

Influência do sedimento na autofertilização por fósforo total em mesocosmos simulando a fitorremediação de ambiente aquático eutrofizado

Sediment influence on total phosphorus self-fertilization in mesocosms simulating the phytoremediation of eutrophic aquatic environment

Barbara Soares Ferreira¹; Tatiane Araujo de Jesus²

¹ Aluna do Curso de Graduação em Química, Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8499-7239>. E-mail: barbara.ferreira@aluno.ufabc.edu.br

² Professora do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5206-6584>. E-mail: tatiane.jesus@ufabc.edu.br

RESUMO: A fim de restaurar um ecossistema aquático eutrofizado, é essencial eliminar as fontes externas de nutrientes. Além disso, o compartimento sedimento pode estocar grandes quantidades de nutrientes, os quais podem ser liberados para a coluna d'água e manter o ecossistema eutrofizado por muito tempo, mesmo após a eliminação das fontes externas de nutrientes. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar, em mesocosmos, a influência do sedimento em autofertilizar um ambiente aquático com fósforo e sua consequência no retardamento da recuperação deste ambiente caso fosse empregada uma técnica de fitorremediação com *Eichhornia crassipes*. O estudo foi conduzido em mesocosmos de fundo fechado utilizando água, macrófitas e sedimento de reservatório hipereutrófico (Lago das Garças, São Paulo, SP). Foram avaliados dois tipos de sistemas: com e sem sedimento. O estudo foi realizado em triplicata, totalizando seis mesocosmos de 500 L cada. Foram realizadas 8 campanhas de monitoramento entre fev. e jun./2017. Foram determinados os seguintes parâmetros de qualidade da água: pH, condutividade elétrica, turbidez, cor aparente e fósforo total. Foi realizado o manejo das plantas a fim de manter apenas a metade da superfície livre colonizada e permitir a reprodução e o crescimento das plantas. Apesar de ambos os sistemas terem apresentado tendência de diminuição dos teores de fósforo total na água, notou-se que o sistema com sedimento apresentou maior reprodução dos indivíduos de *E. crassipes*, sugerindo a influência do sedimento na autofertilização do sistema. Assim, é importante considerar o sedimento na restauração de ambientes eutrofizados.

Palavras-chave: aguapé; biorremediação; engenharia ecológica; eutrofização; macrófitas.

ABSTRACT: To restore a eutrophic aquatic ecosystem, it is essential to eliminate external sources of nutrients. Furthermore, the sediment compartment can store large amounts of nutrients, which can be released into the water column and keep the ecosystem eutrophic for a long time, even after the removal of external sources of nutrients. In this sense, the present study aimed to evaluate, in mesocosms, the influence of sediment in self-fertilizing an aquatic environment with phosphorus and its consequence in delaying the recovery of this environment if a phytoremediation technique with *Eichhornia crassipes* was used. The study was conducted in closed-bottom mesocosms using water, macrophytes and sediment from a hypereutrophic reservoir (Lago das Garças, São Paulo, SP). Two types of systems were evaluated: with and without sediment. The study was carried out in triplicate, totalling six mesocosms of 500 L each. Eight monitoring campaigns were carried out between February and June 2017. The following water quality parameters were determined: pH, electrical conductivity, turbidity, apparent colour, and total phosphorus. Plant management was carried out to maintain only half of the colonized free surface and allow the reproduction and growth of the plants. Although both systems showed a tendency to decrease the total phosphorus content in the water, it was noted that the system with sediment presented greater reproduction of *E. crassipes* individuals, suggesting the influence of sediment in the self-fertilization of the system. Thus, it is important to consider the sediment when restoring eutrophic environments.

Keywords: bioremediation; ecological engineering; eutrophication; macrophytes; water hyacinth.

INTRODUÇÃO

A eutrofização artificial de ecossistemas aquáticos é um dos principais problemas ambientais da atualidade (UNESCO, 2018; JENNY et al., 2020). Este fenômeno consiste no aumento da produtividade primária (algas e plantas aquáticas) de corpos d'água e é desencadeado pelo aumento das concentrações de nutrientes (nitrogênio e fósforo) (GUO et al., 2014). As ações humanas, como o despejo de esgotos não tratados ou tratados sem etapa específica de remoção de nutrientes contribuem sobremaneira com a intensificação desse processo (TRINDADE; MENDONÇA, 2014; BALDOVI et al., 2021). A eutrofização traz diversas consequências indesejáveis, tais como: depleção dos níveis de oxigênio dissolvido, mortalidade de peixes, proliferação de algas potencialmente tóxicas, diminuição da biodiversidade, aumento das emissões de gases de efeito estufa e aumento dos custos do tratamento das águas para consumo humano (GUO et al., 2014; TRINDADE; MENDONÇA, 2014; BEAULIEU; DEL SONTRO; DOWNING, 2019; COELHO et al., 2020; BENASSI et al., 2021).

Diversos casos de restauração de ambientes aquáticos eutrofizados já foram reportados na literatura (JIANBO et al., 2008; GUO et al., 2014; CHEN et al., 2020). As técnicas de remediação de ambientes aquáticos eutrofizados podem envolver o uso de substâncias químicas, altos custos, causar riscos à microbiota e impedir a recuperação de nutrientes (HUISMAN et al., 2018). Nesse sentido, soluções baseadas na natureza, como a fitorremediação com macrófitas aquáticas pode ser uma alternativa verde e de baixo custo para o controle da eutrofização de ecossistemas aquáticos (CHEN et al., 2020) e ainda possibilita a recuperação de recursos (nutrientes, uso da biomassa para produção de energia e construção civil, entre outros) e estimula a economia circular (GUO et al., 2014).

