuvoso e seco.

O resultado da two-way ANOVA (Holm-Sidak *post hoc*) para os atributos ecológicos demonstrou diferença significativa ($p < 0,05$) para a riqueza, diversidade de Shannon e equitabilidade de Pielou entre os três locais de amostragem e interação locais/períodos do ano. A densidade não apresentou diferença significativa em nenhuma das comparações (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de F e nível de significância (p) resultados de uma two-way ANOVA aplicada aos atributos ecológicos da comunidade de macroinvertebrados do rio Tietê, lagoa marginal e rio do Peixe, nos períodos chuvoso e seco.

Atributos Ecológicos	Local		Período		Local*Período	
	F	p	F	p	F	P
Riqueza	48,283	<0,001	0,197	0,661	3,433	0,049
Densidade	0,642	0,535	0,837	0,369	0,615	0,549
Diversidade de Shannon	5,591	<0,011	17,343	<0,001	2,497	0,106
Equitabilidade de Pielou	103,922	<0,001	71,821	<0,001	82,755	<0,001

A Figura 11 apresenta o resultado da análise de agrupamento (Cluster), realizada a partir dos dados dos três locais e em ambos os períodos. É possível observar uma clara distinção entre o rio do Peixe dos demais locais, bem como a influência da sazonalidade, com exceção de um ponto que ficou associado a um agrupamento da lagoa. O rio Tietê e sua lagoa marginal se mantiveram próximos, com alguns pontos intercalados entre si. Não é possível perceber o efeito da sazonalidade nesses dois locais. A PERMANOVA apresentou diferença significativa ($p=0,001$) para as separações entre locais.

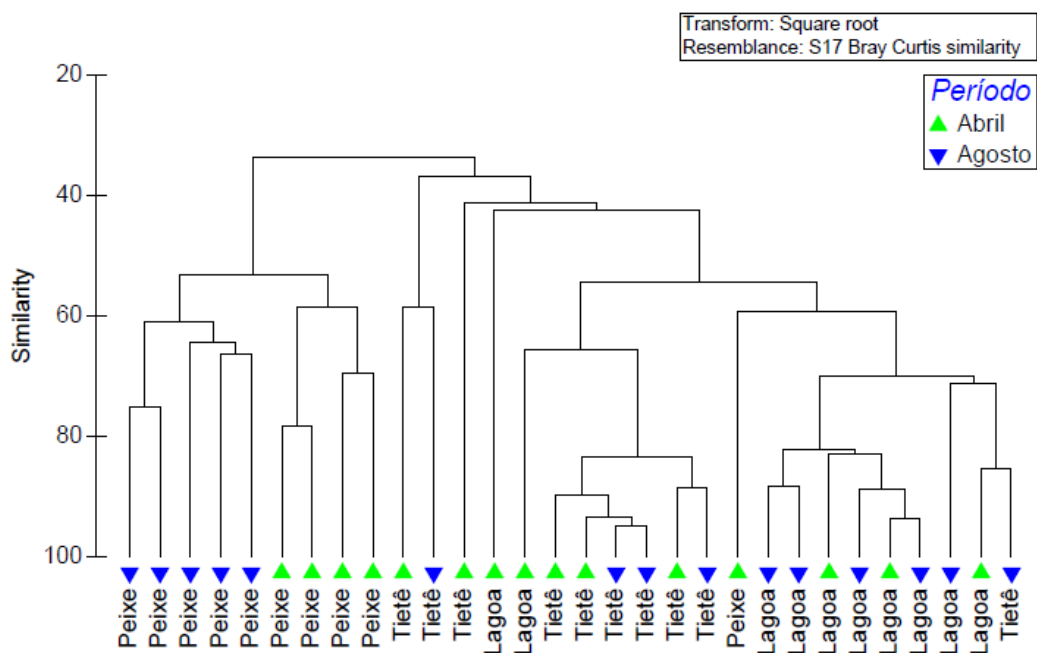


Figura 11 - Análise de agrupamento baseada na fauna de macroinvertebrados do Rio Tietê, da Lagoa e do Peixe em ambos os períodos.

Os resultados da Análise de Redundância Canônica baseada em distância (dbRDA) explicaram 83,6% da variabilidade dos dados, sendo os eixos 1 ($p=0,001$) e 2 ($p=0,008$) significativos ($r^2= 0,72$) (Figura 12). As variáveis que mais contribuíram para a variação foram: fósforo total ($p=0,001$), Phi ($p=0,003$), temperatura ($p=0,035$), pH ($p=0,013$) e nitrogênio elementar ($p=0,029$). O eixo 1 separou o rio do Peixe a direita e os ambientes mais poluídos (rio Tietê e a lagoa) a esquerda junto com as variáveis mais significativamente consideradas. O eixo 2 separou as estações no rio do Peixe. A análise demonstrou que as variáveis fósforo, nitrogênio, temperatura e phi relacionadas positivamente com Oligochaeta.

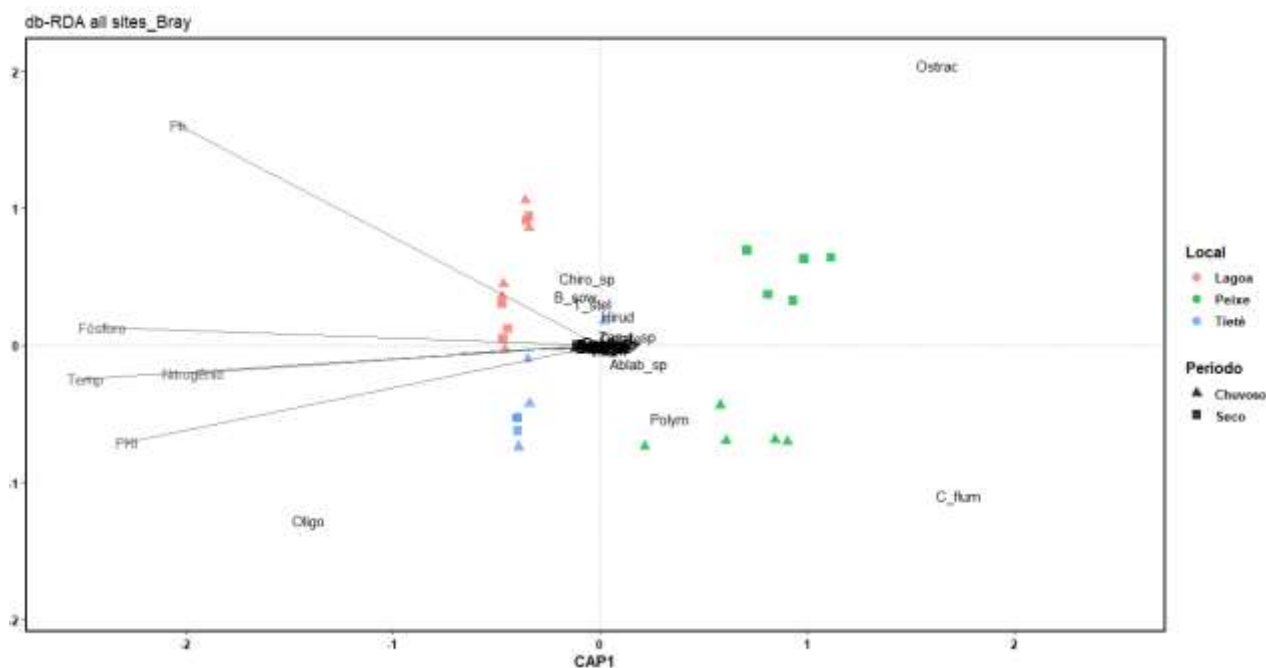


Figura 12 – Relação da distribuição dos macroinvertebrados bentônicos com as variáveis ambientais. São apresentadas na imagem apenas as variáveis que foram significativas ($p < 0,05$), mas as relações com as outras variáveis também foram retidas na análise. Ostrac: Ostracoda. C_flum: *Corbicula flumínea*. Polym: Polymitarcyidae. Oligo: Oligochaeta. Temp: Temperatura.

DISCUSSÃO

Os três ambientes estudados, o rio Tietê, sua lagoa marginal e seu tributário, demonstraram ser diferentes entre si, mas em termos de sedimento (concentrações de fósforo, nitrogênio, material orgânica e granulometria) a lagoa e o rio Tietê compartilham características físico-químicas e altas taxas de nutrientes, em ambos os períodos. A lagoa é influenciada pelo rio Tietê mesmo na estação seca onde sua conexão diminui. Silva (2023), num estudo simultâneo a esse, classificou essas duas áreas como hipereutróficas nos dois períodos a partir do Índice de Estado Trófico (IET), ou seja, são áreas de elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes.

Lagoas marginais são ambientes lênticos adjacentes aos rios, que se conectam de maneira temporária ou constante devido ao transbordamento do rio central (Thomaz et al., 1997; Moschini-Carlos et al., 1998). São locais que possuem comunidades e propriedades limnológicas distintas, mas, de acordo com sua conectividade, podem ser influenciadas pelo rio principal por meio da circulação de água e da troca de partículas e organismos, que promovem modificações nas condições físicas e químicas da água e do sedimento (Mortari, 2009; Suiberto, 2005).

O rio do Peixe apresentou concentrações menores de fósforo, nitrogênio e matéria orgânica em comparação com o rio Tietê e sua lagoa marginal. Foi classificado por Silva (2023) como mesotrófico no período seco e oligotrófico no chuvoso, ou seja, apresenta de baixa a moderada

concentração de matéria orgânica e nutrientes. Sua condutividade foi menor do que $100\mu\text{S}/\text{cm}$ em ambos os períodos, indicando a ausência de atividades impactantes (CETESB, 2019). Tendo em vista a importância dos tributários para a manutenção da diversidade nos ambientes aquáticos (Hoffmann, Orsi e Shibatta, 2005; Vianna e Nogueira, 2008; Vasconcelos et al., 2021), as características apresentadas por este rio podem ser importantes para a manutenção da biodiversidade regional da bacia do médio Rio Tietê.

A partir da Análise de Componentes Principais foi possível visualizar a separação dos três locais e as variáveis que mais influenciaram nos resultados foram o oxigênio dissolvido e a turbidez. Essas variáveis apresentaram os maiores valores na lagoa marginal em ambos os períodos. Segundo a CETESB (2016), em ambientes eutrofizados, uma importante fonte de oxigênio é a fotossíntese das algas. Nesse caso, o crescimento excessivo desses organismos pode elevar as concentrações de oxigênio para valores superiores a $10\text{mg}/\text{L}$. Esse fenômeno ocorre principalmente em locais com baixa velocidade de água. Silva (2023) encontrou concentrações de clorofila *a* 550 vezes maior nessa lagoa em comparação com o rio Tietê e o rio do Peixe.

Com relação a turbidez, na estação chuvosa esse valor pode ser explicado pela influência do rio Tietê, o qual recebe um grande aporte de esgoto e esse é um dos fatores podem influenciar nessa medida (CETESB, 2016). Na estação seca esse valor pode ser explicado pelo crescimento exacerbado das microalgas, pela bioturvação promovida pelos organismos e pela erosão de suas margens, e devido a sua hidrodinâmica limitada, essas partículas ficam concentradas nessa região (CETESB, 2016; Pinto e Antunes, 2020; Brilhante et al., 2022). Bambi e Silva (2000) e Brilhante et al. (2022) também observaram um aumento de turbidez em lagoas marginais durante o período seco. No entanto, os desvios-padrão se mostraram consideravelmente altos, possivelmente pelas diferenças entre os pontos amostrados (alguns mais próximos das margens e outros mais ao centro da lagoa), tendo em vista que esses fenômenos não ocorrem de maneira uniforme devido a ação do vento.

Em rios eutrofizado, com altas cargas de poluição orgânica e baixas concentrações de oxigênio dissolvido, a biodiversidade diminui, ocorrendo a presença de organismos tolerantes como os oligoquetos, quironomídeos e alguns moluscos, os quais podem ser encontrados em altas densidades (Callisto et al., 2001; Moura e Silva et al., 2016). Isso foi verificado no rio Tietê e na lagoa, que apresentaram uma grande abundância de *Oligochaeta* em ambos os períodos, contribuindo com mais de 80% do total de organismos amostrados. Também foram encontradas diferenças em termos de composição, riqueza e diversidade entre os três locais estudados, sendo esses valores menores nos ambientes mais eutrofizado (rio Tietê e sua lagoa). Esses resultados corroboram a hipótese inicial.

Em um estudo realizado por Suriani (2006) na represa de Barra Bonita, localizada no rio Tietê, abaixo do trecho de estudo, as abundâncias relativas de Oligochaeta foram inferiores em comparação com as encontradas nesse estudo e variaram entre 12,5% e 41,8%. Além disso, a dbRDA relacionou positivamente os Oligochaeta com as variáveis fósforo e nitrogênio, os quais apresentaram os maiores valores no Rio Tietê e na sua lagoa marginal, ou seja, houve uma dominância desses organismos nos ambientes mais eutrofizados. Dentre os Oligochaeta encontrados na lagoa foi observado a presença de *Branchiura sowerbyi*. Essa espécie apresentou uma abundância relativa inferior a 10%, mas tem sido reportada como indicadora de poluição orgânica, estando presente em ambientes com alta concentração de nutrientes e matéria orgânica (Suriani, 2006; Pamplin e Rocha, 2007; Zerlin, 2011).

A elevada densidade de Oligochaeta no rio Tietê, ≥ 15.000 ind./m², a despeito da baixa qualidade de água (e.g. anoxias frequentes), pode ser uma condição especial para a manutenção da principal espécie de peixe com interesse comercial da região, *Prochilodus lineatus* (curimatá). Em um estudo realizado por Urbanski et al. (2023), esta espécie iliófaga da ictiofauna, isto é, que se alimenta no sedimento, apresentou um melhor fator de condição no rio Tietê quando comparado ao rio do Peixe.

Suriani (2006) também verificou uma grande abundância de Chironomidae no reservatório de Barra Bonita, os quais foram encontrados no presente estudo em baixas abundâncias nos três locais analisados. Chironomidae é amplamente distribuído nos ambientes aquáticos e algumas espécies apresentam tolerância a condições ambientais extremas como baixo teor de oxigênio dissolvido, podendo sobreviver até mesmo em condições de anoxia, e devido a essas características podem ser um dos únicos insetos presentes no sedimento (Armitage et al., 2012). Por isso, era esperado uma maior abundância desses organismos, principalmente no rio Tietê e lagoa, mas outras características podem estar influenciando na presença desses animais como fatores físico-químicos superiores aos limites de tolerância, quantidade e qualidade de alimento, tipo de substrato e relações com outros organismos presentes no ambiente (Armitage et al., 2012).

O rio do Peixe apresentou elevadas abundâncias para *Corbicula fluminea* e para a família de efemérides Polymitarcyidae. *C. fluminea* é um molusco bivalve invasor de origem asiática, com alta capacidade de dispersão e que apresenta uma ampla tolerância às condições ambientais (Vianna e Avelar, 2010; Suriani, 2006). Essa espécie já foi registrada na bacia do médio Rio Tietê e, apesar de apresentar uma densidade consideravelmente alta no Rio do Peixe, não foi encontrado nenhum espécime no rio principal (Suriani, 2006; Rocha 2011). A ausência dessa espécie pode ser explicada devido a quantidade de matéria orgânica em suspensão, a qual tende a obstruir os mecanismos alimentares dos bivalves em altas concentrações (Arruda et al., 2003).

A ordem Ephemeroptera pertence ao grupo dos organismos mais sensíveis, os quais são altamente dependentes de oxigênio e de boa qualidade da água (Silveira, 2004). Esses organismos, em conjunto com Plecoptera e Trichoptera, são utilizados como bioindicadores da qualidade ambiental em ambientes lóticos (Silveira, 2004; Firmiano et al., 2017). A presença desses organismos em densidades consideráveis ocorreu apenas no período chuvoso no rio do Peixe, quando houve o predomínio de areia fina em relação ao período seco, que apresentou o predomínio de areia média. De acordo com De Pauw e Vanhooren (1983), a presença desses organismos também depende do tamanho das partículas do substrato, podendo ser esse um dos fatores que influenciou na sua ausência no período seco.

Em termos de sazonalidade, quando a estação chuvosa começa, esse maior volume de água dos rios carrega os poluentes que se acumularam durante a estação seca e essas primeiras águas pluviais têm concentrações mais elevadas de contaminantes (Stenstrom e Kayhanian, 2005). À medida que as chuvas continuam e o volume de água aumenta, a diluição ocorre e as concentrações dos poluentes tendem a diminuir (Lee et al., 2004). Os levantamentos realizados pela ONG SOS Mata Atlântica (2015) apontam que nos períodos de chuvas intensas ocorre um agravamento das condições ambientais do rio Tietê, devido a esse fenômeno. Isso prejudica a qualidade da água nos municípios por onde o rio Tietê passa, abaixo da região metropolitana, provocando mortandade de peixes, acúmulo de lixo (principalmente plástico) e algas nos reservatórios (SOS Mata Atlântica, 2015). Esse fenômeno ajuda a explicar os resultados obtidos: o rio Tietê e sua lagoa marginal foram melhor classificados em termos de riqueza e diversidade nessa estação em comparação com a estação seca. Como o estudo foi realizado no final do período chuvoso não foi possível verificar os efeitos do primeiro fluxo sazonal e, no momento de coleta, a diluição já poderia estar ocorrendo de forma mais acentuada. Consequentemente, o impacto da poluição sobre os organismos foi menor. Dessa forma, para melhor avaliar a composição da fauna bentônica seria necessário realizar coletas ao longo desse período.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eutrofização é um fenômeno com diversas implicações socioeconômicas e para os ecossistemas aquáticos, e seu estágio final é praticamente irreversível, sendo necessário muita energia e capital para evitar com que o ambiente se torne inútil para o homem (Esteves, 1988). O relatório “Observando o Tietê 2022” da ONG SOS Mata Atlântica aponta pequenas melhorias na qualidade da água desse rio desde 2016, comprovando que sua recuperação é possível por meio de programas de saneamento ambiental efetivos e com investimentos garantidos de longo prazo. No

entanto, os impactos da poluição ainda são percebidos na qualidade da água e na composição dos organismos bentônicos, apesar da distância de cerca de 350km da capital, e os resultados deste estudo ilustram essa condição. O rio Tietê e sua lagoa marginal são ambientes eutrofizados que compartilham características físico-químicas muito similares e uma grande densidade de organismos tolerantes a essas condições, que são observadas nos diferentes períodos do ano. Por outro lado, seu tributário rio do Peixe é mais bem qualificado em termos de variáveis ambientais, além de apresentar uma maior riqueza e diversidade de organismos bentônicos. Apesar dos esforços para a redução da poluição do rio e de sua bacia como um todo ainda há muito a ser feito. A despoluição desse rio deve ser prioridade nas políticas públicas, tendo em vista sua dimensão e sua possibilidade de tornar-se uma alternativa a segurança hídrica no estado de São Paulo. Estudos como este ressaltam a necessidade de medidas de manejo e recuperação desse importante recurso hídrico paulista.

