

INFLUÊNCIA DO PH NO DESEMPENHO DA TÉCNICA DE MITIGAÇÃO A EUTROFIZAÇÃO *FLOC AND SINK*

Amanda Myrna de Meneses e Costa¹, Daniely de Lucena Silva²; Juliana dos Santos Severiano¹, José Etham de Lucena Barbosa¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Universidade Estadual da Paraíba. Rua Baraúnas, nº. 351, Campina Grande, Paraíba, CEP: 58.429-500; ² Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais e Biotecnologia da Universidade Federal de Campina Grande. Sítio Olho D'Água da Bica, Cuité – PB, CEP: 58.175-000.

1) Introdução

O aumento das concentrações de fósforo (P) e nitrogênio (N), impulsionado por atividades antrópicas, estabeleceu a eutrofização como uma das principais preocupações ambientais globais (Hwang, 2020). Ambientes eutróficos promovem a proliferação de florações de cianobactérias, produtoras de toxinas prejudiciais à saúde humana e à biota aquática (Igwaran *et al.*, 2024). Em regiões semiáridas, onde a gestão hídrica é crítica, o controle da carga interna de nutrientes, especialmente o P liberado dos sedimentos, torna-se essencial nas estratégias de restauração (Júnior *et al.*, 2024).

Para mitigar os efeitos da eutrofização, a técnica de geoengenharia *Floc and Sink* tem sido amplamente adotada. Essa abordagem utiliza coagulantes, como o Cloreto de Polialumínio (PAC), combinados com lastros, como a Bentonita Modificada com Lantânio (BML), para promover a floculação e sedimentação de fósforo e biomassa algal, reduzindo sua concentração na coluna d'água (Lucena-Silva *et al.*, 2022; Miranda *et al.*, 2017). A eficácia dessa técnica reside no controle do P, o nutriente limitante para o crescimento de florações na maioria dos casos (Tay *et al.*, 2022).

No entanto, a eficiência da técnica *Floc and Sink* é influenciada pelas características físicas e químicas da água. Entre esses fatores, o pH desempenha um papel crucial, pois a coagulação e adsorção dos materiais utilizados é altamente sensível a variações desse parâmetro. O PAC, embora seja um coagulante pré-hidrolisado que geralmente mantém o pH estável, tem sua eficácia comprometida em condições de pH alcalino, que podem interferir negativamente na formação e densidade dos flocos, reduzindo a remoção de nutrientes e biomassa (Li *et al.*, 2024). Similarmente, o pH alcalino pode prejudicar a capacidade de adsorção de fósforo pela BML, favorecendo a liberação do lantânio e diminuindo a eficiência global do processo (Reitzel *et al.*, 2017).

Apesar da reconhecida sensibilidade dos materiais utilizados na técnica *Floc and Sink* ao pH, são escassos os estudos que avaliam de forma específica e sistemática como de características das águas eutrofizadas, como por exemplo o pH, podem impactar a eficiência de remoção de PT e clorofila-a.

2) Objetivo Geral e Específicos

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar como o pH influencia a eficiência de remoção de PT e clorofila-a da técnica *Floc and Sink*.

Os objetivos específicos são:

- (i) Determinar a eficiência de remoção de PT e clorofila-a pela técnica *Floc and Sink*, considerando variações nas dosagens de PAC e BML em águas de cinco reservatórios eutrofizados do semiárido;
- (ii) Estabelecer a faixa crítica de pH que compromete a eficácia dos materiais PAC e BML, visando determinar o valor limite desse parâmetro para a obtenção de resultados satisfatórios na remoção de PT e clorofila-a.