Uma das espécies de macrófitas amplamente utilizadas é a *Eichhornia crassipes*, muito encontrada em regiões tropicais e que possui a capacidade de fixar elementos químicos em seus tecidos em quantidades acima de suas necessidades, o que a configura uma boa alternativa para uso em remediação de ambientes eutrofizados (COELHO, 2017). Como exemplo, Pistori (2009) concluiu que a *E. crassipes* apresenta desempenho superior na absorção de nutrientes em comparação à *Salvinia molesta* e à *Pistia stratiotes*, tanto em baixas quanto em altas concentrações de nutrientes. De forma análoga, em estudo conduzido em microcosmos com sedimento, Wang e colaboradores (2017) observaram que a *E. crassipes* apresentou melhor desempenho do que a *P. stratiotes* na melhoria dos parâmetros de qualidade no tratamento de efluentes de aquicultura. Além destes, outros estudos recentes têm reportado a capacidade da *E. crassipes* na remoção de fósforo da água (e.g. SUNG; LEE; MUNSTER, 2015; SU et al., 2019; BALDOVI et al., 2021).

Ressalta-se que, para restaurar um ecossistema aquático eutrofizado é imprescindível controlar as fontes externas de nutrientes (SCHINDLER et al., 2008; SCHINDLER, 2012). Entretanto, mesmo após cessarem as fontes externas, o compartimento sedimento pode manter o sistema eutrofizado por muitos anos devido aos estoques de nutrientes (SCHINDLER, 2012; SØNDERGAARD; BJERRING; JEPPESEN, 2013; TU et al., 2019), os quais podem ser liberados para a coluna d'água sob certas condições de pH e oxigenação (BICUDO et al., 2007). Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar, em mesocosmos, a influência do sedimento em autofertilizar um ambiente aquático com fósforo e sua consequência no retardamento da recuperação deste ambiente caso fosse empregada uma técnica de fitorremediação com *Eichhornia crassipes*.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido nas proximidades do Lago das Garças (23° 38'S, 46° 37'W) que está localizado no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI), em São Paulo, SP. Esse ecossistema aquático possui área superficial de 88.156 m², profundidade média de 2,1 m e máxima de 4,7 m e tempo médio teórico de residência da água de 71 dias (BICUDO et al., 2007). O clima na região é o tropical de altitude (CONTI; FURLAN, 2003). Os latossolos são predominantemente no PEFI (VINHA et al., 2011). O Lago das Garças foi eutrofizado ao longo do século XX devido ao lançamento de esgotos da Fundação Parque Zoológico de São Paulo (FPZ-SP) e da Secretaria de Agricultura e Abastecimento (SAA) (BICUDO et al., 2007; COSTA-BÖDDEKER et al., 2012).

Atualmente a entrada de esgotos da SAA não existe mais; e a FPZSP realiza o tratamento de seus esgotos, porém, sem etapa específica de remoção de nutrientes. Desse modo, os sedimentos gerados no Lago das Garças são oriundos da entrada de efluentes da FPZSP, bem como da decomposição da biomassa de algas, plantas aquáticas e demais organismos gerados do metabolismo do próprio lago. O experimento foi constituído de dois sistemas: sem sedimento (Controle) e com sedimento (Tratamento), em triplicatas, resultando em seis unidades experimentais. A **Figura 1** apresenta a configuração experimental e a **Figura 2** ilustra algumas etapas do experimento.

Figura 1. Configuração experimental do estudo de fitorremediação com *Eichhornia crassipes*: Controle (mesocosmos sem sedimento, com água e macrófitas, n = 3) e Tratamento (mesocosmos com água, sedimento e macrófitas, n = 3)



A montagem do experimento se deu no dia 13/02/2017. Foram utilizadas seis caixas d'água de polipropileno, com 500 litros de capacidade cada (Dimensões: D = 1200 mm e H = 800 mm), cobertas com telas antimosquiteiras para impedir a proliferação de insetos no local. Foram estabelecidos três tanques indicados como "Controle", os quais continham água extraída do corpo hídrico e indivíduos da espécie *E. crassipes* e outros três tanques denominados "Tratamento" onde, além de água e macrófitas do próprio local, foram adicionados aproximadamente 8 litros de sedimento lacustre, coletados com auxílio de Draga de Eckman. Água e sedimento foram coletados na região pelágica do reservatório; já as macrófitas foram coletados de um banco de macrófitas no Lago das Garças e transferidos diretamente para os mesocosmos, a fim de avaliar a influência do sedimento no retardamento do processo de fitorremediação por *E. crassipes*.

Figura 2. Fotografias das unidades experimentais: (a) os seis mesocosmos de 500 L cada posicionados próximos ao Lago das Garças; (b) tanque contendo sedimento durante a montagem; (c) tanque contendo água do lago e a macrófita aquática da espécie *Eichhornia crassipes*; (d) tanques cobertos com tela antimosquiteira



Foi realizado o monitoramento do sistema entre 15/02/2017 e 01/06/2017, totalizando 8 coletas. O pH e a condutividade elétrica foram monitorados *in situ* por meio de sonda multiparamétrica (Hanna, modelo HI 9829) em três pontos distintos na subsuperfície da água de cada tanque. Foram coletadas amostras de água (~300 mL) na subsuperfície com auxílio de frascos de polietileno. Procurou-se, ao máximo, evitar a movimentação da água, a fim de evitar a ressuspensão do sedimento, o que poderia interferir nos resultados. Em seguida, as amostras foram transportadas em caixa de isopor com gelo para posterior análise no laboratório. Em algumas das coletas foi realizada a retirada de alguns indivíduos de macrófitas a fim de manter apenas cerca de 50 a 60% da superfície colonizada, para evitar a limitação do desenvolvimento das plantas por espaço (BENASSI et al., 2018).