REFERÊNCIAS

- ARMITAGE, Patrick D.; PINDER, L. C.; CRANSTON, P. S. (Ed.). **The Chironomidae: biology and ecology of non-biting midges**. Springer Science & Business Media, 2012.
- ARRUDA, E. P.; DOMANESCHI, O.; AMARAL, A. C. Z. Mollusc feeding guilds on sandy beaches in São Paulo State, Brazil. **Marine Biology**, v. 143, p. 691-701, 2003.
- ALBA-TERCEDOR, Javier. Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. In: **IV Simposio sobre el Agua en Andalucía: Almería, diciembre 1996**. IGME, 1996. p. 203.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, eds. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23th ed. Washington DC: APHA Press; 2017.
- ANDERSEN, Jens Moller. An ignition method for determination of total phosphorus in lake sediments. **Water research**, v. 10, n. 4, p. 329-331, 1976.
- BAMBI, P. & SILVA, V.P. 2000. Produção primária do fitoplâncton e as relações com as principais variáveis limnológicas da baía das Pedras, Pirizal, Pantanal, MT. In **III Simpósio sobre recursos naturais e sócio-econômicos do Pantanal: os desafios do novo milênio**. Corumbá - MS. Embrapa, Brasília, p. 114.
- BARBOSA, F. A. R.; CALLISTO, M.; GALDEAN, N. The diversity of benthic macroinvertebrates as an indicator of water quality and ecosystem health: A case study for Brazil. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, v. 4, n. 1, p. 51, 001.

- BARRETO, L. V. et al. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 9, n. 16; p. 2165, 2013.
- BRILHANTE, Francisco Davi Fernandes et al. Qualidade ambiental de água oriunda de lagoas marginais utilizadas para fins de pesca artesanal em comunidade quilombola maranhense. **Meio ambiente e a outra economia dos povos e comunidades tradicionais**, v. 1, n. 1, p. 61-72, 2022.
- BUCKERIDGE, Marcos; RIBEIRO, Wagner Costa; AMBRIZZI, Tércio; et al. Lançamento do Livro Branco da Água. **Estudos Avançados da USP - IEA-USP**[S.l: s.n.], 2018.
- CALLISTO, Marcos et al. Macroinvertebrados bentônicos como ferramenta para avaliar a saúde de riachos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 71-82, 2001.
- CARPENTER, Stephen R. et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. **Ecological applications**, v. 8, n. 3, p. 559-568, 1998.
- CARVALHO, E. M. & UIEDA, V. S. 2004. Colonização por macroinvertebrados bentônicos em substrato artificial e natural em um riacho da serra de Itatinga, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia** 21(2): 287-293
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2019. **Apêndice E – Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Ap%C3%AAndice-E-Significado-Ambiental-e-Sanit%C3%A1rio-das-Vari%C3%A1veis-de-Qualidade-2016.pdf>
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2012. **Protocolo para o biomonitoramento com as comunidades bentônicas de rios e reservatórios do estado de São Paulo**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-/relatorios>
- DE PAUW, Niels; VANHOOREN, Gerard. Method for biological quality assessment of watercourses in Belgium. **Hydrobiologia**, v. 100, p. 153-168, 1983
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2ª Edição. Interciência, Rio de Janeiro, 1988. 210p.
- FIRMIANO, Kele R. et al. Mayfly bioindicator thresholds for several anthropogenic disturbances in neotropical savanna streams. **Ecological Indicators**, v. 74, p. 276-284, 2017.
- GOTELLI, Nicholas J.; ELLISON, Aaron M. **Princípios de estatística em ecologia**. ARTMED editora, 2016.

- HARPER, David M. et al. **Eutrophication of freshwaters**. London: Chapman & Hall, 1992.
- HÅKANSON, Lars; JANSSON, Mats. **Principles of lake sedimentology**. Berlin: Springer-verlag, 1983.
- HOFFMANN, Ana Cecília; ORSI, Mario L.; SHIBATTA, Oscar A. Diversidade de peixes do reservatório da UHE Escola Engenharia Mackenzie (Capivara), Rio Paranapanema, bacia do alto rio Paraná, Brasil, e a importância dos grandes tributários na sua manutenção. **Iheringia. Série Zoologia**, v. 95, p. 319-325, 2005.
- KHAN, Fareed A.; ANSARI, Abid Ali. Eutrophication: an ecological vision. **The botanical review**, v. 71, n. 4, p. 449-482, 2005.
- LEE, Haejin et al. Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges. **Water research**, v. 38, n. 19, p. 4153-4163, 2004.
- LOPRETTO, Estela C.; TELL, Guillermo. **Ecosistemas de aguas continentales Metodologías para su estudio**. Ediciones Sur, 1995.
- MARQUES, M.M., BARBOSA, F. Biological quality of waters from an impacted tropical watershed (middle Rio Doce basin, southeast Brazil), using benthic macroinvertebrate communities as an indicator. **Hydrobiologia** 457, 69–76 (2001).
- MARCHESE, Mercedes R. et al. Phylum Annelida. In: **Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates**. Academic Press, 2020. p. 431-486.
- MARTINELLI, Luiz Antonio et al. Levantamento das cargas orgânicas lançadas nos rios do Estado de São Paulo. **Biota Neotropica**, v. 2, p. 1-18, 2002.
- MUGNAI, Riccardo; NESSIMIAN, Jorge Luiz; BAPTISTA, Darcilio Fernandes. Manual de identificação de macroinvertebrados aquáticos do Estado do Rio de Janeiro: para atividades técnicas, de ensino e treinamento em programas de avaliação da qualidade ecológica dos ecossistemas lóticos. **Technical Books** Editora, 2010.
- PINTO, Filipe; ANTUNES, Sara C. Biomanipulação para o controlo da eutrofização. **Revista de Ciência Elementar**, v. 8, n. 1, 2020.
- PEREIRA, D.; MANSUR, M. C. D.; PIMPÃO, D. M. Identificação e diferenciação dos bivalves límnicos invasores dos demais bivalves nativos do Brasil. **Moluscos límnicos invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle**, p. 75-94, 2012.
- RIPOLI, M, M. **Entre o discurso e a prática: o embate de ideias e as práticas de intervenção do urbanismo paulistano para a várzea do rio Tietê**. 2016. Dissertação (Mestrado em

- Planejamento Urbano e Regional) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. doi:10.11606/D.16.2016.tde-02092016-143623.
- ROCHA, Odete et al. Animal invaders in São Paulo state reservoirs. **Oecologia Australis**, v. 15, n. 3, p. 631-642, 2011.
- ROSENBERG, D. M., & RESH, V. H. (Eds.). (1993). **Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates** (Vol. 488). New York: Chapman & Hall.
- SILVA, Gabriel Mariano. **Efeito da poluição de uma megalópole sobre o zooplâncton e a contaminação por microplásticos no médio rio Tietê (SP)**. 2023. Dissertação (Mestrado em Zoologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Botucatu.
- SILVEIRA, M. P. Aplicação do Biomonitoramento para Avaliação da Qualidade da Água em Rios. Jaguariúna, SP: **EMBRAPA Meio Ambiente**, 2004
- SOS Mata Atlântica. “Observando o Tietê 2020 – O retrato da qualidade da água e a evolução dos indicadores de impacto do Projeto Tietê”. **SOS Mata Atlântica**. 2015. Disponível em: https://cms.sosma.org.br/wp-content/uploads/2015/09/relatorio-Tiete-2015_OK.pdf
- SOS Mata Atlântica. “Observando o Tietê 2020 – O retrato da qualidade da água e a evolução dos indicadores de impacto do Projeto Tietê”. **SOS Mata Atlântica**. 2020. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Observando-o-Tiete-2020.pdf>
- STENSTROM, Michael K.; KAYHANIAN, Masoud. **First flush phenomenon characterization**. Sacramento, CA, USA: California Department of Transportation Division of Environmental Analysis, 2005
- SURIANI, Ana Lucia. **A estrutura da comunidade de macro-invertebrados bentônicos em três represas do médio rio Tietê (SP), com ênfase nas espécies exóticas *Melanoides tuberculata* (Gastropoda, Thiaridae) e *Corbicula fluminea* (Bivalvia, Corbiculidae)**. 2006. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
- THORP, James H.; ROGERS, D. Christopher (Ed.). Thorp and Covich's freshwater invertebrates: ecology and general biology. **Elsevier**, 2014.
- TRIVINHO-STRIXINO, Susana. **Larvas de Chironomidae: guia de identificação**. São Carlos: UFSCar, v. 1, n. 2, 2011.
- TUNDISI, J. G. et al. Water availability, water quality water governance: The future ahead. **IAHS-AISH Proceedings and Reports**, v. 366, n. June 2014, p. 75–79, 2015.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. 1 ed., São Paulo, Oficina de textos, 2008.

- URBANSKI, B.Q., BRAMBILLA, E.M & NOGUEIRA, M.G. Length-weight relationship and condition factor for *Prochilodus lineatus*, an importante commercial fish, in contrasting water-quality environments of the middle Tietê River basin, Southeast Brazil. **Biota Neotropica** 23(2): e20231467, 2023
- VASCONCELOS, Lilian Paula et al. Dams in the Amazon: The importance of maintaining free-flowing tributaries for fish reproduction. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 31, n. 5, p. 1106-1116, 2021.
- VIANNA, N. C.; NOGUEIRA, M.G. Ichthyoplankton and limnological factors in the Cinzas River-an alternative spawning site for fishes in the middle Paranapanema River basin, Brazil Ictioplâncton e fatores limnológicos no Rio das Cinzas-um local alternativo de reprodução para os peixes na Bacia do Médio rio Paranapanema, Brasil. **Acta Limnol. Bras** (Vol. 20, Issue 2), 2008.
- VIANNA, Marina Peixoto; AVELAR, Wagner Eustáquio Paiva. Ocorrência da espécie invasora *Corbicula fluminea* (Bivalvia, Corbiculidae) no rio Sapucaí (São Paulo, Brasil). **Biotemas**, v. 23, n. 3, p. 59-66, 2010.
- WELCOMME, Robin L. et al. **River fisheries**. FAO, 1985.
- WETZEL, R.G. **Limnology – Lake and River Ecosystems**. 3rd. Edition. Academic Press. San Diego. 2011. (710 pg)

Capítulo 2

“Contaminação por microplástico nos sedimentos e macroinvertebrados bentônicos da bacia do médio Rio Tietê (SP, Brasil)”

RESUMO

A contaminação do ambiente aquático por resíduos de plástico, especialmente microplásticos (MPs), tornou-se uma preocupação global. Neste estudo, investigamos a presença de MPs no sedimento da bacia hidrográfica do médio rio Tietê, considerado um dos rios mais poluídos do Brasil. Para fins comparativos, analisamos um tributário do, o rio do Peixe, que não sofre influência de poluição urbana, e uma lagoa marginal do Tietê, que pode atuar como depósito de MPs devido à sua hidrodinâmica limitada e conexão restrita com o rio. O objetivo foi avaliar o grau de contaminação por MPs nos sedimentos desses locais e investigar a possível ingestão dessas partículas pelos macroinvertebrados bentônicos, os quais colonizam os sedimentos de fundo permanentemente ou durante parte do seu ciclo de vida, podendo ser afetados diretamente por esse tipo de poluição. Observações anteriores têm relatado a ingestão de MPs por uma variedade de organismos aquáticos, mas os impactos dessa ingestão ainda são pouco compreendidos. Além disso, há uma escassez de estudos sobre a interação entre os macroinvertebrados e as partículas plásticas presentes no ambiente. Portanto, este estudo visa trazer novas informações a respeito dessa relação. Os MPs foram encontrados em todas as amostras de sedimento analisadas e em concentrações nunca antes vista em outros estudos envolvendo rios de grande porte e influenciados por grandes centros urbanos. Com relação aos macroinvertebrados, apenas uma partícula ingerida foi quimicamente identificada como plástico, “poliéster”, mas mais de 70 fibras foram identificadas como celulose possivelmente de origem sintética. Isso representa uma ameaça para esses organismos e para as cadeias alimentares aquáticas, pois ainda não se sabe quais os possíveis impactos dessas partículas sobre os organismos aquáticos e se existe a possibilidade de elas serem incorporados nas cadeias alimentares.

Palavras-chave: contaminantes emergentes, *Branchiura sowerbyi*, FTIR, Oligochaeta, poluição

ABSTRACT

Contamination of the aquatic environment by plastic waste, especially microplastics (MPs), has become a global concern. In this study, we investigated the presence of MPs in the sediment of the middle Tietê river basin, considered one of the most polluted rivers in Brazil. For comparative purposes, we analyzed a tributary of the river, the Peixe River, which is not influenced by urban pollution, and a marginal lagoon on the Tietê, which can act as a MP deposit due to its limited hydrodynamics and restricted connection with the river. The objective was to evaluate the degree of contamination by MPs in sediments from these sites and to investigate the possible ingestion of these particles by benthic macroinvertebrates, which colonize bottom sediments permanently or during part of their life cycle and may be directly affected by this type of pollution. Previous observations have reported the ingestion of MPs by a variety of aquatic organisms, but the effects of this ingestion are still poorly understood. In addition, there is a scarcity of studies on the interaction between macroinvertebrates and plastic particles present in the environment. Therefore, this study aims to bring new information about this relationship. MPs were found in all sediment samples analyzed and in concentrations never before seen in other studies involving large rivers and influenced by large urban centers. With regard to macroinvertebrates, only one ingested particle was chemically identified as plastic, "polyester", however over than 70 fibers were identified as cellulose possibly of synthetic origin. This represents a threat to these organisms and to aquatic food chains, as it is still unknown what the possible impacts of these particles on aquatic organisms are and whether there is any possibility of them being incorporated into food chains.

Keywords: *Branchiura sowerbyi*, emerging contaminants, FTIR, Oligochaeta, pollution

INTRODUÇÃO

Plásticos são materiais sintéticos feitos a partir de polímeros derivados, principalmente, do petróleo e do gás natural, e amplamente utilizados na fabricação de uma variedade de produtos, devido às suas propriedades físicas e químicas favoráveis, como leveza, durabilidade e resistência (Rhodes, 2018). Devido a essas características, a produção desse material tem crescido ao longo do tempo, superando a maioria dos outros materiais produzidos pelo homem (Geyer et al., 2017). No entanto, a grande maioria dos plásticos produzidos não são biodegradáveis e, com isso, se acumulam em aterros ou no ambiente por décadas ou até mesmo séculos (Geyer et al., 2017; Macleod et al., 2021). A contaminação do ambiente natural com resíduos de plástico é uma preocupação crescente e é encontrada globalmente até mesmo em locais inóspitos como desertos, topos de montanhas, oceano profundo e na neve do Ártico (Macleod et al., 2021).

Atualmente, vêm crescendo a preocupação com relação a presença de partículas plásticas nos ambientes aquáticos, bem como seus possíveis impactos sobre os organismos que ali vivem. Esse material chega até os rios a partir de uma gestão inadequada e do seu descarte irregular, e nesse ambiente podem dar origem a partículas cada vez menores, a partir de sua degradação química, física, oxidativa e ultravioleta (Jacobi e Besen, 2011). Os microplásticos (MPs) são partículas menores do que 5mm que podem ser oriundas de plásticos maiores, os quais passam pelo processo acima descrito, mas também podem ser introduzidos diretamente no ambiente aquático na forma de microfibras, microesferas e esferas (pellets), as quais fazem parte da composição de produtos de higiene pessoal, como cosméticos e esfoliantes (Andrady, 2011). Uma outra fonte de MPs são nossas próprias roupas, que eliminam fibras no processo de lavagem e chegam aos rios por não serem retidas nos processos de tratamento da água e esgoto (De Falco et al., 2019; Fendall e Sewell, 2009; Murphy et al., 2016). Os MPs podem ser encontrados na maioria dos corpos de água e representam uma ameaça aos ecossistemas aquáticos (Masura et al., 2015).

Estudos recentes têm verificado a ingestão de MPs por vertebrados e invertebrados, tanto marinhos como de água doce. Exemplos incluem: baleias (Moore et al., 2020), tartarugas (Caron et al., 2018), mexilhões (Vandermeersch et al., 2015), peixes (Neves et al., 2015; Silva-Cavalcanti et al., 2017), insetos (Cuthbert et al., 2019; Silva et al., 2019), e até mesmo sua transferência entre sedimento, macroinvertebrados e aves através da cadeia alimentar (Lourenço et al., 2017). Além disso, partículas plásticas podem acumular poluentes orgânicos persistentes (POPs), metais pesados e antibióticos (Andrady, 2011; Brennecke et al., 2016; Li et al., 2018; Rochman et al., 2014). Esses estudos sugerem que essa contaminação pode entrar nas cadeias alimentares aquáticas, com a ocorrência de bioacumulação e biomagnificação, apresentando riscos à saúde

desses organismos, mas os impactos causados pela ingestão de MPs ainda não são bem compreendidos (Masura et al., 2015).