3) Metodologia

O presente estudo foi dividido em quatro etapas, sendo descritas a seguir:

- **Etapa 1 – Amostragem e caracterização das águas dos reservatórios:** nessa etapa foram coletadas amostras de água de reservatórios para realização dos ensaios *Floc and Sink*;
- **Etapa 2 – Ensaios de floculação-sedimentação:** foram realizados os experimentos a nível de bancada a fim de avaliar as eficiências de remoção de fósforo e clorofila-a;
- **Etapa 3 – Análises estatísticas e influência do pH dos reservatórios:** a partir dos dados obtidos nas etapas anteriores, foram avaliadas as diferenças entre os tratamentos e o efeito do pH dos reservatórios sobre as remoções de PT e clorofila-a.
- **Etapa 4:** Amostragem e caracterização das águas dos reservatórios

Foram coletadas amostras de água em quatro reservatórios para realização dos ensaios de floculação-sedimentação. Os reservatórios estão localizados na bacia hidrográfica do rio Paraíba, no estado da Paraíba, Brasil (Figura 1). Como o reservatório

Argemiro de Figueiredo (Acauã) possui braços com características distintas localizados nas cidades de Aroeiras e Itatuba, foi possível estabelecer dois pontos de amostragem, totalizando cinco pontos de coleta. Ainda foi medido *in loco* o pH de cada ponto amostral com auxílio da sonda multiparamétrica HORIBA® U-50.

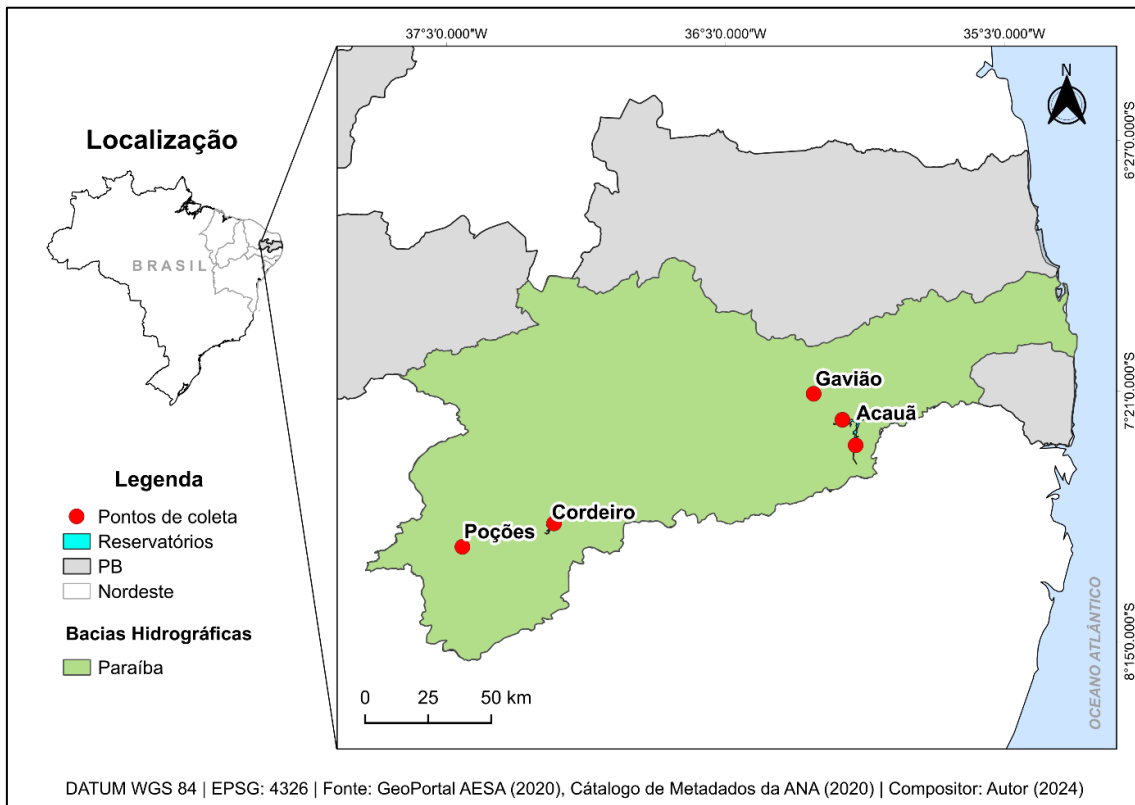


Figura 1 – Localização dos pontos de coleta.