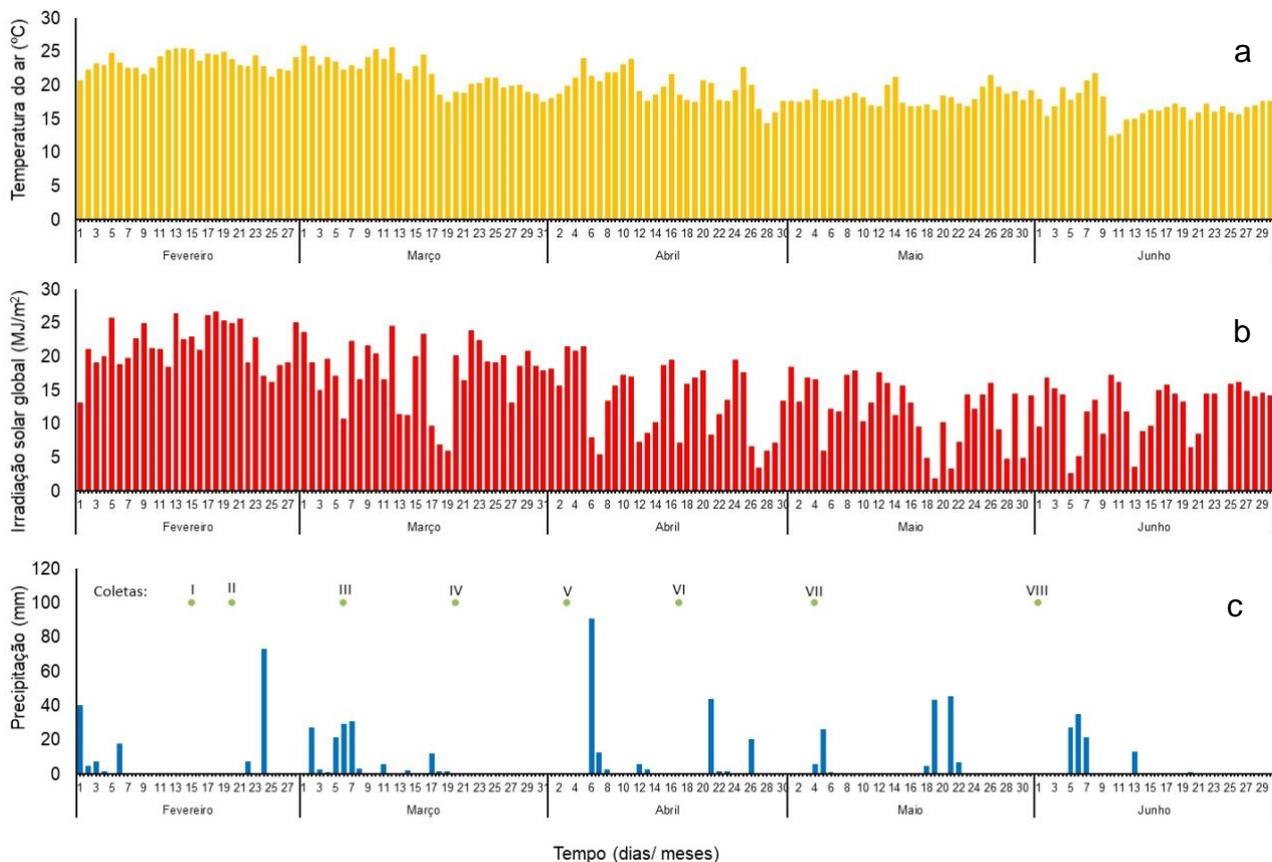
Outras determinações analíticas foram realizadas em laboratório: cor aparente, por meio de fotocolorímetro (Policontrol); turbidez, por meio de turbidímetro (Policontrol) e concentração do fósforo total (PT), por meio de digestão ácida com persulfato de potássio, seguida de determinação colorimétrica com ácido ascórbico e leitura em espectrofotômetro (HACH, modelo DR 5000), conforme APHA (2012). Dados climáticos (temperatura do ar, irradiação solar, umidade relativa do ar e precipitação) foram disponibilizados pela Estação

Meteorológica do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, situada cerca de 500 m do local de instalação das unidades experimentais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