Um outro grupo que está sujeito a ingestão de MPs são os macroinvertebrados. Poucos estudos foram realizados com esse grupo de organismos MPs (Hurley et al. 2017; Windsor et al., 2019; López-Rojo et al., 2020), mas ainda não está claro a relação entre esses animais e as partículas presentes no ambiente, nem seus possíveis impactos sobre a saúde desses organismos. Dessa forma, esse estudo teve por objetivo avaliar o grau de contaminação por microplásticos, na bacia hidrográfica do médio rio Tietê, a qual recebe, a mais de um século, um grande aporte de resíduos orgânicos e inorgânicos da maior área urbana do país, a cidade de São Paulo (Ripoli, 2016; Buckeridge e Ribeiro, 2018). Comparando ainda esse local com um de seus tributários, o rio do Peixe, o qual não sofre influência de áreas urbanas, e uma das lagoas marginais do próprio Tietê, que pode funcionar como um depósito de MPs devido a sua hidrodinâmica limitada e a sua pequena conexão com o rio. Portanto, é esperado encontrar uma grande quantidade de MPs no sedimento do rio Tietê e uma quantidade ainda maior em sua lagoa, em relação ao tributário, bem como uma maior taxa de ingestão dessas partículas pelos macroinvertebrados nesses locais. Esse é o primeiro estudo que buscou quantificar e caracterizar os MPs presentes no sedimento do rio Tietê, bem como verificar a ingestão dessas partículas pela comunidade bentônica deste rio.

OBJETIVOS

1. Avaliar a presença e a distribuição de MPs no sedimento dos três locais amostrados, quantificá-los e qualificá-los quimicamente, assim quanto ao tamanho, a cor e o formato.
2. Avaliar a ingestão de MPs por macroinvertebrados bentônicos, bem como quantificá-los e caracterizá-los de acordo com o tamanho, a cor, o formato e identidade química.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de Estudo

O estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do médio Tietê. A região está localizada no município de Anhembi, aproximadamente 160 km de distância, em linha reta, a jusante da cidade de São Paulo, e 350 km de distância, seguindo os meandros do rio. Foram selecionados três

ambientes distintos: o rio Tietê ($22^{\circ}47' 31.0''$ S e $48^{\circ}05' 48.8''$ W), uma de suas lagoas marginais (sem nome) ($22^{\circ}47'41,70''$ S e $48^{\circ}6'24,02''$ W) e um de seus tributários, localizado na margem esquerda, o rio do Peixe, sem a influência da poluição de grandes centros urbanos ($22^{\circ}49' 42.8''$ S e $48^{\circ}06' 0.5''$ W).

Na Figura 1, abaixo, são apresentadas algumas imagens obtidas durante a execução dos trabalhos de campo, que demonstram a ocorrência de descarte irregular de resíduos sólidos nos ambientes estudados.



Figura 1 – Plástico encontrado na água do rio Tietê (A), plástico encontrado nas margens do rio Tietê (B, C e D) e plástico encontrado na margem do rio do Peixe (E). Fotos: Camila Magro, 2021.

Desenho do Estudo

As amostragens foram realizadas no final do período chuvoso (abril de 2021). A precipitação acumulada na cidade de São Paulo (estação meteorológica São Paulo-Mirante; <https://bdmep.inmet.gov.br/>) no trimestre anterior foi de 534 mm (janeiro, fevereiro e março). Transectos longitudinais de 1 quilômetro foram estabelecidos em cada um dos rios e trechos estudados, sendo um no rio Tietê, um em sua lagoa marginal e um no rio do Peixe (Figura 2). Cada transecto apresentou 5 pontos amostrais equidistantes, totalizando 15 pontos/amostras.

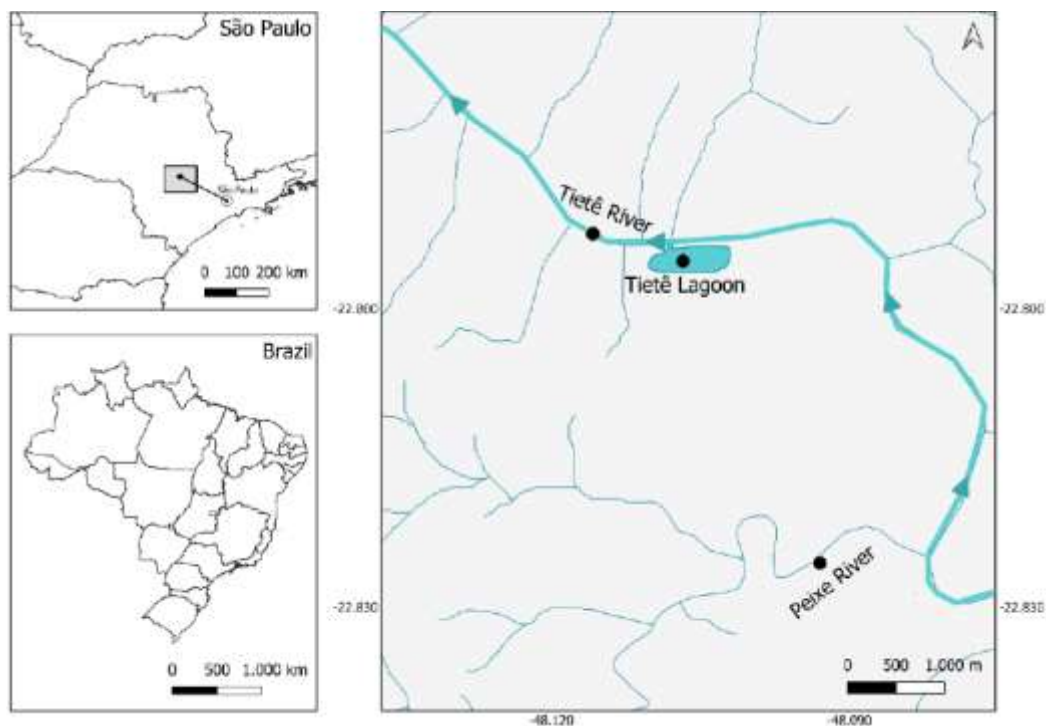


Figura 2 – Mapa da área de estudo com os três locais de amostragem: rio Tietê, lagoa marginal e rio do Peixe.

Amostragem e Análise do Microplástico

O sedimento foi coletado em cada um dos pontos draga de Van Veen (abertura de 0.0198 m²). Seu conteúdo era despejado em potes de vidro e cobertos com papel alumínio a fim de evitar contaminação adicional.

Em laboratório, esse sedimento foi mantido em estufa, a 50°C, até sua completa secagem. Em seguida foi homogeneizado mecanicamente com uso de pistilo em um almofariz de porcelana. Alíquotas de 25g de sedimento seco, de cada uma das amostras individualizadas, foram integradas para formar uma única amostra composta por ambiente. Desse total, uma alíquota de 50g de sedimento seco foi utilizado para o processamento posterior.

Devido as altas concentrações de matéria orgânica presentes nas amostras, a alíquota de cada ambiente passou por uma digestão química utilizando uma solução de H₂O₂ (30%) sobre uma placa quente (60°C) até a digestão completa (Blettler *et al.*, 2019; Yonkos *et al.*, 2014). Durante esse processo, devido à alta reatividade da solução, água destilada foi acrescentada para esfriar a reação sempre que necessário.

Após esse processo, o material passou por peneiras de malhas de 4mm, 1mm, 0,5mm, 250 µm, 125 µm e 53 µm, de aço inoxidável, lavado em água ultrapura, e as frações retidas recuperadas e condicionadas em potes de vidro com água ultrapura. Esse material foi então analisado visualmente em lupa. Os microplásticos encontrados foram contados e classificados por tamanho, de acordo com a malha da peneira, cor e formato (fibras, fragmentos e pellets).

Ingestão de Microplásticos pelos Macroinvertebrados

Os macroinvertebrados foram coletados, em tréplicas, em cada um dos pontos utilizando uma draga de Van Veen (abertura de 0.0198 m²). Seu conteúdo era despejado em uma rede de 250 µm de abertura e lavado no próprio ambiente para eliminar o máximo de sedimento possível. O conteúdo remanescente foi armazenado em sacos plásticos e imediatamente fixado com formol concentração de 8%.

Após a coleta, em laboratório, as amostras foram novamente lavadas com água corrente em peneira de malha de 250 µm para eliminar partículas orgânicas e inorgânicas que restaram, também sendo feita a remoção de pedras, galhos e folhas. Após a lavagem, o material foi acondicionado em potes plástico, devidamente identificados e preservados em álcool 70%. As amostras foram coradas com Rosa de Bengala a fim de facilitar a triagem.

Os organismos foram analisados sob lupas e identificados até o menor nível taxonômico possível. Para a análise da ingestão de MPs pelos macroinvertebrados foram selecionados indivíduos dos táxons de maior dominância de cada um dos locais de coleta e, preferencialmente, indivíduos de maior tamanho corporal e sem partes faltantes. Para o rio Tietê foram selecionados 29 indivíduos do táxon Oligochaeta. Para a lagoa foram selecionados 25 indivíduos do táxon Oligochaeta (sendo um indivíduo da espécie *Branchiura sowerbyi*). Para o rio do Peixe foram selecionados 40 *Corbicula flumínea*, 50 indivíduos do táxon Polymitarcyidae e 30 indivíduos do táxon Oligochaeta. Não foi possível selecionar um maior número de indivíduos do táxon Oligochaeta devido a pouca quantidade de organismos inteiros nas amostras do Rio Tietê e da lagoa.

Esses organismos foram lavados em água ultrapura para a remoção de partículas que poderiam estar presentes na amostra, foram medidos utilizando um estereomicroscópio Zeiss Discovery V20 e pesados com uma balança analítica. Em seguida foram separados em pequenas placas de Petri e cobertos com uma solução de KOH 15% a 50°C por 1 hora em placa quente para a sua digestão completa (Dehaut et al., 2016). Após esse processo, a placa foi levada a lupa para a caracterização, contagem e medição dos MPs.

Identificação das Partículas Plásticas

Os microplásticos obtidos foram contados, medidos e classificados por cor, tamanho e formato (Hidalgo-Ruz et al., 2012). A maior dimensão longitudinal foi utilizada para determinar o tamanho do MP. A identificação visual seguiu o critério proposto por Norén (2007), que definiu que uma partícula ou fibra de plástico não contém nenhuma estrutura celular ou orgânica visível, apresenta cores definidas e são homogêneas, e, no caso de fibras, seu comprimento deve ser igualmente espesso, não se estreitando nas pontas.

Determinação da Identidade Química das Partículas

As partículas encontradas no interior dos macroinvertebrados foram analisadas por espectrometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), com o objetivo de identificar quimicamente e confirmar se são, de fato, oriundas de material plástico (Prata et al., 2019). O equipamento utilizado está ilustrado na Figura 3. A identidade química das amostras foi checada através do *website* Open Specy, uma ferramenta online e gratuita que possui um banco de dados de espectros de referência. Neste é feito uma correlação de Pearson (r) para indicar a correlação estatística entre o espectro obtido e o de referência. Os valores variam de 0 a 1, sendo que aqueles mais próximos de 1 indicam uma maior correlação.

Algumas partículas do sedimento foram separadas aleatoriamente para a análise por FTIR. No entanto, os resultados são prévios, pois pretende-se analisar um maior número de partículas e esse processo está ocorrendo concomitantemente com a redação deste trabalho. Os resultados prévios encontram-se na Tabela 1 e essa análise será incluída no manuscrito que se encontra anexado como material suplementar.

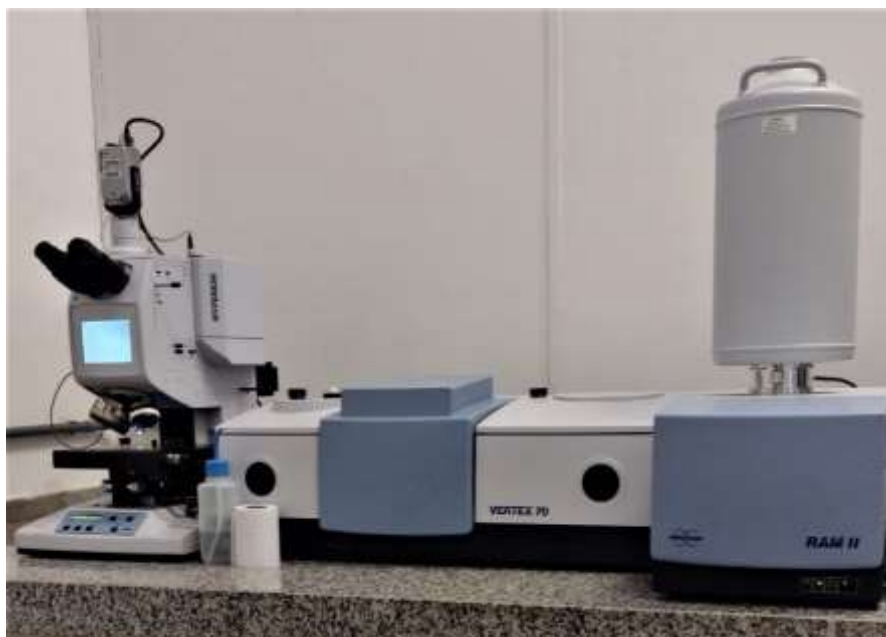


Figura 3 – Espectrômetro no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do laboratório multiusuário do Instituto de Química da Unesp – Araraquara

Minimizando a Contaminação Ambiental

Para minimizar a contaminação ambiental durante os processos acima descritos, evitou-se por completo o uso de materiais e instrumentos compostos por plásticos. As superfícies de trabalho foram esterilizadas com álcool (70%) constantemente. Os reagentes foram preparados com água ultrapura. Durante a identificação das partículas sob lupa, as placas de Petri foram cobertas com lâmina de vidro e foi utilizado uma placa com água, a qual permaneceu sobre a bancada do laboratório para ser examinada ao final de cada sessão, possibilitando o controle e a desconsideração de partículas que poderiam contaminar a amostra (Silva-Cavalcanti et al., 2017; Urbanski et al., 2020).

Análise dos Dados

Devido ao caráter descritivo deste trabalho, foram utilizados o Microsoft Excel e o software SigmaPlot 11 para a construção de um banco de dados, para a obtenção de médias e desvios-padrão, e a confecção de gráficos.

RESULTADOS

Microplásticos no Sedimento

Os microplásticos foram encontrados em todas as amostras de sedimento. No rio Tietê as quantidades foram de 190.460 MPs/kg, na lagoa 179.480 MPs/kg e no rio do Peixe 9.540 MPs/kg. Foram contadas e caracterizadas 18.974 partículas sendo 85% fibras, 7,3% fragmentos, 7,3% pellets e 0,1% glitter (Figura 4).

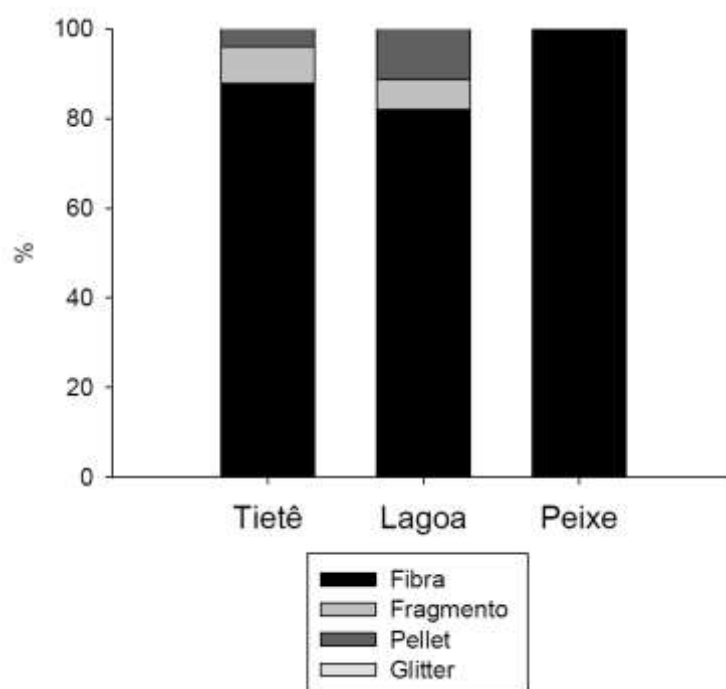


Figura 4 - Porcentagem dos formatos de MPs encontrados nas amostras compostas do rio Tietê, da lagoa e do rio do Peixe.

Foram encontradas 12 cores, desse total 56,2% eram transparentes, 18,8% azuis, 9,2% pretos e 3,5% vermelhos, as demais cores foram menos frequentes e, portanto, foram agrupadas em um único grupo denominado “outros”, o qual totalizou 12,3% (Figura 5 – a). Quanto ao tamanho, 37,5% encontram-se entre 0,053mm e 0,125mm; 49,3% entre 0,125mm e 0,25mm; 10,8% entre 0,25mm e 0,5mm; 1,9% entre 0,5mm e 1 mm e 0,5% entre 1mm e 4mm (Figura 5 – b).

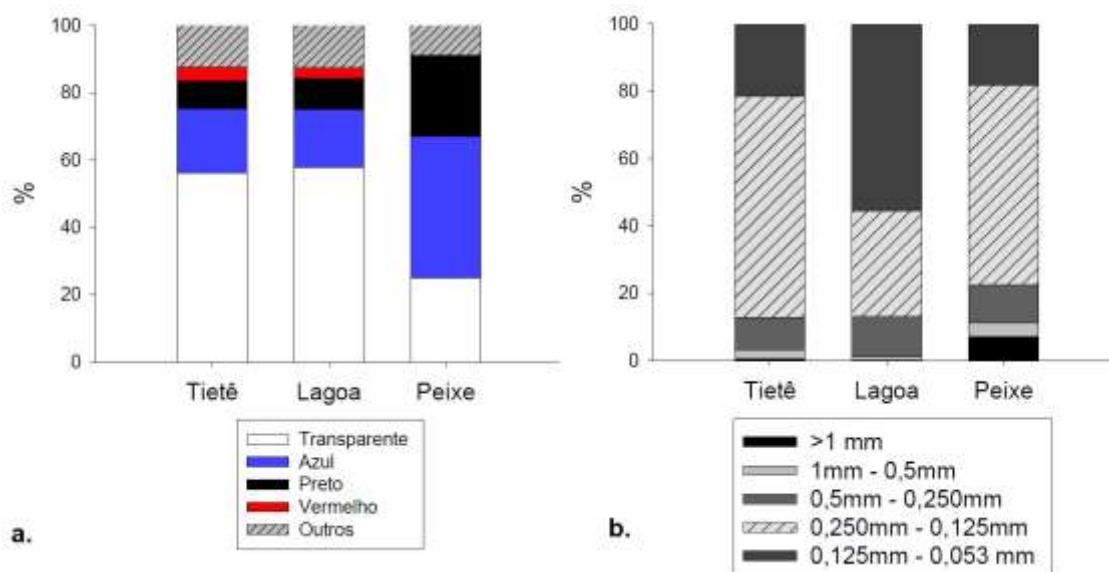


Figura 5 – (a) Porcentagem das cores de MPs encontrados no rio Tietê, lagoa e rio do Peixe. (b) Porcentagem das cores de MPs encontrados no rio Tietê, lagoa e rio do Peixe.