Para a realização dos ensaios de floculação-sedimentação a nível de bancada, amostras de água foram coletadas com auxílio de balde, filtradas em rede de plâncton (68µm), a fim de evitar interferências de microrganismos maiores presentes na água bruta, como predação e competição por nutrientes, armazenadas em bombonas (20 L) e transportadas ao laboratório à temperatura ambiente e sem exposição a luz.

- Etapa 2: Ensaio de floculação-sedimentação

O PAC foi padronizado a uma concentração de 1000 mg Al L⁻¹, mantendo-se armazenado em frasco de vidro âmbar à temperatura ambiente. A BML foi obtida na

HydroScience, localizada no Rio Grande do Sul/BR e mantida em condições adequadas para sua aplicação.

Os ensaios foram conduzidos utilizando como unidades experimentais provetas de vidro (250 mL), onde os seguintes tratamentos foram testados em triplicata: o coagulante cloreto de polialumínio (PAC) combinado com a bentonita modificada com lantânio (BML), além de um controle, sem a adição de materiais (Controle; PAC+BML) (Figura 2), resultando em um n total de 36 unidades amostrais. As faixas de dosagens testadas para o PAC (4, 8 e 16 mg Al L⁻¹), e para a BML (25, 50 e 100 mg L⁻¹) foram escolhidas com base na literatura (Lucena-Silva *et al.*, 2019; Miranda *et al.*, 2017).

Alíquotas de 250 mL de água dos reservatórios foram transferidas para as unidades experimentais, e posteriormente os tratamentos foram adicionados. O conteúdo foi misturado com bastões de vidro por um minuto e mantido em repouso sob condições ambientes. Após duas horas, foram coletadas amostras de água (120 mL) da parte superior das provetas para posterior análise de fósforo total (PT) e clorofila-a. As análises de fósforo total foram realizadas seguindo os métodos preconizados pelo *Standard Methods Apha* (2023). Para quantificação de clorofila-a foi utilizado um analisador de fitoplâncton PHYTO-PAM (Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Alemanha).

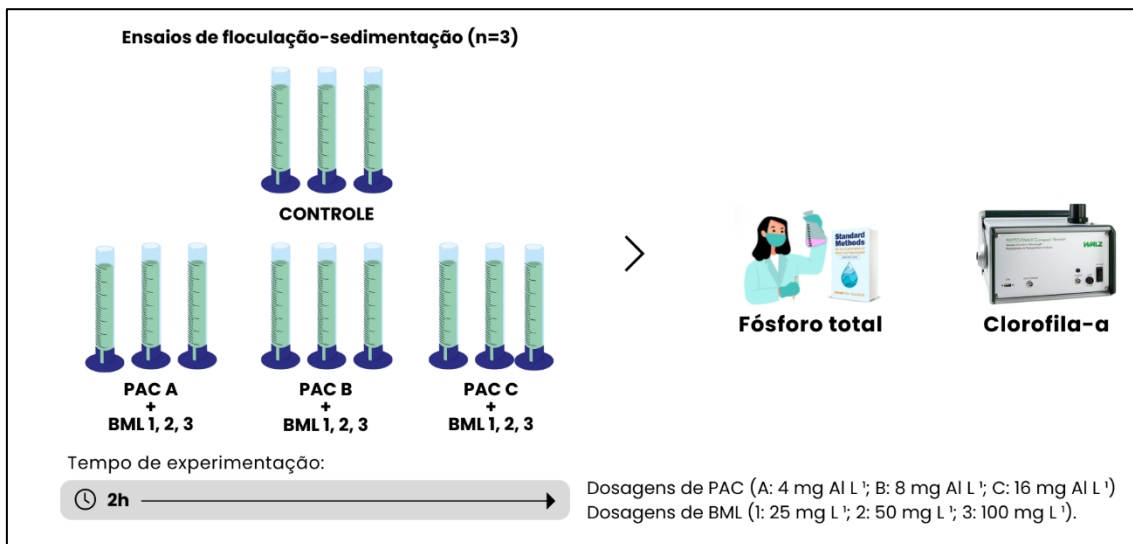


Figura 2 – Esquema experimental da etapa 2: Ensaios de coagulação-floculação.