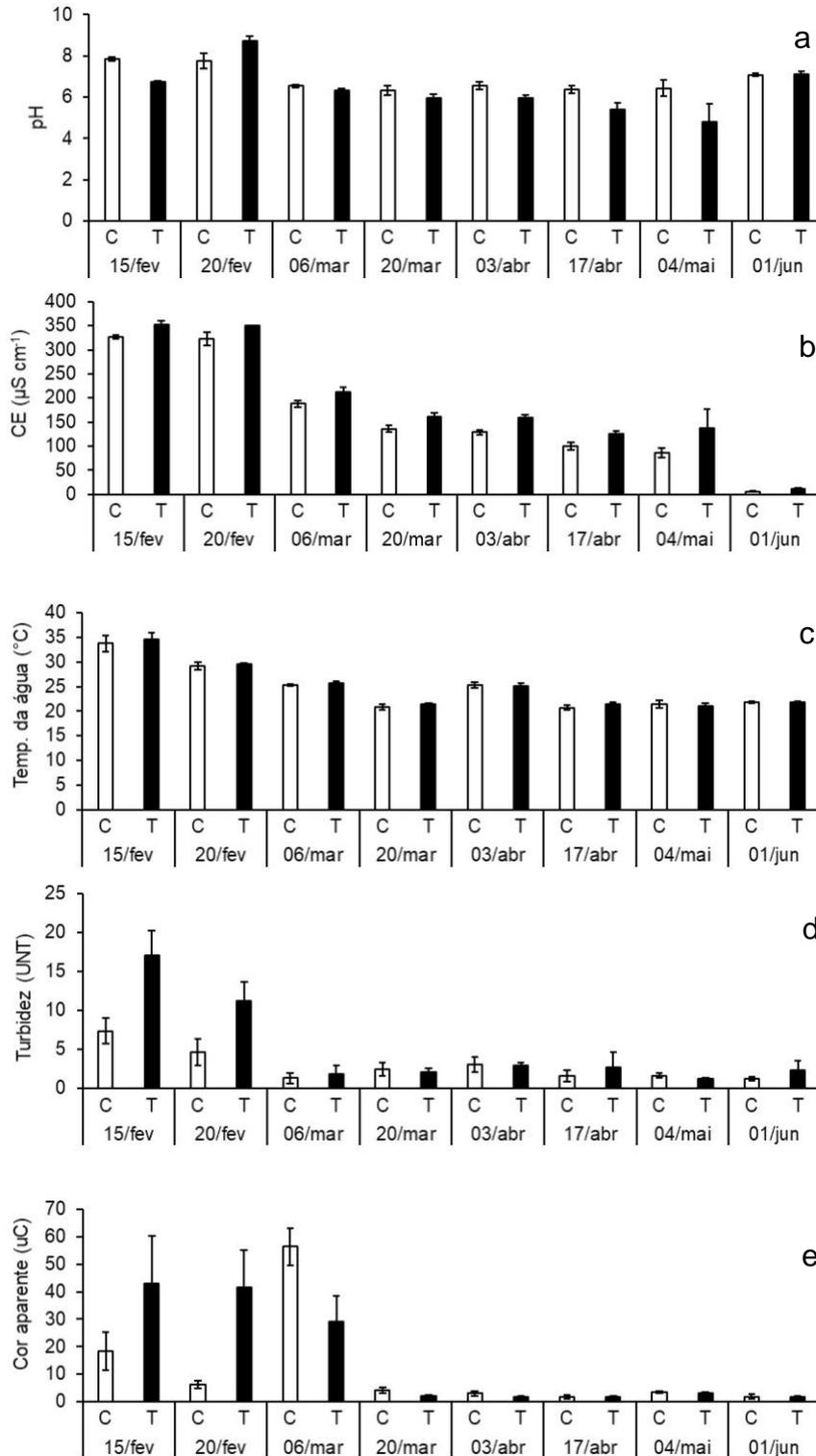
A temperatura do ar e a irradiação solar apresentaram tendência de declínio ao longo do período experimental (**Figuras 3a** e **3b**), o que era esperado, visto que o estudo foi iniciado no verão e foi finalizado no final do outono. Os picos de precipitação, durante o período do experimento, foram registrados no final de fevereiro e no início de abril (**Figura 3c**).

Figura 3. Variáveis climáticas ao longo do período experimental: (a) Temperatura do ar (°C); (b) Irradiação solar global (MJ m⁻²); (c) Precipitação (mm) e coletas (bolinhas verdes).



Os resultados das variáveis de qualidade de água são apresentados na **Figura 4**. O pH variou entre 4,8 a 8,7 ao longo do estudo (**Figura 4a**). Os valores mais elevados de pH foram registrados no início do experimento. Valores de pH elevados são típicos de ecossistemas aquáticos eutrofizados por conta da assimilação do CO₂ dissolvido na água pelas algas durante o processo de fotossíntese (BICUDO et al., 2007, TAILING, 2010; BRASIL et al., 2016). Isso altera o equilíbrio do sistema carbonato, o que diminui a produção de ácido carbônico e aumenta o pH do meio, o que pode causar a precipitação do fósforo (BAIRD, 2002). A partir da terceira coleta (06/03), os valores de pH ficaram sempre abaixo de 6,6, não sendo esperada a precipitação do fósforo.

Figura 4. Valores médios e desvio padrão das variáveis de qualidade de água nos mesocosmos sem sedimento (Controle, “C”) e com sedimento (Tratamento, “T”) ao longo do período de estudo: (a) pH; (b) condutividade elétrica, CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$); (c) temperatura da água; (d) turbidez (UNT); (e) cor aparente (uC)