Foram analisadas 33 partículas encontradas no sedimento pelo método do FTIR, 11 oriundas do rio Tietê, 19 da lagoa e 3 do rio do Peixe (Tabela 1).

Tabela 1 – Resultados obtidos a partir da análise de FTIR para as partículas encontradas no sedimento dos três locais de coleta.

Local	Tipo	Cor	ID	r		
Tietê	Fibra	Azul	Polipropileno	0,72		
		Azul	Polietileno de alta densidade	0,7		
		Transparente	Poliéster	0,97		
		Verde	Polipropileno	0,92		
		Vermelho	PET	0,72		
	Fragmento	Transparente	Folha vegetal	0,94		
		Braco	Acrilonitrila butadieno estireno	0,92		
		Branco	Folha vegetal	0,89		
		Branco	Polietileno clorado	0,89		
		Verde	Polietileno de alta densidade	0,9		
		Branco	Celulose	0,94		
		Lagoa	Fibra	Amarelo	Celulose	0,73
				Amarelo	Polipropileno	0,79
Azul	Poliéster			0,99		
Roxo	Polietileno de alta densidade			0,9		
Preto	Polietileno			0,97		
Roxo	Polietileno			0,95		
Transparente	Poliéster			0,99		
Transparente	PET			0,99		
Transparente	PET			0,95		
Transparente	Celulose			0,85		
Transparente	PET			0,97		
Fragmento	Transparente	Poliéster	0,99			
	Vermelho	Poliéster	0,99			
	Vermelho	Polietileno	0,97			
	Azul	Celulose	0,95			
	Azul	Polietileno	0,97			
	Azul	Polietileno	0,98			
	Branco	Celulose	0,94			

		Preto	Celulose	0,93
Peixe	Fibra	Preto	PET	0,75
		Transparente	PET	0,71
		Verde	PET	0,7

Ingestão de microplásticos por Macroinvertebrados

Foram encontradas 120 partículas que apresentavam características potenciais de material plástico. Dessas, 93 foram encontradas nos organismos do rio do Peixe, 4 nos da lagoa e 23 nos do rio Tietê. Na Tabela 2 encontram-se as características do material encontrado em cada táxon e nos seus respectivos locais.

Tabela 2 - Características do material encontrado em cada táxon e os seus respectivos locais de origem.

Local	Táxon	Tipo	Cor	Quantidade	Tamanho médio (mm)	Desvio Padrão
Peixe	<i>Corbicula fluminea</i>	Fibra	Transparente	66	0,57	0,27
			Azul	12		
			Laranja	3		
			Cinza	1		
			Preto	1		
		Fragmento	Rosa	3	0,28	0,15
		Azul	2			
Peixe	Polymitarcyidae	Fibra	Transparente	2	0,58	0,27
			Rosa	1		
			Cinza	1		
			Azul	2		
Tietê	Oligochaeta	Fibra	Transparente	3	0,52	0,31
			Azul	1		
Lagoa	<i>B. sowerbyi</i>	Fibra	Vermelha	2	0,16	0,05
Lagoa	Oligochaeta	Fibra	Transparente	20	0,63	0,21
			Rosa	1		

Foram analisadas pelo método FTIR 94 das 120 partículas encontradas devido a perda de material durante a separação e o transporte para Araraquara. Algumas leituras resultaram em falha e não foi possível determinar a identidade química de algumas partículas. Para considerar o resultado da identificação, só foram aceitos os coeficientes que apresentaram um r maior ou igual a 0,7.

Foram identificadas quimicamente 74 partículas (Tabela 3), das quais 73 resultaram em partículas de celulose (Figura 7) e apenas 1 fibra foi identificada com poliéster com um valor de r significativo ($r=0,97$) indicando uma forte correlação estatística entre o espectro encontrado e o de referência (Figura 8).

Tabela 3 – Resultados encontrados a partir da análise de FTIR para as partículas encontradas no interior dos macroinvertebrados.

Local	Táxon	Quantidade de partículas	Partículas analisada	Partículas com resultado $r < 0,7$	Resultados
Peixe	<i>C. fluminea</i>	87	66	62	Celulose
Peixe	Polymitarcyidae	6	5	1	Celulose
Tietê	Oligochaeta	4	4	3	Celulose
Lagoa	<i>B. sowerbyi</i>	2	1	1	Poliéster ($r=0,97$)
Lagoa	Oligochaeta	21	17	7	Celulose

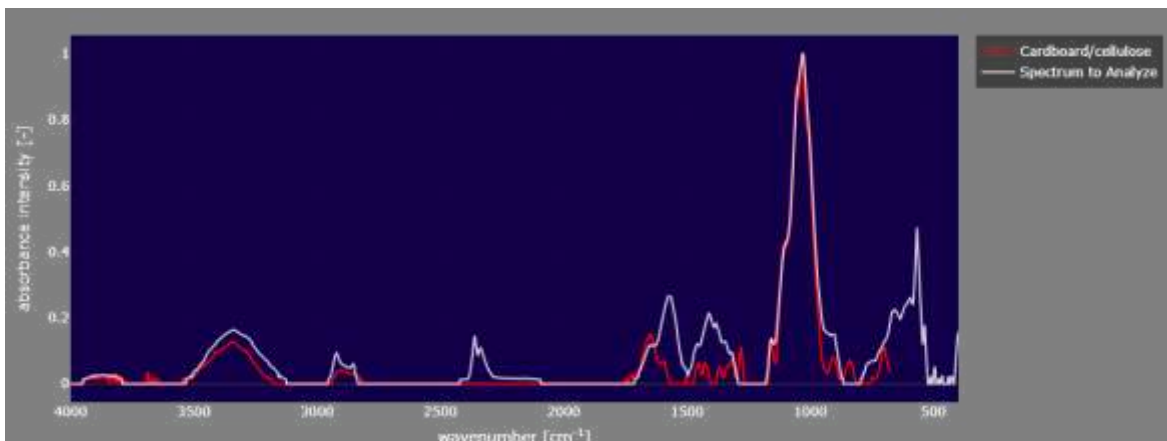


Figura 7 – Sobreposição do espectro da amostra e do espectro da base de dados do Open Specy para uma partícula encontrada em *C. fluminea*. ($r=0,96$).

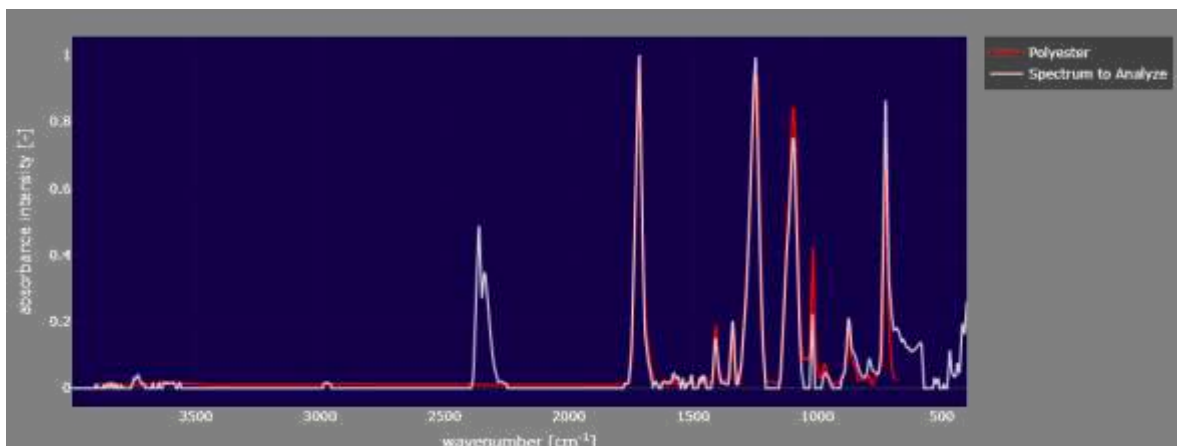


Figura 8 – Sobreposição do espectro da amostra e do espectro da base de dados do Open Specy para a partícula de poliéster encontrada em *B. sowerbyi*.

A fibra de poliéster (Figura 9) foi encontrada em *B. sowerbyi* e esse indivíduo apresentou um tamanho de 56,42 mm de comprimento. Este foi o maior Oligochaeta dentre todos os selecionados para esse estudo. Comparando com os demais, este indivíduo é cerca de 5 vezes maior do que os encontrados no rio do Peixe e cerca de 3 vezes maior que os encontrados no Rio Tietê e na lagoa (Figura 10).



Figura 9 – Fibras encontradas em *B. sowerbyi*. Apenas uma delas foi analisada pelo método FTIR.

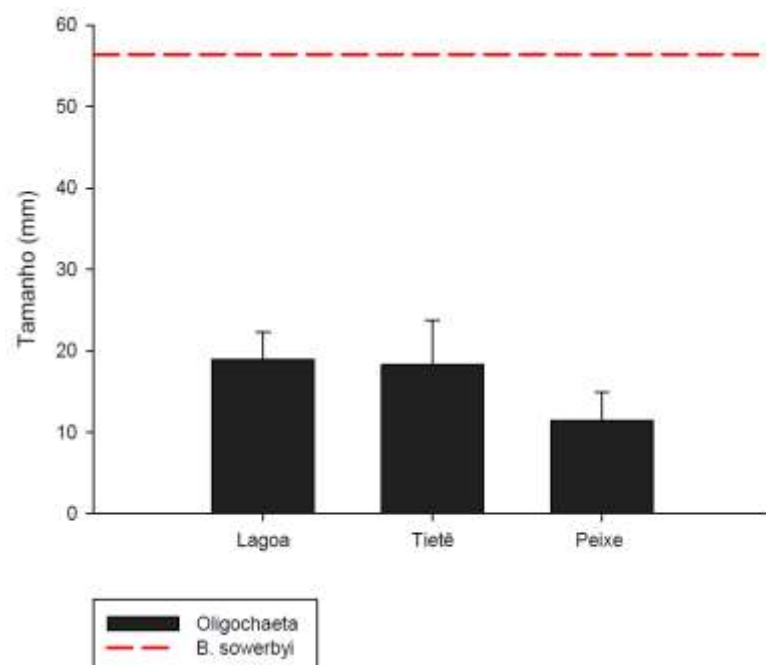


Figura 10 – Tamanho médio dos Oligochaeta selecionados para cada local em comparação com o tamanho de indivíduo da espécie de Oligochaeta *B. sowerbyi* no qual foi encontrada a fibra plástica.

Apesar da identificação química resultar em apenas uma partícula plástica, os resultados demonstram uma grande ingestão de fibras de celulose por *C. flumínea* (filtrador) em

concentrações de 1,5 partículas/indivíduo. A família de efemérides Polymitarcyidae (coletor/filtrador) e os Oligochaeta (detritívoro) também ingeriram essas partículas, mas em concentrações muito inferiores, variando de 0,02 partículas/indivíduo a 0,3 partículas/indivíduo. Essas partículas apresentam características físicas muito similares as partículas plásticas (Figura 11).



Figura 11 – Fibras de celulose encontradas em *C. fluminea*.

DISCUSSÃO

Microplásticos no Sedimento

Os microplásticos foram encontrados em todas as amostras de sedimento e em concentrações consideradas muito elevadas em comparação com outros estudos envolvendo rios associados a áreas urbanas. Peng et al. (2018) encontraram entre 594 e 802 MPs/kg em rios de distritos urbanos da região de Shanghai, na China. Rodrigues et al (2018) encontraram entre 18 e 629 MPs/kg no Rio Antuã, em Portugal. No presente estudo, esses valores encontram-se entre 9.540 e 190.460 MPs/kg. Concomitantemente com a redação deste trabalho, estão sendo feitas análises de FTIR para determinar a identidade química das partículas encontradas e os resultados prévios indicam que muitas são de origem plástica, principalmente aquelas encontradas no rio Tietê e na lagoa marginal. Esses resultados serão mais bem discutidos no manuscrito que se encontra no material complementar

Dois fatores, em termos metodológicos, podem ter influenciado nessa elevada concentração de MPs encontrados. Uma das etapas comumente utilizadas no processamento das amostras é o método de separação dos MPs por densidade utilizando uma solução salina (Yang et al., 2021). No presente estudo, a amostra foi analisada de forma integral, sem a adição desse método. Em testes prévios foi constatado que nem todos os MPs migravam para a superfície após

a adição dessa solução. Dessa forma, optou-se pela não utilização desse método. Um outro fator foi a utilização de frações de MPs muito pequenas, sendo o limite inferior de 53 µm.

O rio do Peixe, apesar de ser um tributário que não apresenta influência de grandes centros urbanos, apresentou um elevado número de MPs no seu sedimento. Isso pode ser explicado, em partes, pela atividade pesqueira e a utilização de redes de pesca que ocorre na região. As partículas encontradas nesse rio também estão sendo analisadas pelo método FTIR e os resultados prévios indicam que muitas parecem se tratar de fibras de celulose (provavelmente sintéticas). Dessa forma, esses valores também passarão por uma revisão e serão mais bem discutidos no manuscrito que se encontra no material complementar.

A lagoa marginal apresentou uma concentração de MPs bem próxima a do rio principal, mas ainda menor. Este resultado vai na contramão do encontrado por Kapp e Yeatman (2018) e Xiong et al. (2019), pois estes verificaram que uma hidrodinâmica menos ativa favorece a deposição de MPs no sedimento e, portanto, espera-se encontrar um valor mais elevado de partículas nessas regiões em comparação com o rio principal. No entanto, a distribuição de MPs em sedimentos de água doce ainda não é totalmente entendida e pode ser influenciada por fatores externos, pelas características das partículas e pelo ambiente em que estão situados (Yang et al., 2021).

Quanto ao tamanho das partículas encontradas, sua maioria encontra-se entre o intervalo 0,053mm – 0,250mm. Esse resultado é esperado, tendo em vista que partículas menores que 1mm são muito mais frequentes em sedimentos de água doce, além da degradação que esse material pode sofrer, gerando partículas cada vez menores e mais abundantes (Barnes et al., 2009; Yang et al., 2021). O formato mais encontrado foi “fibra” e a cor mais encontrada foi “transparente”. Esses resultados seguem a tendência observada em outros estudos envolvendo sedimento de água doce (Yang et al., 2021).

Apesar da elevada concentração de MPs encontrada nos três locais estudados, não é possível inferir a origem desse material sem saber sua identificação química. No entanto, o esgoto doméstico é considerado uma importante fonte de microplásticos em ambientes de água doce, principalmente tratando-se de pellets e fibras (Yang et al., 2021). No caso das fibras, podemos citar algumas possíveis fontes como o descarte de água da indústria têxtil, materiais de pesca e o descarte da água proveniente da lavagem de roupas (Hernandez et al, 2017; Yang et al., 2021). Devido ao tamanho diminuto dos MPs as estações de tratamento dificilmente conseguem retirar essas partículas da água (Yang et al., 2021). Além disso, tendo em vista que no Brasil a maior parte do esgoto é lançado diretamente nos corpos d’água, não há nenhum método capaz de impedir a chegada dessas partículas na água (Barreto, 2013).

Ingestão de Microplásticos pelos Macroinvertebrados

Os macroinvertebrados estão sujeitos a ingestão, passiva ou ativamente, de MPs, mas poucos estudos foram realizados com esse grupo de organismos. Windsor et al. (2019) identificaram a presença de MPs em metade de suas amostras, não havendo diferença na ingestão dessas partículas por indivíduos com diferentes hábitos alimentares. Hurley et al. (2017) observaram a ingestão de MPs por *Oligochaeta* e seus resultados demonstraram que esses indivíduos retêm essas partículas por mais tempo do que as partículas minerais que compõem o sedimento ingerido, o que representa um risco adicional para a transferência trófica de MPs. Outros estudos demonstram que a ingestão pode ter efeitos negativos para os macroinvertebrados. López-Rojo et al. (2020) observaram a ingestão de MPs por larvas detritívoras de Trichoptera, isso não teve implicações para o seu crescimento, mas em altas concentrações de MPs foi observado um aumento significativo na mortalidade desses indivíduos. Contudo, ainda não está claro a relação entre os macroinvertebrados e as partículas plásticas.

Das 120 partículas encontradas, apenas uma foi efetivamente identificada quanto a sua composição plástica pelo método FTIR, sendo essa uma fibra de poliéster. Tendo em vista a grande concentração de MPs encontrados no sedimento do Rio Tietê, era esperado encontrar valores elevados para a ingestão desse material pelos organismos que ali vivem. Hurley et al. (2017), analisaram 302 *Tubifex sp.* coletados na bacia de Salford Quays, na cidade de Manchester, na Inglaterra, e encontraram 131 partículas de MP nesses indivíduos, chegando a uma proporção de 0,43 MPs/indivíduo. Eventualmente seria possível obter um resultado similar ao analisar um maior número de indivíduos. Também é possível que exista uma relação entre o tamanho do organismo com o tamanho da partícula que ele é capaz de ingerir, mas para corroborar essa afirmação seria necessário realizar testes com organismos de tamanhos diferentes, o que não é possível de ser feito para *Oligochaeta*, tendo em vista a grande quantidade de organismos fragmentados nas amostras. Além disso os organismos menores podem estar ingerindo partículas de tamanho inferior, as quais passam despercebidas pela inspeção visual, o que pode ser o caso dos oligoquetos selecionados para o rio do Peixe que não apresentaram nenhuma partícula no seu interior.