- Etapa 3: Análises estatísticas e influência do pH dos reservatórios

Para avaliar se houve diferença significativa entre os tratamentos e reservatórios, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de duas vias. A normalidade e a homocedasticidade foram avaliadas usando os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Quando os dados se configuraram como não paramétricos, foram utilizados o Teste de Kruskal-Wallis.

A influência do pH sobre as remoções de PT e clorofila-a foi avaliada através de modelos segmentados capazes de identificar os valores que provocaram mudanças no padrão das respostas avaliadas. Para isso, utilizou-se a função “*segmented*” do pacote de mesmo nome. Todas as análises foram realizadas utilizando o programa R Software para Windows (R Core Team, 2018).

4) Resultados e Discussões

Os resultados obtidos nos ensaios de floculação-sedimentação demonstraram uma variabilidade nas eficiências de remoção de PT e clorofila-a. De modo geral, o reservatório Poções foi aquele que apresentou menores valores para remoção do fósforo (Figura 3), obtendo resultados acima de 60% apenas com a dosagem mais baixa dos materiais (PAC 4 mg Al L⁻¹ e BML 25 mg L⁻¹). Embora o reservatório Acauã (Itatuba) também tenha obtido remoção inferior a 40% na dosagem específica de PAC+BML B3 (8mg Al L⁻¹; 100 mg L⁻¹, respectivamente), os demais reservatórios alcançaram eficiências superiores a 50% em quaisquer dosagens testadas.