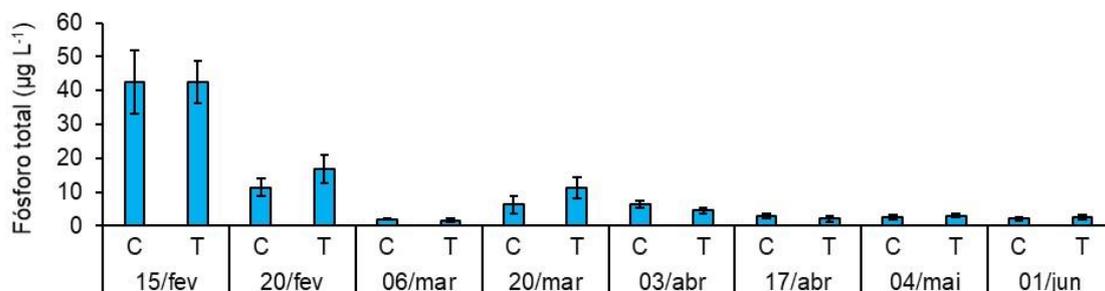


A condutividade elétrica (CE) apresentou tendência de diminuição ao longo do experimento (**Figura 4b**). Nas duas primeiras coletas, os valores de CE estavam acima de $300 \mu\text{S cm}^{-1}$, típicos de ambientes poluídos (COELHO et al., 2020). A partir da terceira coleta (06/03), os valores de CE apresentaram tendência de diminuição, chegando a $6,13 \mu\text{S cm}^{-1}$ na última coleta no tanque sem sedimento e $10,41 \mu\text{S cm}^{-1}$ no tanque com sedimento. Notou-se que os valores de CE foram sempre ligeiramente maiores nos tanques com sedimento, provavelmente por conta da liberação de íons dissolvidos do sedimento para a coluna d'água. Os eventos de chuva podem ter influenciado os resultados do estudo, podendo ter causado efeito de diluição, mas esta é uma limitação da técnica de mesocosmos. Entretanto, apesar das limitações, mesocosmos são extremamente úteis, visto que permitem estudar em menor escala e de forma mais controlada os processos que ocorrem nos ambientes aquáticos, bem como testar técnicas de remediação (AMARAL et al., 2020; HAKIP; GUPTA, 2020).

A temperatura da água (**Figura 4c**) seguiu a mesma tendência de diminuição observada para a temperatura do ar, em virtude da variação sazonal. Entretanto, o menor valor registrado foi de $20,7 \text{ }^\circ\text{C}$, que é um valor considerado adequado para o desenvolvimento da *E. crassipes* (DUKE, 1983). Em relação à turbidez, notou-se maiores valores nos tanques com sedimento nas coletas iniciais, havendo grande redução para ambos os sistemas ao longo das demais coletas, chegando a $1,18 \text{ UNT}$ (**Figura 4d**), o que demonstra a clarificação da água. Os maiores valores de turbidez nos tanques com sedimento no início do experimento podem representar uma fase de estabilização do experimento. Quanto à cor aparente notou-se tendência de diminuição ao longo do experimento, chegando a $1,6 \text{ uC}$; exceto na coleta III para o tanque Controle, onde foi registrado aumento desta variável (**Figura 4e**). A cor está associada à quantidade de substâncias dissolvidas na água, as quais podem apresentar características coloidais que a mudam (BÁRBARA; CUNHA; SIQUEIRA, 2010).

Os teores de fósforo total na coluna d'água apresentaram diminuição ao longo do período de observação, com pequeno aumento na coleta IV (20/03) para ambos os sistemas. Destaca-se que a partir da sexta coleta (17/04) as médias registradas ficaram abaixo de $3 \mu\text{g L}^{-1}$ de PT para ambos os sistemas (**Figura 5**), o que pode refletir a assimilação pela biota (microalgas e macrófitas), bem como sedimentação com o material particulado, já que se notou também diminuição da turbidez.

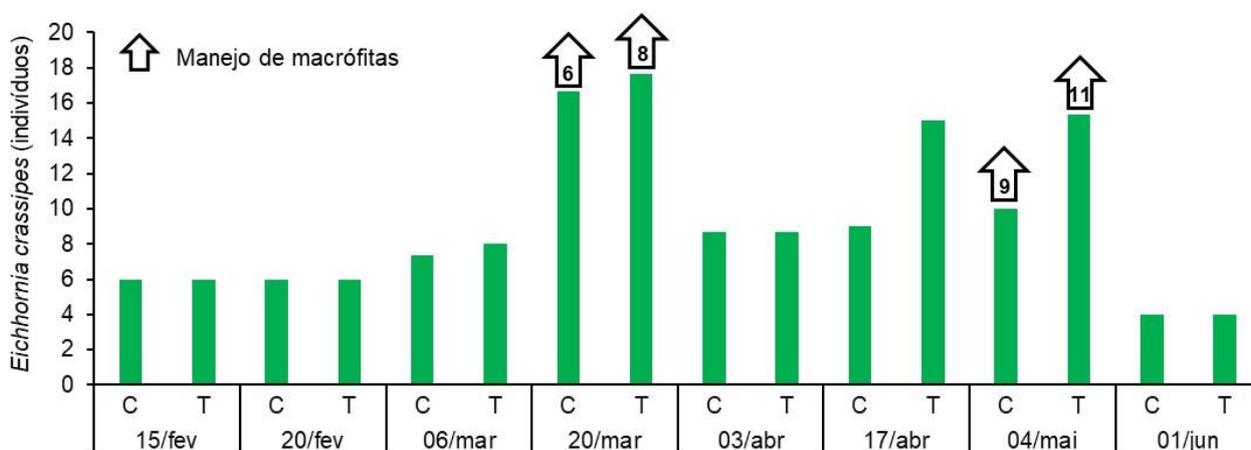
Figura 5. Valores médios e desvio padrão das concentrações de fósforo total ($\mu\text{g L}^{-1}$) nos mesocosmos sem sedimento (Controle, "C") e com sedimento (Tratamento, "T") ao longo do período de monitoramento