O método FTIR foi fundamental para a identificação química das partículas encontradas, as quais poderiam ter sido erroneamente identificadas como plástico. Tendo em vista as semelhanças físicas entre o material oriundo de celulose manufaturada e o material oriundo do plástico, a inspeção visual torna-se insuficiente para a identificação de MPs (Figura 11). O uso desse método é altamente recomendado por Prata et al. (2019) e os resultados encontrados ressaltam essa importância. Apesar disso, as fibras de celulose de origem sintéticas são originadas,

principalmente, a partir da lavagem de têxteis e em conjunto com os MPs são poluentes globalmente difundidos na água doce (Barrows et al., 2018; Savoca et al., 2019; Di Lorenzo et al., 2023). Estudos com relação a ingestão desse material pelos organismos aquáticos são ainda mais escassos que aqueles envolvendo ingestão de MPs e ainda não se sabe os impactos dessas fibras sobre o ambiente e os animais. Di Lorenzo et al. (2023) analisou a ingestão desses dois materiais em organismos com diferentes hábitos alimentares (detritívoros, raspadores e predadores) e todos eles ingeriram grandes quantidades de fibras de celulose, sendo os detritívoros os mais impactados por essa ingestão. Os resultados aqui apresentados apontam para uma grande ingestão de fibras de celulose pelos filtradores, demonstrando que esses organismos podem ser um dos mais impactados por essa ingestão.

Esse estudo indica a ingestão de fibras de celulose e uma possível ingestão de MPs pelos macroinvertebrados bentônicos de um dos rios poluídos do Brasil. Por isso, estudos que esclareçam essa interação entre MPs e organismos aquáticos são extremamente necessários.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preocupação relacionada à contaminação por microplásticos no ambiente aquático vem crescendo nos últimos anos. No entanto, ainda não compreendemos totalmente sua dinâmica e sua interação com os organismos. Esse estudo fornece dados a respeito da presença e a caracterização dos MPs encontrados em um dos rios poluídos do Brasil. Apesar da distância de aproximadamente 350km da cidade de São Paulo, este apresenta quantidades nunca antes vista em outros estudos envolvendo rios de grande porte e influenciados por grandes centros urbanos. Quanto aos macroinvertebrados bentônicos, nossos resultados indicam ingestão de fibras de celulose e uma possível ingestão de MPs. Isso é algo bastante preocupante, pois ainda não se sabe quais os possíveis impactos dessas partículas sobre os organismos aquáticos e a possibilidade de essas serem incorporadas nas cadeias alimentares aquáticas. Sendo assim, mais estudos são necessários para entender os fatores que determinam a distribuição dos MPs e das fibras de celulose em sedimentos de água doce. Também são necessários estudos que busquem entender os impactos provocados pela ingestão dessas partículas pelos organismos aquáticos, e sua possível transferência entre as cadeias alimentares.

Enquanto buscamos preencher essas lacunas do conhecimento, podemos tomar medidas individuais para redução de plásticos descartáveis no nosso cotidiano, como a substituição por alternativas reutilizáveis, bem como a promoção do descarte correto da reciclagem desses materiais. Podemos ainda pressionar as autoridades para a implementação de políticas e

regulamentações mais rigorosas relacionadas a produção e ao consumo de plástico, e investimentos em pesquisa e desenvolvimento de materiais alternativos e biodegradáveis. Outro ponto muito importante é o aumento da conscientização sobre os impactos ambientais do plástico e a educação das pessoas sobre alternativas e práticas sustentáveis. A redução da produção/consumo de plástico é um desafio global que requer esforços conjuntos de governos, empresas e indivíduos e é essencial para a conservação da natureza e para a saúde dos ecossistemas aquáticos.

REFERÊNCIAS

- ANDRADY, A. L. Microplastics in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 8, p. 1596–1605, 2011.
- BARNES, David KA et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. **Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences**, v. 364, n. 1526, p. 1985-1998, 2009.
- BARRETO, L. V. et al. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 9, n. 16; p. 2165, 2013.
- BARROWS, A. P. W.; CATHEY, Sara E.; PETERSEN, Christopher W. Marine environment microfiber contamination: Global patterns and the diversity of microparticle origins. **Environmental pollution**, v. 237, p. 275-284, 2018.
- BLETTLER, M.C.M., GARELLO, N., GINON, L., ABRIAL, E., ESPINOLA, L.A. & WANTZEN, K.M., 2019. Massive plastic pollution in a mega-river of a developing country: Sediment deposition and ingestion by 369 fish (*Prochilodus lineatus*). **Environmental pollution**. 255 (3): 113348.
- BRENNECKE, D. et al. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 178, p. 189–195, 2016.
- BUCKERIDGE, M. & RIBEIRO, W.C., 2018. Livro branco da água. **A crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo em 2013-2015: Origens, impactos e soluções**. Instituto de Estudos Avançados, 375 São Paulo. 175 pp.
- CARON, A. G. M. et al. Ingestion of microplastic debris by green sea turtles (*Chelonia mydas*) in the Great Barrier Reef: Validation of a sequential extraction protocol. **Marine Pollution Bulletin**, v. 127, n. December 2017, p. 743–751, 2018.

- CUTHBERT, R. N. et al. The influence of microplastics on trophic interaction strengths and oviposition preferences of dipterans. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 2420–2423, 2019.
- DE FALCO, F. et al. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2019. DEHAUT, A. et al. Microplastics in seafood: Benchmark protocol for their extraction and characterization. **Environmental pollution**, 215, 223-233, 2016.
- DI LORENZO, Tiziana et al. Ingestion of microplastics and textile cellulose particles by some meiofaunal taxa of an urban stream. **Chemosphere**, v. 310, p. 136830, 2023.
- FENDALL, L. S.; SEWELL, M. A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. **Marine Pollution Bulletin**, v. 58, n. 8, p. 1225–1228, 2009.
- GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.
- HERNANDEZ, Edgar; NOWACK, Bernd; MITRANO, Denise M. Polyester textiles as a source of microplastics from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing. **Environmental science & technology**, v. 51, n. 12, p. 7036-7046, 2017.
- HIDALGO-RUZ, V. et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 6, p. 3060–3075, 2012.
- HURLEY, Rachel R.; WOODWARD, Jamie C.; ROTHWELL, James J. Ingestion of microplastics by freshwater tubifex worms. **Environmental science & technology**, v. 51, n. 21, p. 12844-12851, 2017.
- JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Solid Waste Management in São Paulo: The Challenges of sustainability. **Revista-on line Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, p. 135–158, 2011.
- KAPP, Kirsten J.; YEATMAN, Ellen. Microplastic hotspots in the Snake and Lower Columbia rivers: A journey from the Greater Yellowstone Ecosystem to the Pacific Ocean. **Environmental Pollution**, v. 241, p. 1082-1090, 2018.
- LI, J.; ZHANG, K.; ZHANG, H. Adsorption of antibiotics on microplastics. **Environmental Pollution**, v. 237, p. 460–467, 2018.
- LÓPEZ-ROJO, N. et al. Microplastics have lethal and sublethal effects on stream invertebrates and affect stream ecosystem functioning. **Environmental Pollution**, v. 259, 2020.

- LOURENÇO, P. M. et al. Plastic and other microfibers in sediments, macroinvertebrates and shorebirds from three intertidal wetlands of southern Europe and west Africa. **Environmental Pollution**, v. 231, p. 123–133, 2017.
- MACLEOD, Matthew et al. The global threat from plastic pollution. **Science**, v. 373, n. 6550, p. 61-65, 2021.
- MASURA, J. et al. Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment. **NOAA Marine Debris Program National**, n. July, p. 1–39, 2015
- MOORE, R. C. et al. Microplastics in beluga whales (*Delphinapterus leucas*) from the Eastern Beaufort Sea. **Marine Pollution Bulletin**, v. 150, n. November, p. 110723, 2020.
- MURPHY, F. et al. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 11, p. 5800–5808, 2016
- NEVES, D. et al. Ingestion of microplastics by commercial fish off the Portuguese coast. **Marine Pollution Bulletin**, v. 101, n. 1, p. 119–126, 2015.
- NORÉN, F. Small plastic particles in Coastal Swedish waters. **KIMO Report**. 1-11. (2007)
- PENG, Guyu et al. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: a case study of risk assessment in mega-cities. **Environmental Pollution**, v. 234, p. 448-456, 2018.
- PRATA, Joana Correia et al. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: a critical review. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 110, p. 150-159, 2019.
- RHODES, Christopher J. Plastic pollution and potential solutions. **Science progress**, v. 101, n. 3, p. 207-260, 2018.
- RIPOLI, M, M. **Entre o discurso e a prática: o embate de ideias e as práticas de intervenção do urbanismo paulistano para a várzea do rio Tietê**. 2016. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- ROCHMAN, C. M.; HENTSCHEL, B. T.; THE, S. J. Long-term sorption of metals is similar among plastic types: Implications for plastic debris in aquatic environments. **Plos One**, v. 9, n. 1, 2014.
- RODRIGUES, M. O. et al. Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal). **Science of the total environment**, v. 633, p. 1549-1559, 2018.

- SAVOCA, Serena et al. Detection of artificial cellulose microfibers in Boops boops from the northern coasts of Sicily (Central Mediterranean). **Science of the Total Environment**, v. 691, p. 455-465, 2019.
- SILVA-CAVALCANTI, J. S. et al. Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource. **Environmental Pollution**, v. 221, p. 218–226, 2017.
- SILVA, C. J. M. et al. Ingestion of small-sized and irregularly shaped polyethylene microplastics affect *Chironomus riparius* life-history traits. **Science of the Total Environment**, v. 672, p. 862–868, 2019.
- URBANSKI, B.Q., DENADAI, A.C., AZEVEDO-SANTOS, V.M., NOGUEIRA, M.G. First record of plastic ingestion by an important commercial native fish (*Prochilodus lineatus*) in the middle Tietê River basin, Southeast Brazil. **Biota Neotropica** 20(3): e20201005.
- VANDERMEERSCH, G. et al. A critical view on microplastic quantification in aquatic organisms. **Environmental Research**, v. 143, n. 2014, p. 46–55, 2015.
- WINDSOR, F. M. et al. Microplastic ingestion by riverine macroinvertebrates. **Science of the Total Environment**, v. 646, p. 68–74, 2019.
- XIONG, Xiong et al. Occurrence and fate of microplastic debris in middle and lower reaches of the Yangtze River—from inland to the sea. **Science of the Total Environment**, v. 659, p. 66-73, 2019
- YANG, Ling et al. Microplastics in freshwater sediment: A review on methods, occurrence, and sources. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 141948, 2021.
- YONKOS, Lance T. et al. Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, USA. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 24, p. 14195-14202, 2014.

ANEXOS

Anexo 1 - Variáveis ambientais analisadas em cada um dos pontos, dos três locais de coleta e em ambos os períodos.

Local	Período	Ponto	Temp (°C)	pH	ORP (mV)	K (mS/cm)	T (NTU)	OD (mg/L)	TDS (mg/L)	Prof. (m)	NT (%)	FT (mg/g dw)	MO (%)	Φ	G	
Peixe	C	1	21,3	6,0	332	42	39,8	4,96	0,027	3,1	0,13	3,25	6,17	3,21	AF	
		2	21,27	5,93	337	42	38,5	5,37	0,027	4	0,22	7,98	11,87	2,88	AF	
		3	21,26	6,02	334	42	40,4	5,0	0,027	1,9	0,06	1,16	1,64	2,08	AF	
		4	21,26	5,97	341	42	41,8	5,94	0,027	3,3	0,12	1,01	1,71	2,29	AF	
		5	21,23	6,07	327	41	42,2	5,02	0,027	4	0,15	8,33	10,84	2,86	AF	
Peixe	S	1	21,21	6,62	339	64	47,5	5,26	0,042	2,2	0,09	1,25	1,94	2,08	AF	
		2	21,13	6,43	334	65	38,8	4,51	0,042	4,1	0,18	3,39	5,58	2,46	AF	
		3	22,37	6,77	315	64	26,5	6,22	0,042	0,9	0,03	0,97	1,64	2,12	AM	
		4	20,85	6,63	313	64	17,9	4,8	0,042	2,5	0,06	0,96	1,60	1,73	AM	
		5	20,94	6,75	319	64	11,9	5,21	0,042	2,9	0,13	3,87	5,53	2,06	AM	
Tietê	C	1	23,83	7,31	235	490	15,5	0,03	0,318	3,8	0,85	74,33	22,91	3,18	S	
		2	23,84	7,25	237	490	14,3	0,11	0,318	3,1	0,49	37,62	15,27	3,13	AF	
		3	23,8	7,28	232	492	13,4	0,09	0,32	3,7	0,50	42,24	18,73	3,29	S	
		4	23,78	7,24	239	492	12,4	0,13	0,32	3,2	0,24	38,10	11,51	3,34	AF	
		5	23,76	7,26	225	491	14,9	0,45	0,319	7,8	0,21	19,07	7,28	3,32	AF	
		6	23,93	7,33	236	489	16,1	0,05	0,318							
		7	23,91	7,25	237	492	14,4	0,03	0,32							
Tietê	S	1	23,38	7,49	244	626	12,1	0,32	0,4	1,4	0,25	21,42	11,75	3,22	AF	
		2	23,33	7,44	244	624	18,8	0,18	0,4	2,3	0,45	43,70	16,53	3,28	S	
		3	23,2	7,41	249	623	20,8	0	0,399	2,4	0,45	39,17	15,04	3,35	S	
		4	23,22	7,39	249	623	23,1	0	0,399	2,7	0,52	50,90	16,70	3,28	S	
		5	23,17	7,4	253	620	19,8	0	0,397	6,1	0,27	24,46	12,63	3,04	AF	
		6	23,15	7,5	251	622	24,2	0	0,398							
		7	23,19	7,49	256	622	13,1	0	0,398							
Lagoa	C	1	23,17	9,22	195	367	72,8	10,81	0,239	1,2	0,37	43,33	15,86	3,10	S	
		2	22,99	9,48	185	354	87,9	8,75	0,23	0,9	0,47	43,24	15,57	3,08	S	
		3	23,1	9,49	185	364	70	11,48	0,236	0,9	0,35	45,25	14,32	3,26	S	
		4	22,84	9,49	184	359	74,5	10,42	0,233	0,9	0,30	41,53	13,06	3,23	S	
		5	22,92	9,2	206	368	73,4	8,8	0,239	0,9	0,36	35,60	13,17	3,20	AF	

Lagoa	S	1	23,05	9,91	159	441	228	11,96	0,287	0,8	0,37	37,01	15,15	2,88	AF
		2	23,32	10,07	156	443	210	13,21	0,288	0,9	0,35	36,16	15,06	2,91	AF
		3	23,22	9,91	166	447	257	11,64	0,29	0,7	0,31	36,42	15,04	2,88	AF
		4	23,74	10,02	164	454	193	16,53	0,295	1	0,40	39,96	15,96	2,96	AF
		5	22,56	9,53	187	467	152	9,22	0,303	0,6	0,35	42,87	13,13	3,42	S

Prof: profundidade; Méd.: média; Temp: temperatura; ORP: potencial de óxido-redução; K: condutividade elétrica; Turb: turbidez; OD: oxigênio dissolvido; TDS: sólidos totais dissolvidos; NT: nitrogênio total; FT: fosforo total; MO: matéria orgânica; G: granulometria; AF: areia fina; AM: areia média; S: silte.

Anexo 2: Resultado do teste *post hoc* para as variáveis do sedimento. a. Fósforo. b. Nitrogênio. c. Matéria orgânica. d. Φ

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):

Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: Local

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
Lagoa vs. Peixe	38,573	8,605	<0,001	0,017	Yes
Tietê vs. Peixe	35,884	8,005	<0,001	0,025	Yes
a. Lagoa vs. Tietê	2,689	0,600	0,554	0,050	No

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):

Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: Local

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
Tietê vs. Peixe	0,306	5,507	<0,001	0,017	Yes
Lagoa vs. Peixe	0,246	4,427	<0,001	0,025	Yes
b. Tietê vs. Lagoa	0,0600	1,080	0,291	0,050	No

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):

Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: Local

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
Tietê vs. Peixe	9,983	6,423	<0,001	0,017	Yes
Lagoa vs. Peixe	9,840	6,331	<0,001	0,025	Yes
c. Tietê vs. Lagoa	0,143	0,0920	0,927	0,050	No

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):

Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor: Local

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
Tietê vs. Peixe	0,866	7,846	<0,001	0,017	Yes
Lagoa vs. Peixe	0,715	6,478	<0,001	0,025	Yes
d. Tietê vs. Lagoa	0,151	1,368	0,184	0,050	No

Anexo 3: Total de táxons encontrados em cada um dos pontos dos três locais de coleta e em ambos os períodos.

Táxons	Chuvoso															Seco														
	Tietê					Lagoa					Peixe					Tietê					Lagoa					Peixe				
	T1	T2	T3	T4	T5	L1	L2	L3	L4	L5	P1	P2	P3	P4	P5	T1	T2	T3	T4	T5	L1	L2	L3	L4	L5	P1	P2	P3	P4	P5
Turbellaria											X	X		X														X	X	
Nematoda		X									X															X			X	
Sphaeriidae														X																
<i>C. fluminea</i>											X	X	X	X	X											X	X	X	X	X
<i>Eupera sp.</i>													X	X															X	
<i>M. tuberculata</i>											X		X	X	X															
Ampullaridae																													X	
Ancylidae																													X	
Hirudinea										X	X		X	X	X										X	X			X	
Oligochaeta	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>B. sowerbyi</i>						X	X	X	X	X											X	X	X	X	X					
<i>Dero sp.</i>			X	X														X				X					X			
Ostracoda				X			X					X		X							X					X	X	X	X	X
Acari	X		X								X																			X
Ephemeroptera																												X		
Polymitarciidae											X			X												X				
Caenidae													X																	
Diptera (Adulto)	X																												X	
Diptera (Pupa)									X																					X
Chironominae			X										X	X	X											X			X	
<i>Aedokritus sp.</i>	X										X																			
<i>Chironomus sp.</i>		X	X						X	X			X								X		X		X		X		X	
<i>Dicrotendipes sp.</i>											X																	X		
<i>Endotribelos sp.</i>																										X				

Anexo 4: Valores relativos à densidade (ind/m²) dos táxons observados no Rio Tietê, em sua lagoa e no Rio do Peixe, em ambos os períodos.