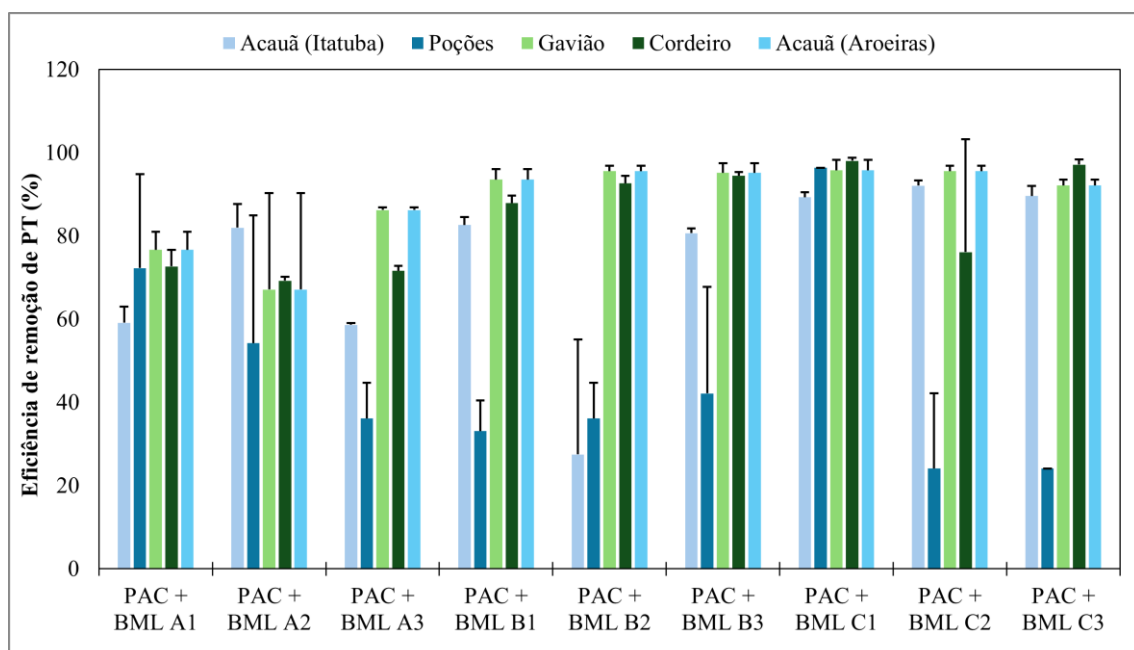


Figura 3 – Eficiências de remoção de PT. Legenda: Dosagens de PAC (A: 4 mg Al L⁻¹; B: 8 mg Al L⁻¹; C: 16 mg Al L⁻¹) e BML (1: 25 mg L⁻¹; 2: 50 mg L⁻¹; 3: 100 mg L⁻¹).

Por outro lado, o reservatório que obteve melhor remoção de clorofila-a na maioria das dosagens foi Poções (Figura 4), indicando que, caso o objetivo seja apenas redução da biomassa algal na coluna d'água, a técnica é eficaz, apesar de não realizar o controle do fósforo nessa água.

Ainda observando a Figura 4, percebe-se a tendência de que dosagens mais altas dos materiais promovem maiores remoções, sendo o valor máximo obtido durante o experimento realizado com água do reservatório Gavião, apresentando remoções de clorofila-a superiores a 95% na combinação PAC+BML C3 (PAC 16 mg Al L⁻¹; e BML 100 mg L⁻¹).

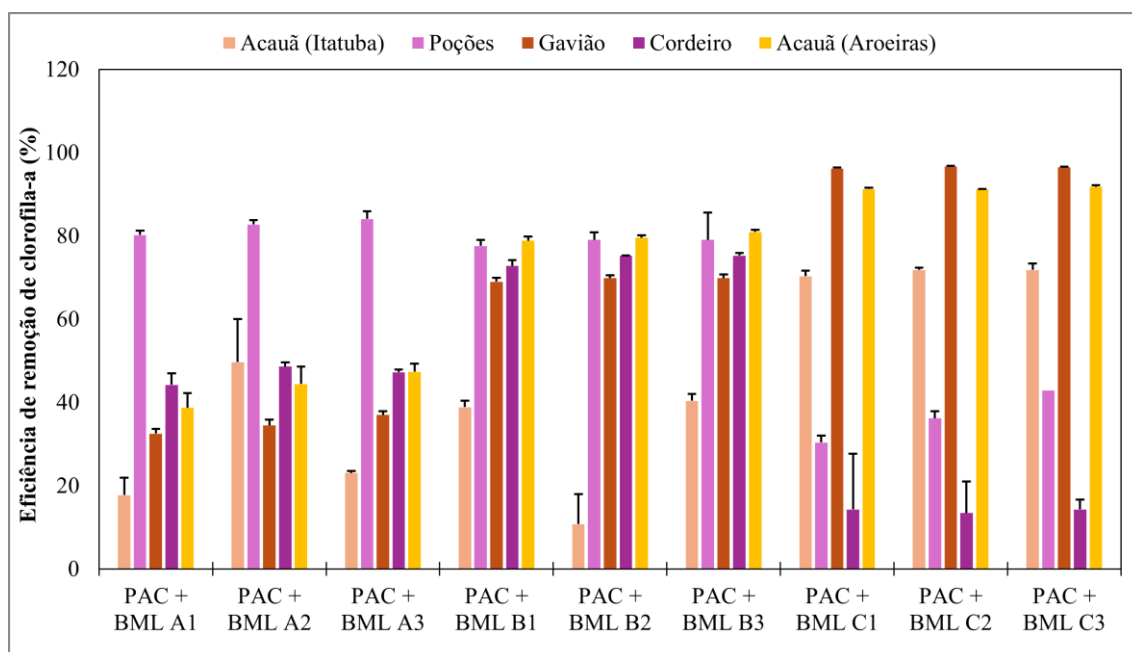


Figura 4 – Eficiências de remoção de clorofila-a. Legenda: Dosagens de PAC (A: 4 mg Al L⁻¹; B: 8 mg Al L⁻¹; C: 16 mg Al L⁻¹) e BML (1: 25 mg L⁻¹; 2: 50 mg L⁻¹; 3: 100 mg L⁻¹).