A **Figura 6** ilustra o desenvolvimento da biomassa de *E. crassipes* através do número de indivíduos e seu manejo ao longo do período experimental. Nota-se aumento do número

de indivíduos a partir da coleta III, com pico na coleta IV, onde foi realizado o primeiro manejo (remoção de indivíduos). Depois disso, os indivíduos tornaram a se proliferar, com registro de crescimento e aumento do número de indivíduos e novo pico na coleta VII, onde foi realizado o segundo manejo. Notou-se que o número de indivíduos de *E. crassipes* foi ligeiramente maior nos tanques com sedimento nas coletas VI e VII (1,5 - 1,7 vezes), sugerindo autofertilização por fósforo a partir do sedimento e incorporação na biomassa. De fato, na coleta IV (20/03), as concentrações de PT na água foram quase o dobro nos tanques com sedimento ($11,3 \mu\text{g L}^{-1}$ contra $6,2 \mu\text{g L}^{-1}$) e a CE foi sempre ligeiramente mais elevada nos tanques com sedimento.

Figura 6. Valores médios do número de indivíduos de *Eichhornia crassipes* nos mesocosmos sem sedimento (Controle, “C”) e com sedimento (Tratamento, “T”) ao longo do período de monitoramento. As setas para cima indicam o número de indivíduos removidos (manejo)



A temperatura do ar e a irradiação solar elevadas favorecem o desenvolvimento da espécie *E. crassipes* (BEYRUTH, 1992) e isto se deve ao aumento da atividade metabólica dos organismos aquáticos (YOSHIDA, 1996). De fato, a faixa de temperatura ótima para o desenvolvimento desta espécie é de 25 °C a 31 °C (PEDRALLI, 1996). No presente estudo, apesar das variações de temperatura e irradiação solar, notou-se desenvolvimento satisfatório das plantas, com aumento do número de indivíduos (**Figura 6**). Desempenho semelhante foi observado por Gentelinni et al. (2012), onde as temperaturas variaram entre 18,4 °C e 19,1 °C e isso não afetou acentuadamente o desenvolvimento dos indivíduos de *E. crassipes*, embora o crescimento máximo não tenha sido alcançado.

Em relação ao pH, como nas coletas iniciais existia maior disponibilidade de nutrientes, o efeito predominante foi o de alcalinização das águas, justificados pela assimilação do dióxido de carbono dissolvido na água pelas algas e macrófitas aquáticas durante a fotossíntese (BICUDO et al., 2007) e alteração do equilíbrio do sistema carbonato (BAIRD, 2002).

A diminuição dos valores de condutividade elétrica pode estar associada à absorção de íons presentes pelos indivíduos de *E. crassipes*, visto que esta variável representa a concentração de íons dissolvidos (ESTEVES, 1998). Isso é corroborado pela diminuição da concentração de fósforo total nos sistemas ao longo do experimento (**Figura 5**). De fato, Coelho et al. (2020) encontraram correlações positivas significativas entre as concentrações de fósforo total e a condutividade elétrica para águas de manancial

eutrofizado (Reservatório Rio Grande, São Paulo). Além disso, a precipitação pode ter afetado a condutividade elétrica, já que a maior entrada de água pode acarretar a diminuição proporcional dos íons dissolvidos, o que caracteriza um efeito de diluição como registrou Pompêo et al. (1996) ao avaliar o efeito da macrófita *Echinochloa polystachia* na Represa de Jurumirim – SP.

A diminuição da turbidez nos tanques está associada ao grande desenvolvimento das raízes das macrófitas ao longo do estudo, as quais adsorveram o material particulado em suspensão (HENRY-SILVA; CAMARGO, 2008). Outros fatores que justificam a diminuição da turbidez é a ausência ou a ocorrência mínima de ressuspensão.

Talvez se o experimento tivesse sido continuado, os tanques com sedimento poderiam ter se mantido produtivos. Como sugestões para futuros trabalhos recomenda-se monitorar o sistema por maior período, bem como avaliar a produção de perifíton sobre o sedimento (epipelon), que tem sido apontado como importante fator na manutenção das baixas concentrações de fósforo na água (CANO; CASCO; CLAPS, 2016; ZHAO et al., 2019; YI et al., 2019) e monitorar os índices de oxigênio dissolvido, visto que os índices de oxigenação nos tanques podem ser responsáveis pela retenção do fósforo no sedimento ou sua liberação para a coluna d'água, conforme reportado em estudos recentes (HORPILLA, 2019; LIU et al., 2020).

CONCLUSÕES

Notou-se diminuição expressiva das concentrações de fósforo total em ambos os mesocosmos avaliados (presença e ausência de sedimento), o que pode ser atribuído à remoção pelas macrófitas (fitorremediação), assimilação por microalgas e sedimentação com o material particulado. No entanto, notou-se maior número de indivíduos de *E. crassipes* nos tanques com sedimento (chegando a 1,7 vezes), o que sugere a influência do sedimento na autofertilização dos tanques com fósforo, o que poderia retardar um esforço de recuperação do ambiente aquático eutrofizado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPESP (Processo n.º 2016/137660) pela bolsa de iniciação científica concedida à aluna B.S.F.; à Profa. Dra. Denise de Campos Bicudo do Instituto de Botânica de São Paulo da Secretaria de Meio Ambiente pela infraestrutura de campo; ao Laboratório de Análises Ambientais da UFABC pelo uso de sua infraestrutura para as análises laboratoriais; e à Estação Meteorológica do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo pelos dados climatológicos; e aos colegas que ajudaram nas atividades de campo.