	Abril			Agosto		
	Peixe	Lagoa	Tietê	Peixe	Lagoa	Tietê
PLATYHELMINTHES						
Turbellaria	118			51		
NEMATODA						
	34		51	34		
MOLLUSCA						
Bivalvia						
Sphaeriidae	17					
<i>Corbicula fluminea</i>	6.044			2.912		
<i>Eupera sp.</i>	84			17		
Gastropoda						
Thiaridae						
<i>Melanoides tuberculata</i>	118					
Ampullariidae						
				17		
Ancylidae						
				17		
ANNELIDA						
Hirudinea						
	337	387		253	84	
Oligochaeta						
	10.438	15.892	16.044	7.273	5.791	16.414
<i>Branchiura sowerbyi</i>		690			404	
<i>Dero sp.</i>			118	51	17	17
ARTHROPODA						
Crustacea						
Ostracoda	219	17	17	6.414	17	
Arachnida						
Acari	17		101	17		
Insecta						
Ephemeroptera						
Polymitarcyidae				17		
	1.566			34		
Caenidae	34					
Diptera						
Diptera (Adulto)			17			
Diptera (Pupa)				17		
Chironomidae						
Chironominae	67		17	34		
<i>Aedokritus sp.</i>	17		17			
<i>Chironomus sp.</i>	34	1.060	168	34	51	
<i>Dicrotendipes sp.</i>	17			168		
<i>Endotribelos sp.</i>				17		
<i>Paralauterborniella sp.</i>				34		
<i>Polypedilum sp.</i>				17		
<i>Tanytarsus sp.</i>	84		17	572		
Pentaneurini	34		17	84		
Tanypodinae		17				

<i>Ablabesmya sp.</i>	589		269
<i>Coelotanypus sp.</i>	67		152
<i>Larsia sp.</i>			34
<i>Tanypus stellatus</i>		640	
Ceratopogonidae	152		320
Odonata			
<i>Aphylla sp.</i>	17		
Coleoptera			
Coleoptera (Adulto)			17
Hemiptera			
Aphididae			17
Trichoptera			17
Trichoptera (Pupa)			34
Collembola		17	

Anexo 5 – Médias e desvios-padrão para a equitabilidade de Pielou e diversidade de Shannon obtidas em cada um dos locais e em ambos os períodos.

	Tietê				Lagoa				Peixe			
	Chuvoso		Seco		Chuvoso		Seco		Chuvoso		Seco	
	Méd.	DP	Méd.	DP	Méd.	DP	Méd.	DP	Méd.	DP	Méd.	DP
Equitabilidade de Pielou	0,292	0,289	0,100	0,102	0,360	0,147	0,310	0,134	0,508	0,115	0,562	0,112
Diversidade de Shannon	0,702	0,846	0,100	0,102	0,636	0,318	0,532	0,325	1,635	0,552	1,767	0,365

MATERIAL SUPPLEMENTAR

Microplastic contamination in the excessively polluted Tietê River (Southeast Brazil): an unsustainable human-nature relationship

Gabriel Mariano^a, Camila Magro^a, Bruna Quirici Urbanski^a, Marcos Gomes Nogueira^a

^a Institute of Biosciences, State University of São Paulo, 18618-689, Botucatu, Brazil

A B S T R A C T

The presence of microplastics (MPs) was analyzed in water and sediment samples of the Tietê River and associated aquatic environments (a marginal lagoon and a tributary – Peixe River). This river receives most of domestic and industrial effluents from São Paulo megalopolis (22 million people), as well as a huge amount of irregularly discarded solid residues, mainly plastic litter. Samples were collected immediately after the rainy season (April/2020), for water and sediment, and during the dry season (August/2020) only for water. Organic matter was oxidized ($H_2O_2 + Fe(II)$ (70°C) and material fractionated through metal sieves (minimum 0.053 mm and maximum 4 mm). Microscopic counting discriminated size, form, and color. The predictable high contamination was confirmed. For water, there was an increasing gradient of MPs: Peixe River → Tietê lagoon → Tietê River. Differences between the main river and tributary were significant for April. For the main river, contamination in the water column was higher after the rains. For the tributary, the concentration effect (dry season), prevailed. For sediment, contamination in the main river and the marginal lagoon is of the same (very high) magnitude (10^5 MPs/kg), but not higher in the lagoon, as presupposed, due to its lentic condition. The concentration of MPs in the tributary is not negligible, and sources are distinct (probably fishery activities and litter irregular disposal from rural communities). Quantities of MPs in the sediment were much higher compared to the ones in the water column. Integrated water-sediment analyzes were important for the understanding of distinct processes on both spatial and temporal scales. Size, form, and color, showed to be similar when compared the MPs observed in the water and sediment samples. Small size, transparent and blue fibers particles predominated. Proportionally there was more fragments in the water column and more pellets in the sediments.

Key words: lagoon, megalopolis impact, tributary river, microplastic characteristics.

1. Introduction

Plastics, synthetic polymers derivate from petrochemicals, became highly popular after the Second World War, mainly due to their accessible cost, versatility, lightness e durability (Barnes et al., 2009; Geyer et al., 2017; Olivatto et al.; 2018). This new and revolutionary material shaped our society in distinct manners, from science and technology to our daily routine activities at home. The production of plastic

material, since the 1950s, is estimated in 9 billion tons, of which 6.5 billion are not in use anymore and were discharged (Jambeck et al., 2015; Geyer et al., 2017; Olivatto et al., 2018). Plastic inappropriate disposal and its accumulation in nature is presently a major environmental concern, threatening all kind of ecosystem (Zalasiewicz et al., 2016; Geyer et al., 2017). Unfortunately, conventional wastewater treatment plants do not prevent that part of the urban plastic litter, especially the small-sized particles (microplastics), contaminate rivers, lakes, and oceans (Murphy et al., 2016; Estahbanati & Fahrenfeld, 2016; McCormick et al., 2016).

Microplastics (MPs), generally considered as having a size inferior to 5 mm, have diversified origins. They come from the base material (*pellets*) used in the manufacture of diverse products, such as cosmetics and exfoliate cleansers, or from clothes that eliminate fibers during washing. Complex physical-chemical processes, combining the effects of ultraviolet radiation, oxidation, and mechanical abrasion, also promote the fragmentation of large plastic polymers in fine particles (Betts, 2008; Barnes et al., 2009; Fendall & Sewell, 2009; Andrady, 2011; De Falco et al., 2019).

A major concern of the MPs presence in the environment is the subsequent transference to the aquatic biota, which has been increasingly reported: from modifications of bacteria assemblages' structure (McCormick et al., 2016) to contamination of invertebrate and vertebrate fauna. Examples include a variety of taxonomic groups, such as whales (Moore et al., 2020), turtles (Caron et al., 2018), fish (Neves et al., 2015; Silva-Cavalcanti et al., 2017; Bletter et al., 2019; Urbanski et al., 2020), mussels (Van Dermeersch et al., 2015), insects (Cuthbert et al., 2019; Silva et al., 2019) and amphipods (Battistin et al., 2023). In addition to direct ingestion, more complex pathways of MPs transferences, including sediments, benthic macroinvertebrates, and secondary consumers (aquatic birds), has been evidenced (Lourenço et al., 2017).

The physiological effects of MPs ingestion are still not well known, but it is important to consider that these particles aggregate and facilitate the entrance of pollutants into the food webs. The hydrophobic characteristic of MPs promotes the sorption of chemical pollutants, with the potential of accumulation in the biota (Andrady, 2011; Rochman et al., 2014; Faure et al. 2015; Brennecke et al., 2016; Li et al., 2018a; Di & Wang, 2018; Tourinho et al., 2019; Zhang et al. 2019).

Historically, rivers are severely affected by human activities and more recently (last eight decades) they play an important role in the transport of MPs (Peng et al. 2018; Jambeck et al., 2015; Almas et al. 2022; Zhang et al 2021). In Brazil, the Tietê River is an emblematic case of environmental degradation, after receiving for more than a century most of the domestic and industrial effluents of the São Paulo megalopolis (presently about 30 million people), as well as a huge amount of irregularly disposed solid residues, mainly plastic litter. The limnological/water quality parameters rarely are in conformity with the reference standards of the legislation, for instance for the dissolved oxygen that frequently falls to near-zero, even zero, concentrations (Tundisi et al., 2008; Buckeridge & Ribeiro, 2018; Silva et al., 2022). Urbanski et al. (2020) found that the most important fish resource of this river, *Prochilodus lineatus*, exhibits a high level of contamination (mean of 9.4 particles per individual), three times higher when compared to results obtained from samples of a tributary river without the direct influence of urban areas (mean of 3.6 particles per individual). Probably, it is a case of passive MPs ingestion, as this fish searches for benthic invertebrates and organic detritus in the river's bottom (iliophagous feeding habitat).

Our study focused on MPs evaluation – quantity, form, size, and color, in water and sediment samples of the Tietê River middle stretch, downstream the São Paulo metropolitan region. In addition to the main river, for comparison purpose, two other local aquatic environments, contrasting in terms of hydrodynamics and water quality (a marginal lagoon and a tributary river), were also analyzed.

Spatially we hypothesized an increasing gradient of suspended (water column) MP contamination: tributary river (Peixe River) → marginal lagoon → Tietê River. However, contamination in the sediments would be higher in the Tietê lagoon, due to its less active hydrodynamics, which favors MP deposition. Temporally, the presence of MPs would increase during the rainy season, associated with higher urban litter running into the river systems.

2. Material and Methods

2.1. Study area and sampling procedures

Tietê is the main river entirely inserted (1,136 km long; east west oriented) in the State of São Paulo State, the most populous and industrialized in Brazil. After sustaining the development of the capital city (São Paulo), located in the Tietê upper/middle basin, for more than 400 years, including the provision of drinking water, the river become severely impacted. Along tens of kilometers, the river has no other use than reception and transport the sewage of the megalopolis. Successive layers of litter sedimentation along the river embankments is an indelible human mark, characterizing recent anthropogenic deposits (*sensu* Waters et al., 2016; Zalasiewicz et al., 2016).

The Tietê River sampling area is in the municipality of Anhembi, approximately 160 km (straight line; 350 km following the river meanders) downstream the São Paulo city. Despite the distance from the megalopolis, evidence of the river degradation is deplorable. Three distinct environments were selected: the main river (Tietê) (22°47'31.0"S and 48°05'48.8"W) and an adjacent marginal lagoon (22°47'41.70 and 48°6'24.02), both highly polluted systems, and the lower stretch of a tributary (Peixe River) (22°49'42.8"S and 48°06'01.5"W), without influence of urban areas (Fig. 1). In each environment (main river, lagoon and tributary) the sampling points, three for water and five for sediment, were distributed equidistantly along transects of 1 km.

Water samples (triplicates per point) were obtained in April 2021, corresponding to the end of the rainy season (early autumn), and August 2021, during the dry season (winter). The accumulated precipitation in the city of São Paulo (São Paulo-Mirante meteorological station; <https://bdmep.inmet.gov.br/>) along the previous trimester was 534 mm (January, February, and March) and 100 mm (May, June, and July), respectively. Sediment was sampled in quintuplicate per point, during the dry season.

A standard plankton net of 68 µm of mesh aperture was used to collect the MPs suspended in the water column, through vertical hauls in the rivers and horizontal hauls in the lagoon, which is very shallow (ca. 1 m depth). The filtered volume per sample varied between 200L and 800L. Superficial sediments were obtained using Van Veen dredge (0.0198 m² of aperture).

Fig. 1.

2.2. Microplastic extraction from water samples

Each water sample was entirely analyzed. Initially, due to the high quantity of organic detritus, a digestion process was carried out using 20 mL solution of H₂O₂ (30%) and 20 mL solution of Fe(II) 0,05 M, during 30 minutes on a heating plate at 70°C. After removing most of the organic matter samples were fractionated through metal sieves with mesh sizes of 4 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm and 0.053 mm, and the retained material was recovered using purified water (Gehaka; electric conductivity < 0,07 µS/cm) for posterior analysis. Extraction methods and fine adjustments based on MPs previous studies, such as Yonkos et al. (2014), Masura et al. (2015), Marine Debris Program (2015); Li et al. (2018b), Blettler et al. (2019) and Rowley et al. (2020).

2.3. Microplastic extraction from sediment samples

Sediment samples were completely dried at 50° C and manually homogenized. For each sampling point, aliquots of 25 g of dried sediment from each quintuplicate were mixed, and 50 g of this integrated sample was used for the subsequent procedures. Organic matter digestion, sieving (4mm, 1mm, 0.5mm, 0.250 mm, 0.125 mm, and 0.053 mm), and MPs recovery follow the same procedures employed for the water samples. It is important to mention that the excessive presence of organic contents caused intense ebullition during the digestion process and whenever necessary we reduced the temperature reaction by adding cool purified water, besides quickly removal of the beaker from the hot plate.

2.4. Microscopic analyzes

The distinct MPs size classes were quantitatively analyzed in terms of color and form (fragment, fiber, and pellet) under stereomicroscope (Zeiss Discovery 20). Criteria for discrimination of MPs (synthetic particles) were the absence of cellular and organic structures; identifiable and homogeneous colors; fibers of the same thickness having a three-dimensional bending to exclude the biological origin (Norén, 2007; Hidalgo-Ruz et al., 2012). Flotation using saline solution was tested, but was not satisfactory. As only part of MPs floated. Thus, both, water and sediment samples, were analyzed entirely.

2.5. Minimizing environmental contamination

Procedures to avoid contamination were constantly employed following literature suggestions (Sarijan et al., 2018; Silva-Cavalcanti et al., 2017; Urbanski et al., 2020). For storage and manipulation of the samples, in the field and laboratory, it was always used glass, porcelain, or metal devices, in order to

avoid contamination. Clean cotton aprons and surgical procedure gloves were used during the laboratory procedures, and the work surfaces and utensils used were repeatedly sterilized using alcohol (70%). Digestion and sterilizing solutions were prepared with deionized water (milli-Q, Millipore) and during microscopic counts, the counting plates/cuvettes remained covered with glass Petri dishes. To assess external contamination (i.e., airborne plastic fibers *sensu* Zhang et al., 2020), an open petri dish with ethanol was placed adjacent to the microscope. During the samples digestion beakers remained covered with aluminum foils; sieving was performed as quick as possible to reduce the sample's exposition, and always using metal covers.

2.6. Data analyzes

For the water column, environments and seasonal periods were compared through mean values and respective standard deviations (triplicates per site/period), and the differences were statistically tested (Student's t-test) (Sigma Plot 11).

3. Results

3.1. Microplastics in the water column

The MPs were found in all analyzed samples and the mean values and standard deviation are shown in Fig. 2. In April (end of rainy season), among the three considered environments (Tietê River, Tietê lagoon and Peixe River), the maximum mean value occurred in the Tietê River, 500.7 MPs/m³. The minimum mean value was registered in the Peixe River, 93.0 MPs/m³. Values were significantly higher in Tietê compared to Peixe River ($p < 0.005$). The lagoon exhibited an intermediate concentration, 220.0 MPs/m³, which was not statistically different. In August, during the dry season, we observed an unexpected higher concentration in the Peixe River, mean of 228.0 MPs/m³, compared to the Tietê River, mean of 107.9 MPs/m³. Lagoon had an intermediate value, mean of 186.3 MPs/m³. For this second sampling campaign, the values of the distinct environments were not statistically different.

Considering the samples individually, the minimum was 35.4 MPs/m³, Peixe River in April, and the maximum was 814.5 MPs/m³, Tietê River in April.

Comparison of the set of samples for each period of the year showed to be not statistically different.

The amount of counted MPs totalized 1859, mostly fibers (83.0%), followed by fragments (12.5%) and pellets (4.5%). (Fig. 3).

Smaller MPs prevailed, with 52.2% in the size class from 0.053 mm to 0.25 mm; 31.9% between 0.25 mm and 0.5 mm; 13.6% between 0.5 mm and 1 mm and only 2.3% between 1 mm and 4 mm (Fig. 4).

Thirteen distinct colors were observed with wide predominance of transparent, 61.6%, blue, 15.7%, black, 7.5 %, white, 6.2% and red, 3.0%. The other colors together, including multicolor particles (two or more colors), represented 6.0% of the MPs (Fig. 5).

Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 5.

3.2. *Microplastics in the sediment*

The number of MPs found in the sediments (dry weight of integrated samples) was much higher (~20 times) in Tietê River, 190,460 MPs/kg, and Tietê lagoon, 179,480 MPs/kg, compared to the tributary, Peixe River, 9,540 MPs/kg (Fig. 6).

Of 18,974 counted particles in the sediments, 85.3% were fibers, 7.3% fragments, 7.3% pellets and 0.1% glitter (Fig. 7). Similar to the water column, most MPs in the sediments are very small, 37.5% between 0.053 mm and 0.125 mm; 49.3% between 0.125 mm and 0.25 mm; 10.8% between 0.25 mm and 0.5 mm; 1.9% between 0.5 mm and 1 mm, and 0.5% between 1 mm and 4 mm (Fig. 8). The proportion of colors (12 in a total) of the sediment MPs, 56.2% of transparent, 18.8% of blue, 9.2% of black, 3.5% of red and 12.3% of the other colors, was also very similar to the ones observed in the water samples (Fig. 9).

Fig. 6.

Fig. 7.

Fig. 8.

Fig. 9.

4. Discussion

Despite the great historical, cultural, socioeconomic, and environmental importance of the Tietê River, the number of published scientific studies is still insufficient to characterize and understand its limnological structure and functioning as well as its severe state of degradation (Tundisi et al., 2008; Buckeridge & Ribeiro, 2018; Urbanski et al., 2020; Silva et al., 2022).

The highly predictable assumption of considerable MP contamination in the Tietê River was fully confirmed and integrated water-sediment analyzes were important for the understanding of distinct processes on both spatial and temporal scales.

The first hypothesis predicting an increasing spatial gradient (Peixe River → Tietê lagoon → Tietê River) of MP contamination in the water column (suspended material) was only partially proved. In April, soon after the summer rainy season, the MPs concentration in the Tietê River was in fact significantly higher (5.4 times; $p < 0.005$) than in the tributary, and the lagoon exhibited an intermediate value. However, this trend did not repeat in August, during the winter dry season, when the presence of MP in the tributary was higher. From summer to winter, a sharp decrease in the MPs concentrations occurred in the Tietê River (4.6 times less), attesting the third hypothesis – the presence of MPs would increase during the rainy

season, associated with the increase of irregularly disposed urban litter transportation (surficial runoff) into the river systems.

The increase in the quantities of MPs transported in the Tietê River during the rainy season overcomes the potential dilution effect. Yonkos et al. (2014) and Wong et al. (2020) also found a positive correlation between rain precipitation and MPs contamination in rivers of USA and Taiwan respectively. Nevertheless, the opposite was seen in the tributary Peixe River, with an increase in MPs concentration (2.5 times more). In this case, the factor favoring the higher concentration probably was the considerable diminution of the river volume. The quantity of 228 MPs/m³ in the Peixe River in August is high and it was not expected, as this tributary is not influenced by urban areas. We suppose that MP contamination comes from the intensive use (and loss) of fish gillnets (nylon material) by professional anglers, as well as by irregular litter discharged into the river by isolated rural communities.

Dikareva & Simon (2019) showed that the quantities of MPs in tributary rivers are equivalent to that of main rivers. Therefore, the small river's contribution needs to be properly evaluated in order to get a comprehensive understanding of the inorganic contamination of freshwater ecosystems.

Lower variability between seasons occurred in the Tietê lagoon, with a small increase (1.3 times) during the dry season, also due to the positive effect in concentration related to volume reduction. Regularly, the connection of the lagoon to the main river course is very limited through a small perennial channel (less than 10 m wide). Only during atypical large floods, which not occurred during the study period, there is a high replacement of the water in the lagoon. Thus, the entrance of MPs coming from the Tietê River was improbable and the slight increment in the second campaign probably come from internal processes, such as macroplastic degradation and MPs resuspension from sediments by wind action (Davidson et al., 2022), as the lagoon is very shallow, predominantly around 1 m or even less.

The absolute amounts of MPs, especially in the Tietê River in April, mean of 501 MPs/m³, is high, compared to several other analyzed freshwater environments. For instance: it is reported variations from 10 to 223 MPs/m³ in Saigon River, Vietnam (Lahens et al., 2018); 17 MPs/m³ to 303 MPs/m³ in New Zealand rivers (Dikareva & Simon, 2019); 14 to 25 MPs/m³ in the Thames River, UK (Rowley et al., 2020); 2.5 to 100 MPs/m³ in Taiwan Rivers (Wong et al., 2020). However, even the maximum concentration (individual samples) found in Tietê River, 814 MPs/m³, is much lower than the highest ones observed in some urban areas. Concentrations varied from 2,355 to 5,733 MPs/m³ in Chicago rivers, USA (Mc Cormick et al., 2016); 172,000 MPs/m³ to 519,000 MPs/m³ in urban channels of Ho Chi Minh City, Vietnam (Lahens et al., 2018); mean of, 4,703 MPs/m³ in the Three Gorgeous Reservoir in China (Di & Wang, 2018); mean of 300,200 MPs/m³ in Sinos River, Brazil (Ferraz et al., 2020). Relatively lower values of MPs contamination in Tietê River, in comparison to these previous studies carried out in very crowded and industrialized areas, is associated to the fact that the distance of our sampling area is more than three hundred km downstream São Paulo City. In a recent academic study in the Tietê River (Moraes, 2022), the maximum concentration was 1530 MPs/m³, which was found during the rainy season in the same river stretch we selected in our study. There is the possibility that most plastic particles coming from the megalopolis had already deposited in the bottom sediments along the river course, although in the mentioned study (Moraes, 2022) it was observed lower concentrations in the upstream stretch.

An interesting approach for future MPs investigation in the Tietê River is the role of the river hydrodynamics. The stretch where we sampled is typically lotic, but less than 50 km downstream it was constructed a cascade of six large reservoirs for hydropower generation. In a study by Zhang et al. (2021) it was found twice more particles in water samples of the Yangtze River collected in reservoirs (mean of 2,792 MPs/m³) than in riverine stretches (mean of 949 MPs/m³).

Data on sediment of the Tietê River middle stretch and regional associated ecosystems make explicit an even more dramatic scenario of contamination. Our data varied between 10⁵ MPs/kg (Tietê River and Tietê lagoon) and 10⁴ MPs/Kg (Peixe River), which is much higher compared to other studies, some carried out in urban areas, whose values on sediment contamination are ≤ 10³/kg (Peng et al., 2018; Di & Wang, 2018; Zhang et al., 2021; Parker et al., 2022).

Comparisons are difficult, due to the inherent methodological peculiarities. It is important to consider two points: we did not use saline solution for flotation, but the entire oxidized sample was analyzed, and small-size particles (0.053 to 0.125 mm and 0.125 mm to 0.25 mm) were included in the counting.

Higher values of MPs occurred in the Tietê River (~190,000 MPs/kg), followed by the lagoon (~180,000 MPs/kg). Despite being much lower (~ 20 times), contamination of the tributary sediments cannot be negligible (~10,000 MPs/Kg). Besides comparable, results did not corroborate the second hypothesis, that, contamination in the lagoon sediments would be higher than in the river. The premise is that the less active hydrodynamics (lentic system) favors MP deposition, as already observed in the Yangtze River by Zhang et al. (2021). For the understanding of the differences in the Tietê lagoon sediments it is important to consider, as previously mentioned, that during the sampling interval (April-August) there was a reduced entrance of Tietê River waters, the main source of MPs.

The huge sediment MP contamination in the middle Tietê River, despite so close from São Paulo megalopolis (350 km downstream), may be associated with the river physical characteristics as high velocity and intensive flow (~ 1,500 m³/s of the final stretch). In a detailed spatial analysis carried out in Three Gorgeous reservoir (China), water and sediment, Di & Wang (2018) observed, for sediments, a higher abundance of MPs in countryside areas, different from the water column, whose higher values were close to urban areas. They also demonstrated that the high-density MPs were more likely to deposit in the sediment

Sediment analyzes, especially for polluted environments, showed to be much more time-consuming, compared to the water samples. There is much more organic matter to be oxidized and an astonishing number of MPs to be counted. But the obtained results are fundamental for a proper evaluation of MPs contamination. As a more conservative compartment, less exposed to short-term variability and that also integrates physical and biological processes temporally, a lower sampling frequency of the sediments may be justifiable.

Generally, the analyzed characteristics size, form, and color, showed to be similar when compared the MPs observed in the water and sediment samples.

Most MPs we counted (~ 50%) are of small size, between 0.053 mm and 0.25 mm and between 0.125 and 0.25 mm, for the water column and sediment, respectively. This is expected as continuous fragmentation results in an exponential increase in MPs (Barnes et al., 2009).

Despite the methodological difficulties related to the visual inspection of small-size particles, this fraction cannot be ignored as the smaller is the MP higher the possibility to be incorporated into the food chains with still unknown consequences (Cole et al., 2015; Sun et al., 2019).

For forms, fiber predominated, widely (83.0% in the water and 85.3% in the sediment), following the recurrent pattern, mostly from 50 to 250 μm (Di & Wang, 2018; Lathern et al., 2018 Ferraz et al., 2020; Davidson et al., 2022; Parker et al., 2022), predominantly polyester (Lathern et al., 2018).

The proportions of fragments and pellets varied, comparing water column and sediment. Fragments represented 12.5% of MPs in the water samples and 7.3% in the sediments. Pellets corresponded to 7.3% of MPs in the sediment and 4.5% in the water. Such differences are probably related to the differential density of these materials. Pellets did not occur in the Peixe River and may be related to the absence of industrial activity in the basin (Chen et al., 2021).

In terms of color (13 in the water and 12 in sediment), transparent predominated (62% in the water and 56% in sediment), followed by blue (16% in the water and 19% in sediment) and black (7.5% in the water and 9.2% in sediment). In case of water fragments, separately, blue, black, and white were more common. Unfortunately, it is not possible to infer chemical composition through colors, and also forms (Dikareva & Simon, 2019). Therefore, chemical characterization is highly recommended for future studies in the Tietê River basin, as this information can contribute to the identification of pollution sources and the proposal of remediation strategies.

Finally, it is also important to consider that our study contributes to minimize the lack of information on MPs contamination in freshwater ecosystems, especially for benthic sediments (Andrady, 2011; Faure et al., 2015)

5. Conclusion

The middle Tietê River, as well as the associated regional aquatic environments, is highly contaminated with MPs, which was highly predictable given its long history of environmental degradation.

Obtained data permitted to test the three postulated hypotheses, in terms of spatial and seasonal trends. There is an increasing gradient of contamination in the water: Peixe River \rightarrow Tietê lagoon \rightarrow Tietê River. For the main river, contamination in the water column is positively related to seasonal rains. For the tributary, the concentration effect (dry season), prevails. For sediment, contamination in the main river and marginal lagoon is of the same (very high) magnitude (10^5 MPs/kg), but not higher in the lagoon as presupposed due to its lentic condition. Tributary river data indicates a lower contamination, but not negligible, whose sources are distinct – probably fishery activities and litter irregular disposal from rural communities.

Quantities of MPs in the sediment samples were proportionally much higher compared to the ones in the water samples. Concentrations of MPs in the water column were high, but inferior to the ones found in crowded and industrialized urban areas. Integrated water-sediment analyzes was important for the understanding of distinct processes on both spatial and temporal scales.

Size, form, and color, showed to be similar when compared to the MPs observed in the water and sediment samples. Small size, between 0.053 mm and 0.25 mm, transparent and blue fibers corresponded to the most abundant particles. Proportionally there was more fragments in the water column and more pellets in the sediments.

Further studies are necessary, including chemical characterization of the MPs and the role of the river hydrodynamics – the alternation between lotic and lentic (reservoirs) stretches, besides transference to biota.

Acknowledgements

To CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior) for scholarships conceived to the first three authors. To Limnética Consultancy, for logistic support.

Appendix A. Supplementary data.

References

- Feisal Almas, F. F., Bezirci, G., Çagan, A. S., Gokdag, K., Çırak, T., Kankılıç, G.B., Paçal, E., Ülkü Nihan Tavsanoğlu, U. N. 2022. Tracking the microplastic accumulation from past to present in the freshwater ecosystems: A case study in Susurluk Basin, Turkey. *Chemosphere* 303. 135007.
- Andrady, A.L., 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar Pollut Bull.* 62:1596–1605.
- Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C., Barlaz, M., 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 364:1985–1998.
- Betts, K., 2008. Why small plastic particles may pose a big problem in the oceans. *Environ Sci Technol.* 42:8996.
- Blettler, M.C.M., Garelo, N., Ginon, L., AbriaL, E., Espinola, L.A. & Wantzen, K.M., 2019. Massive plastic pollution in a mega-river of a developing country: Sediment deposition and ingestion by fish (*Prochilodus lineatus*). *Environ. Pollut.* 255 (3): 113348.
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I., Canning-Clode, J., 2016. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178. 189e195.

- Buckeridge, M. & Ribeiro, W.C., 2018. Livro branco da água. A crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo em 2013-2015: Origens, impactos e soluções. Instituto de Estudos Avançados, São Paulo. 175 pp.
- Caron, A.G.M., Thomas, C.R., Berry, K.L.E., Motti, C.A., Ariel, E., Brodie, J.E., 2018. Ingestion of microplastic debris by green sea turtles (*Chelonia mydas*) in the Great Barrier Reef: Validation of a sequential extraction protocol. *Marine pollution bulletin* 127: 743–751.
- Chen, J., Wang, W., Liu, H., Xu, X., Xia, J., 2021. A review on the occurrence, distribution, characteristics, and analysis methods of microplastic pollution in ecosystems. *Environ Pollut Bioavailab.* 33:227–246.
- Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Galloway, T.S., 2015. The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod *Calanus helgolandicus*. *Environ Sci Technol.* 49:1130–1137.
- Cuthbert, R.N., Al-Jaibachi, R., Dalu, T., Dick, J.T.A., Callaghan, A., 2019. The influence of microplastics on trophic interaction strengths and oviposition preferences of dipterans. *Sci Total Environ.* 651: 2420-2423. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.10.108
- Davidson, B., Kallyn, B., Samrah, S., Rios Mendonza, L.M., Pujara, N., 2022. Microplastic contamination of sediments across and within three beaches in western Lake Superior. *Journal of Great Lakes Research* 48 (6): 1563-1572.
- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M., Avella, M., 2019. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633. doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x.
- Di, M., Wang, J., 2018. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment* 616–617: 1620–1627.
- Dikareva, N., Simon, K.S., 2019. Microplastic pollution in streams spanning an urbanisation gradient. *Environ Pollut.* 250:292–299.
- Estahbanati, S., Fahrenfeld, N.L., 2016. Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water. *Chemosphere.* 162:277–284.
- Faure F., Demars C., Wieser O., Kunz M., de Alencastro, L.F., 2015. Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. (Special Issue: Microplastics in the environment.). *Environ Chem.* 12:582–591.
- Fendall, L.S., Mary A. Sewell, M. A., 2009. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin* 58: 1225–1228.
- Ferraz, M., Bauer, A. L., Valiati, V.H., Schulz, U. H., 2020. Microplastic Concentrations in Raw and Drinking Water in the Sinos River, Southern Brazil. *Water* 12, 3115; doi:10.3390/w12113115.

- Geyer, R., Jambeck, J.R. & Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3(7): e1700782.
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., Thiel, M., 2012. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science. Technology*, 46 (6): 3060-75.
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L., 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*. 347(6223): 768 – 771.
- Lahens, L., Strady, E., Kieu-Le, T., Dris, R., Boukerma, K., Rinnert, E., Gasperi, J., Tassin, B. 2018. Macroplastic and microplastic contamination assessment of a tropical river (Saigon River, Vietnam) transversed by a developing megacity. *Environmental Pollution* 236. 661e671.
- Li, J., Zhang, K., Hua Zhang, H., 2018a. Adsorption of antibiotics on microplastics. *Environmental Pollution* 237. 460e467.
- Li, J., Liu, H., Chen, J.P., 2018b. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Res.* 137:362–374.
- Lourenço, P.M., Serra-Gonçalves, C., Ferreira, J.L., Catry, T., Granadeiro, J.P., 2017. Plastic and other microfibers in sediments, macroinvertebrates and shorebirds from three intertidal wetlands of southern Europe and west Africa. *Environ Pollut.* 231:123-133. doi:10.1016/j.envpol.2017.07.103
- Marine Debris Program N. 2015. Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments.
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C. 2015. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48.
- McCormick, A.R., Hoellein, T.J., London, M.G., Joshua Hittie, J., Scott, J.W., Kelly, J.J., 2016. Microplastic in surface waters of urban rivers: concentration, sources, and associated bacterial assemblages. *Ecosphere* 7(11). e01556.
- Moore, R.C., Loseto, L., Noel, M., Etemadifar, A., Brewster, J.D., MacPhee, S., Bendell, L., Ross, P.S., 2020. Microplastics in beluga whales (*Delphinapterus leucas*) from the Eastern Beaufort Sea. *Mar Pollut Bull.* 150:110723. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110723
- Moraes, N.G., 2022. Análise de microplásticos no rio Tietê – SP: identificação, caracterização e quantificação dos poluentes orgânicos adsorvidos. Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo. 206 pp.
- Murphy F., Ewins C., Carbonnier F., Quinn B., 2016. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environ Sci Technol.* 50:5800–5808.