REFERÊNCIAS

AMARAL, L. M.; CASTILHO, M. C. A.; HENRY, R.; FERRAGUT, C. Epipelon, phytoplankton and zooplankton responses to the experimental oligotrophication in a eutrophic shallow reservoir. **Environmental Pollution**, v. 263, Parte A, 114603, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114603>.

APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington: American Public Health Association; 1360 p., 2012.

BAIRD, C. **Química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. 607 p.

BALDOVI, A. A.; AGUIAR, A. R. B.; BENASSI, R. F.; VYMAZAL, J.; JESUS, T. A. Phosphorus removal in a pilot scale free water surface constructed wetland: hydraulic retention time, seasonality and standing stock evaluation. **Chemosphere**, v. 266, n. 128939, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128939>.

BÁRBARA, V. F.; CUNHA, A. C.; SIQUEIRA, E. Q. Monitoramento sazonal da qualidade da água do rio Araguari/AP. **Revista de Biociências**, v. 16, n. 1, p. 57-72, 2010.

BEAULIEU, J. J.; DEL SONTRO, T.; DOWNING, J. A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. **Nature Communications**, v. 10, p. 3-7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5>.

BENASSI, R. F.; MATHEUS, D. R.; SUBTIL, E. L.; COELHO, L. H. G.; OLIVEIRA, L. H. S.; MORETTO, M. R. *et al.* **Manual de sistemas de wetlands construídas para o tratamento de esgotos sanitários**. Santo André: Editora Copiart, 2018. 55 p.

BENASSI, R. F.; JESUS, T. A.; COELHO, L. H. G.; HANISCH, W. S.; DOMINGUES, M. R.; TANIWAKI, R. H. *et al.* Eutrophication effects on CH₄ and CO₂ fluxes in a highly urbanized tropical reservoir (Southeast, Brazil). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 42261-42274, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13573-7>.

BEYRUTH, Z. Macrófitas aquáticas de um lago marginal ao rio Embu-Mirim, São Paulo, Brasil. **Revista de Saúde Pública**, v. 26, n. 4, p. 272-282, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-89101992000400010>.

BICUDO, D. C.; FONSECA, B. M.; BINI, L. M.; CROSSETTI, L. O.; BICUDO, C. E. M.; JESUS, T. A. Undesirable side-effects of water hyacinth control in a shallow tropical reservoir. **Freshwater Biology**, v. 52, p.1120-1133, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01738.x>.

BRASIL, J.; ATTAYDE, J. L.; VASCONCELOS, F. R.; DANTAS, D. D. F.; HUSZAR, V. L. M. Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. **Hydrobiologia**, v. 770, p. 145–164, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2578-5>.

CANO, M. G.; CASCO, M. A.; CLAPS, M. C. Epipelon dynamics in a shallow lake through a turbid-and a clear-water regime. **Journal of Limnology**, v. 75, n. 2, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1340>.

CHEN, Z; ZHAO, D; LI, M; TU, W; XIAOMING, LIU, X. A field study on the effects of combined biomanipulation on the water quality of a eutrophic lake. **Environmental Pollution**, v. 265, p. 1-25, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115091>.

COELHO, J. C. **Macrófitas aquáticas flutuantes na remoção de elementos químicos de água residuária**. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e drenagem) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, 2017. 76 p.

COELHO, L. H. G.; JESUS, T. A.; KOHATSU, M. Y.; POCCIA, G. T.; CHICAROLLI, V.; HELWIG, K. *et al.* Estrogenic hormones in São Paulo waters (Brazil) and their relationship with environmental variables and *Sinapis alba* phytotoxicity. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 231, n. 150, p. 1-19, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04477-2>.

CONTI, J. B.; FURLAN, S. A. Geoeologia: o clima, os solos e a biota. In: ROSS, J. L. (ed.). **Geografia do Brasil**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. p. 67-207.

COSTA-BÖDDEKER, S. V.; BENNION, H.; JESUS, T. A.; ALBUQUERQUE, A. L. S.; FIGUEIRA, R. C. L.; BICUDO, D. C. Paleolimnologically inferred eutrophication of a shallow, tropical, urban reservoir in southeast Brazil. **Journal of Paleolimnology**, v. 48, 751-766, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10933-012-9642-1>.

DUKE, J. A. **Handbook of Energy Crops**. 1983. Disponível em: https://hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/dukeindex.html. Acesso em: 02 set. 2020.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: FINEP/Interciência, 1998, 575 p.

GUO, Y; LIU, Y; ZENG, G; HU, X; LI, X; HUANG, D. *et al.* A restoration-promoting integrated floating bed and its experimental performance in eutrophication remediation. **Journal of Environmental Sciences**, v. 26, p. 1090-1098, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60500-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60500-8).

HAOPIK, N.; GUPTA, A. Phytoremediation of chromium and manganese by *Ipomoea aquatica* Forssk. from aqueous medium containing chromium-manganese mixtures in microcosms and mesocosms. **Water and Environment Journal**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/wej.12676>.

HENRY-SILVA, G. G; CAMARGO, A. F. M. Tratamento de efluentes de cunicultura por macrófitas aquáticas flutuantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 2, p. 181-188, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008000200002>.