- Neves, D., Sobral, P., Ferreira, J.L., Pereira, T., 2015. Ingestion of microplastics by commercial fish of the Portuguese coast. *Marine Pollution Bulletin*, 101: 119–126.
- Norén, F., 2007. Small plastic particles in coastal Swedish waters. KIMO report. Sweden, 1-11.
- Olivatto, G., Carreira, R., Tornisiello, V. & Montagner, C. 2018. Microplastics: Contaminants of Global Concern in the Anthropocene. *Rev. Virtual Quim.* 10(6): 1968 – 1989.
- Parker, B., Britton, J.R., Pabortsava, K., Barrow, M., Green, I.D., Almela, V.D., Andreou, D. 2022. Distinct microplastic patterns in the sediment and biota of an urban stream. *Science of the Total Environment* 838 (2022) 156477.
- Peng, G., Xu, P., Zhu, B., Bai, M., Li, D., 2018. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: A case study of risk assessment in mega-cities. *Environmental Pollution* 234:448e456.
- Rochman, C.M., Brian T. Hentschel, B.T., Teh, J.S., 2014. Long-Term Sorption of Metals Is Similar among Plastic Types: Implications for Plastic Debris in Aquatic Environments. *PLOS ONE* | Issue 9(1). e85433.
- Rowley, K. H.; Cucknell, A-C.; Smith, B. D.; Clark, P. F.; Moritt, D., 2020. London's River of plastic: High levels of microplastics in the Thames water column. *Science of the Total Environment*. 740, 140018.
- Sarijan, S., Azman, S., Said, M.I.M., Andu, Y., Zon, N.F., 2018. Microplastics in sediment from Skudai and Tebrau river, Malaysia: a preliminary study. *MATEC Web of Conferences*, 250, 06012. doi:10.1051/matecconf/201825006012
- Silva, C.J.M., Silva, A.L.P., Gravato, C., Pestana, J.L.T., 2019. Ingestion of small-sized and irregularly shaped polyethylenemicroplastics affect *Chironomus riparius* life-history traits. *Science of the Total Environment* 672. 862–868.
- Silva, F.L., Fushita, A.T., Cunha-Santino, M.B., Biachini Jr., I., 2022. Adopting basic quality tools and landscape analysis for applied limnology: an approach for freshwater reservoir management. *Sustainable Water Resources Management*, 8:65. doi.org/10.1007/s40899-022-00655-8
- Silva-Cavalcanti, J. S.; Silva, J.D.B.; França, E.J.; Araújo, M.C.B., GUSMÃO, F., 2017. Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource. *Environment Pollution.*, 221: 218- 226.
- Sun, Y., Xu, W., Gu, Q., Chen, Y., Zhou, Q., Zhang, L., Gu, L., Huang, Y., Lyu, K., Yang, Z., 2019. Small-sized microplastics negatively affect rotifers: changes in the key life-history traits and rotifer-*phaeocystis* population dynamics. *Environ Sci Technol.* 53:9241–9251.
- Tourinho, P.S, Kočí, V., Loureiro, S., van Gestel, C.A.M. 2019. Partitioning of chemical contaminants to microplastics: Sorption mechanisms, environmental distribution and effects on toxicity and bioaccumulation. *Environ Pollut.* 252:1246-1256. doi: 10.1016/j.envpol.2019.06.030.
- Tundisi, J.G., Matsumura-Tundisi, T. & Abe, D.S., 2008. The ecological dynamics of Barra Bonita (Tietê River, SP, Brazil) reservoir: implications for its biodiversity. *Braz. J. Biol.* 68(4): 1079 – 1098.
- Urbanski, B.Q., Denadai, A.C., Azevedo-Santos, V.M., Nogueira, M.G. 2020. First record of plastic ingestion by an important commercial native fish (*Prochilodus lineatus*) in the middle Tietê River

basin, Southeast Brazil. *Biota Neotropica* 20 (3): e20201005. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2020-1005>.

- Vandermeersch, G., Van Cauwenberghe, L., Janssen Colin, R., Marques, A., Granby, K., Fait, G., Kotterman, M.J.J., Diogène, J., Bekaer, K., B., Johan, R., Devriese, L., 2015. A critical view on microplastic quantification in aquatic organisms. *Environ Res.* 143: 46-55. doi:10.1016/j.envres.2015.07.016
- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Sul, J.A.I., Corcoran, P.L., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Edgeworth, M., Gałuszka, A., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Steffen, W., Summerhayes, C., Wapre, M., Williams, M., Wolfe, A.P., Yonan, Y., 2016. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene* 13: 4–17.
- Zhang, F., Wang, X., Xu, J., Zhu, L., Peng, G., Xu, P., Li, D., 2019. Food-web transfer of microplastics between wild caught fish and crustaceans in East China Sea. *Mar Pollut Bull.* 146:173–182.
- Zhang, Q.; Zhao, Y.; Du, F.; Cai, H.; Wang, G.; & Shi, H., 2020. Microplastic Fallout in Different Indoor Environments. *Environmental Science & Technology*, doi: 10.1021/acs.est.0c00087.
- Zhang, Z., Deng, C., Dong, L., Liu, L., Li, H., Wu, J., Ye, C., 2021. Microplastic pollution in the Yangtze River Basin: Heterogeneity of abundances and characteristics in different environments. *Environmental Pollution* 287 (2021) 117580.
- Yonkos, L.T., Friedel, E. A., Perez-Reyes, A. C., Ghosal, S., Arthur, C.D., 2014. Microplastics in Four Estuarine Rivers in the Chesapeake Bay, USA. *Environ. Sci. Technol.* DOI: 10.1021/es5036317.
- Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A.D., Poirier, C., Gałuszka, A., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E.C., Ellis, M., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Richter, D.B., Steffen, W., Syvitski, J., Vidas, D., Wapre, M., Williams, M., Zhisheng, A., Grinevald, J., Odada, E., Oreskes, N., Wolfe, A.P., 2016. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *SCIENCE VOL 351(6269)*. aad2622-9.
- Wong, G., Löwemark, L., Kunz, A., 2020. Microplastic pollution of the Tamsui River and its tributaries in northern Taiwan: Spatial heterogeneity and correlation with precipitation. *Environ Pollut.* 260:1–12.

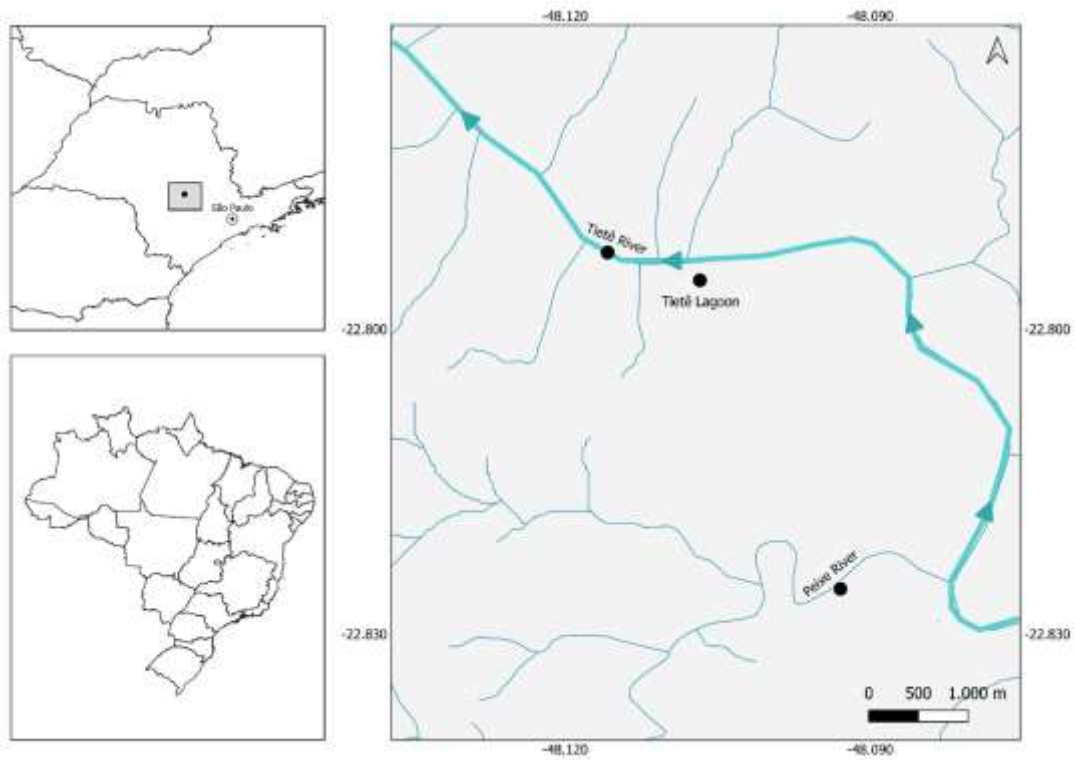


Fig. 1 (color). Map of the study area and positioning of the sampling sites.

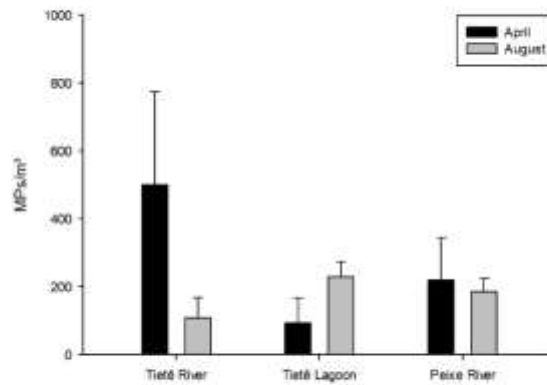


Fig. 2. Number of microplastics (mean and standard deviation) in the water column of the Tietê River and associated aquatic ecosystems (marginal lagoon and tributary Peixe River), São Paulo, Brazil, during rainy and dry seasons.

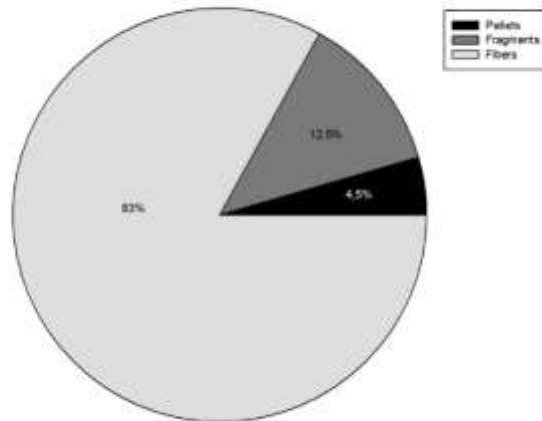


Fig. 3. Microplastics form distribution in the water samples of the Tietê River and associated aquatic ecosystems (marginal lagoon and tributary Peixe River), São Paulo, Brazil.

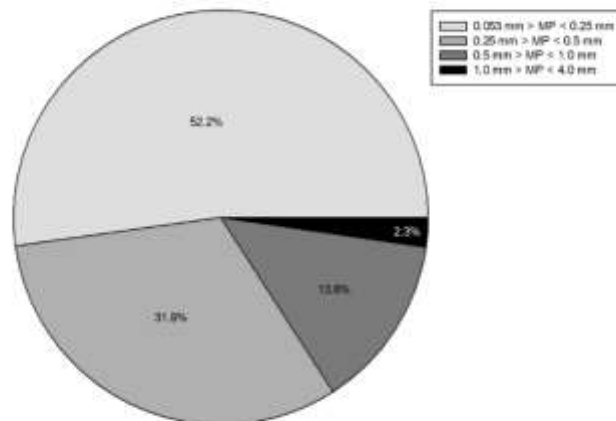


Fig. 4. Microplastics size distribution in the water samples of the Tietê River and associated aquatic ecosystems (marginal lagoon and tributary Peixe River), São Paulo, Brazil.

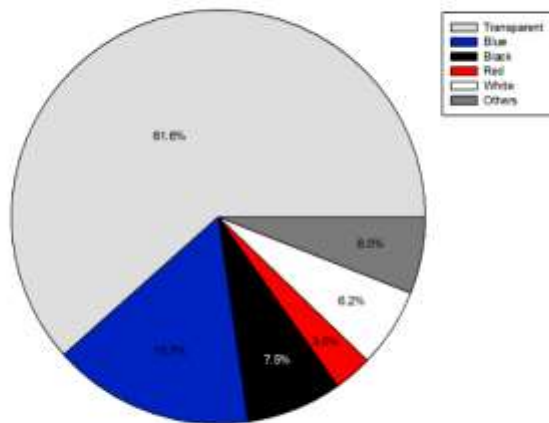


Fig. 5 (color). Microplastics color distribution in the water samples of the Tietê River and associated aquatic ecosystems (marginal lagoon and tributary Peixe River), São Paulo, Brazil.

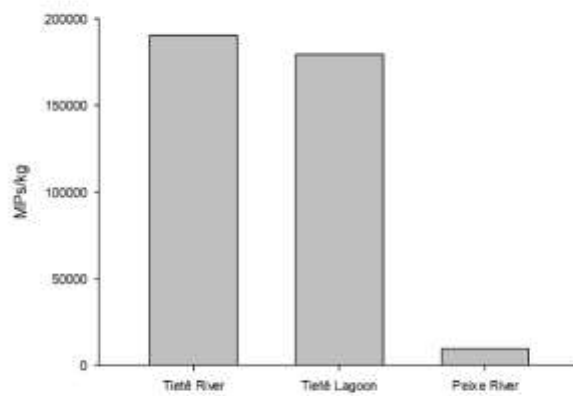


Fig. 6. Number of microplastics in the sediment of the Tietê River and associated aquatic ecosystems (marginal lagoon and tributary Peixe River), São Paulo, Brazil.

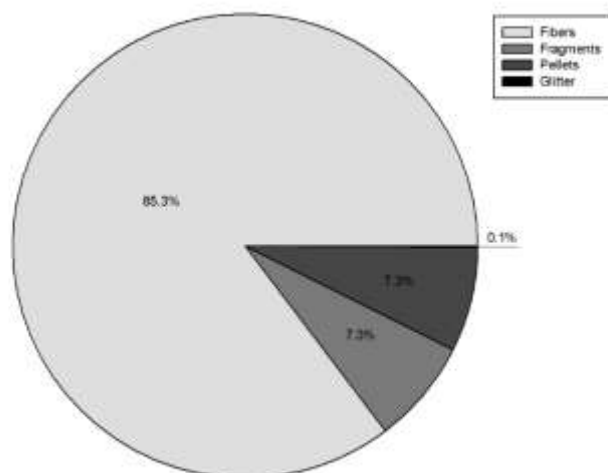


Fig. 7. Microplastics form distribution in the sediment samples of the Tietê River and associated aquatic ecosystems (marginal lagoon and tributary Peixe River), São Paulo, Brazil.

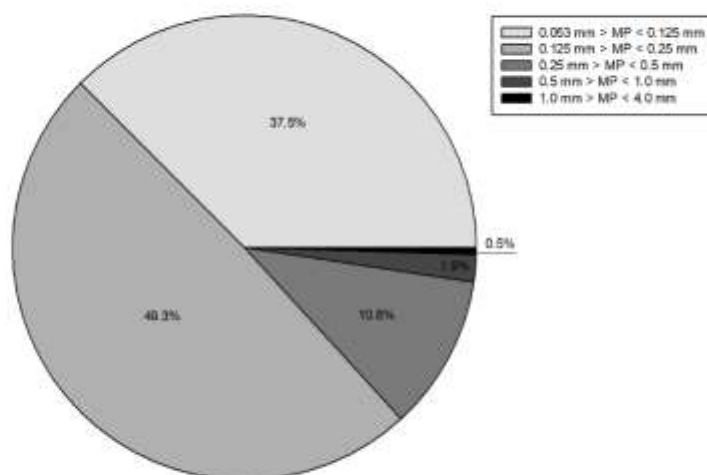


Fig. 8. Microplastics size distribution in the sediment samples of the Tietê River and associated aquatic ecosystems (marginal lagoon and tributary Peixe River), São Paulo, Brazil.

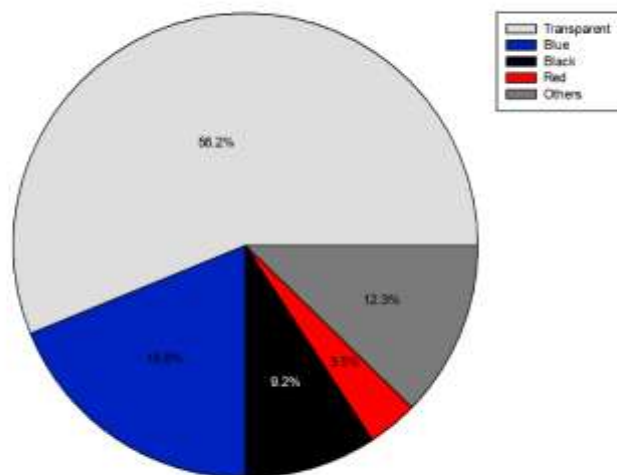


Fig. 9 (color). Microplastics color distribution in the sediment samples of the Tietê River and associated aquatic ecosystems (marginal lagoon and tributary Peixe River), São Paulo, Brazil.

Appendix A. Supplementary data.

Microplastic characteristics in the water samples of Tietê River and associated habitats, Southeast Brazil													
Characteristics		April (end of the rainy season)											
		Color					Size class (mm)				Form		
		Blue	Red	Black	Transparent	Others	1 to 4	0.5 to 1	0.25 to 0.5	0.053 to 0.25	Pellet	Fiber	Fragment
Tietê River	Sample 1	32	8	26	154	46	10	15	53	188	20	203	43
	Sample 2	21	5	17	128	27	1	34	39	124	26	146	26
	Sample 3	82	13	29	245	34	18	102	167	116	11	356	36
Tietê lagoon	Sample 1	17	2	9	52	7	8	2	24	53	4	78	4
	Sample 2	6	0	2	32	4	3	6	14	24	8	42	1
	Sample 3	42	8	14	68	17	0	33	56	57	0	135	6
Peixe River	Sample 1	9	0	3	61	2	0	0	6	69	0	67	5
	Sample 2	3	2	0	9	1	0	7	3	12	0	13	2
	Sample 3	7	3	0	43	6	0	0	30	22	0	47	8
		August (dry season)											
		Color					Size class (mm)				Form		
		Blue	Red	Black	Transparent	Others	1 to 4	0.5 to 1	0.25 to 0.5	0.053 to 0.25	Pellet	Fiber	Fragment
Tietê River	Sample 1	7	5	6	67	16	0	4	21	76	8	58	35
	Sample 2	5	0	4	23	2	0	3	6	25	1	32	1
	Sample 3	8	0	5	36	5	0	4	17	33	5	44	4
Tietê lagoon	Sample 1	4	1	3	65	26	0	6	36	56	0	77	21
	Sample 2	14	0	4	42	8	0	6	41	22	0	66	3
	Sample 3	11	0	3	52	4	1	11	41	17	0	65	5
Peixe River	Sample 1	8	0	5	30	11	1	2	7	34	0	49	5
	Sample 2	6	4	4	19	7	1	5	11	22	0	29	5
	Sample 3	10	5	5	23	5	0	4	21	21	0	37	7

Microplastic characteristics in the sediment samples of Tietê River and associated habitats, Southeast Brazil														
	April (end of the rainy season)													
	Color					Size class (mm)					Form			
	Blue	Red	Black	Transparent	Others	1 to 4	0.5 to 1	0.25 to 0.5	0.125 to 0.25	0.053 to 0.125	Pellet	Fiber	Fragment	Glitter
Tietê River	1806	393	792	5352	1167	42	256	918	6254	2053	372	8360	789	2
Tietê lagoon	1553	277	836	5186	1134	13	81	1084	2817	4979	1018	7358	597	1
Peixe River	202	0	114	119	43	34	18	54	283	88	0	476	1	0