HORPILLA, J. Sediment nutrients, ecological status, and restoration of lakes. **Water research**, v. 160, p. 206-208, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.074>.

HUISMAN, J; CODD, G. A; PAERL, H. W; IBELINGS, B. W; VERSPAGEN, J. M. H; VISSER, P. M. Cyanobacterial blooms. **Nature Reviews Microbiology**, v. 16, p. 471-483, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1>.

JENNY, J. P.; ANNEVILLE, O.; ARNAUD, F.; BAULAZ, Y; BOUFFARD, D.; DOMAIZON, I. *et al.* Scientists' Warning to Humanity: Rapid degradation of the world's large lakes.

Journal of Great Lakes Research, v. 46, n. 4, p. 686-702, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.05.006>.

JIANBO, L.; ZHIHUI, F.; ZHAOZENG, Y. Performance of a water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) system in the treatment of wastewater from a duck farm and the effects of using water hyacinth as a duck feed. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, p. 513-519, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(08\)62088-4](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(08)62088-4).

LIU, Z.; ZHANG, Y.; YAN, P.; LUO, J.; KONG, L.; CHANG, J. *et al.* Synergistic control of internal phosphorus loading from eutrophic lake sediment using MMF coupled with submerged macrophytes. **Science of the Total Environment**, v. 731, p. 1-13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138697>.

PEDRALLI, G. Aguapé: biologia, manejo e uso sustentado. **Estudos de Biologia**, v. 4, n. 40, p. 33- 53, 1996.

PISTORI, R. E. T. **Crescimento das macrófitas aquáticas flutuantes *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, *Pistia stratiotes* L. e *Salvinia molesta* (Mitchell) em diferentes concentrações de nutrientes**. Tese (Doutorado em Aquicultura) – Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura, Jaboticabal, SP, 2009. 79 p.

POMPÊO, M. L. M.; HENRY, R.; MOSHINI-CARLOS, V. Chemical composition of tropical macrophyte *Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchcock in Jurumirim Reservoir (São Paulo, Brazil). **Hydrobiologia**, v. 411, p. 1-11, 1996.

SCHINDLER, D. W. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. **Proceedings of the royal society**, v. 279, p. 4322-4333, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1032>.

SCHINDLER, D. W.; HECKY, R. E.; FINDLAY, D. L.; STANTON, M. P.; PARKER, B. R.; PATERSON, M. J. *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37 year whole-ecosystem experiment. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 105, n. 32, p. 11254-11258, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0805108105>.

SØNDERGAARD, M.; BJERRING, R.; JEPPESEN, E. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes. **Hydrobiologia**, v. 710, n. 1, p. 95-107, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1091-3>.

SU, F.; LI, Z.; LI, Y.; XU, L.; LI, Y.; LI, S. *et al.* Removal of Total Nitrogen Using Single or Combinations of Aquatic Plants. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 4663, p. 1-12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16234663>.

SUNG, K.; LEE, G. J.; MUNSTER, C. Effects of *Eichhornia crassipes* and *Ceratophyllum demersum* Soil and Water Environments and Nutrient Removal in Wetland Microcosms. **International Journal of Phytoremediation**, v. 17, n. 10, p. 936–944, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.1003791>.

TAILING, J. F. pH, the CO₂ system and freshwater science. **Freshwater Reviews**, v. 3, p. 133-146, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1608/FRJ-3.2.156>.

TRINDADE, P. B. C. B.; MENDONÇA, A. S. F. Eutrofização em reservatórios – Estudo de caso: reservatório em Rio Bonito (ES). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 275-282, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000000537>.

TU, L.; JAROSCH, K. A.; SCHNEIDER, T.; GROSJEAN, M. Phosphorus fractions in sediments and their relevance for historical lake eutrophication in the Ponte Tresa basin (Lake Lugano, Switzerland) since 1959. **The Science of the Total Environment**, v. 685, p. 806-817, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.243>.

UNESCO. Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. **The United Nations world water development report 2018: Nature-Based Solutions for Water**. 2018. 139 p.

VINHA, D.; ALVES, L. F.; ZAIDAN, L. B. P.; GROMBONE-GUARATINI, M. T. The potential of the soil seed bank for the regeneration of a tropical urban forest dominated by bamboo. **Landscape and urban planning**, v. 99, p. 178-185, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.11.003>.

YI, Z.; YANG, Y.; YAN, C.; PEI, G. The influence of periphyton biofilm on phosphorus migration in sediments. **International Journal of Environmental Research**, v. 13, n. 2, p. 327-335, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41742-019-00182-z>.

YOSHIDA, C. E. **A dinâmica dos fatores físico-químicos em três tanques de piscicultura com renovação contínua, sem renovação da água e aeração artificial**. Dissertação (Mestrado em Aquicultura) - Universidade Estadual Paulista, Centro de Aquicultura, Jaboticabal, SP, 1996. 92 p.

WANG, J.; FU, G.; LI, W.; SHI, Y.; PANG, J.; WANG, Q. *et al.* The effects of two free-floating plants (*Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*) on the burrow morphology and water quality characteristics of pond loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) habitat. **Aquaculture and Fisheries**, v. 11, n. 3, p. 22-29, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2017.12.001>.

ZHAO, Y.; CHEN, X.; XIONG, X.; WU, C. Capture and release of phosphorus by periphyton in closed water systems influenced by illumination and temperature. **Water**, v. 11, n. 5, p. 1021- 1031, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11051021>.

Recebido em: 01/09/2020

Aprovado em: 25/08/2021