Corroborando com os resultados obtidos, a ANOVA de duas vias evidenciou que houve diferença significativa entre os reservatórios e a interação destes com os tratamentos para remoção de PT (Tabela 1). Já para remoção clorofila-a, tanto os reservatórios, quanto os tratamentos e sua interação foram significativos (Tabela 1). O que evidencia que, a depender das características do reservatório e das dosagens utilizadas, as remoções podem ser influenciadas.

Fatores	Eficiência de remoção (%)
---------	---------------------------

	PT		Clorofila-a	
	F	p	F	p
Reservatório	51,52	<0,001	257,77	<0,001
Tratamento	1,81	N.S.	66,55	<0,001
Reservatório x Tratamento	2,99	<0,001	104,86	<0,001

Tabela 1 – Resultados de ANOVA de duas vias testando a eficiência de coagulante e argila na remoção de fósforo total (PT) e clorofila-a. Legenda: N.S. = não significativo.

Portanto, considerando as características físicas e químicas das águas avaliadas, o pH demonstrou impactar as eficiências de remoções. Percebeu-se que valores de pH acima de 7,1 favoreceram as eficiências de remoção de PT na utilização do PAC+BML.

Contudo, ao atingir valores superiores a 7,3, a eficiência de remoção de clorofila-a foi prejudicada (Figura 5), corroborando com o encontrado por Drummond *et al.* (2022) ao analisarem a eficiência da técnica *Floc and Sink* na remoção de florações de cianobactérias, uma vez que eles concluíram que o aumento do pH influenciou negativamente o desempenho de todos os tratamentos testados, incluindo a combinação de PAC+BML, atribuindo isso à existência de uma faixa ótima de pH para coagulação eficiente de cada coagulante.

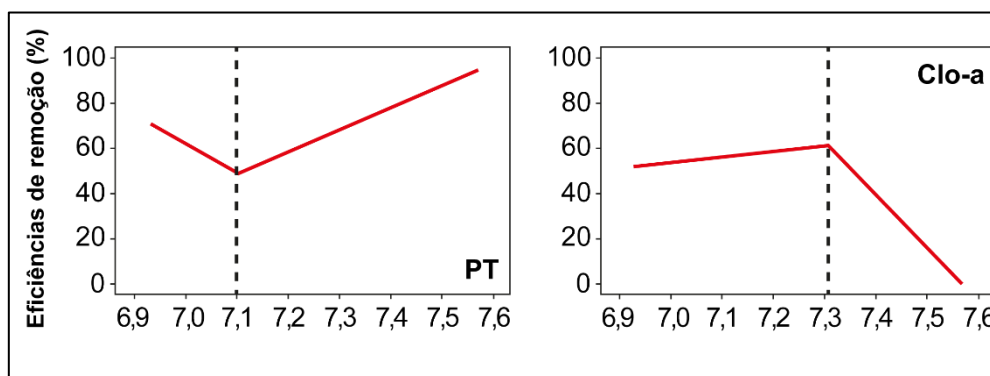


Figura 3 – Efeito do pH sobre as eficiências de remoção de PT clorofila-a (Clo-a) com as aplicações de PAC+BML.

5) Referências

APHA (American Public Health Association), 2023. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21 Ed. Washington, DC, 1200 p.

DRUMMOND, E.; LEITE, V. B. G.; NOYMA, N. P.; MAGALHÃES, L.; GRACORROZA, C.; HUSZAR, V. L.; LÜRLING, M.; MARINHO, M. M. Temporal and spatial variation in the efficiency of a *Floc & Sink* technique for controlling cyanobacterial blooms in a tropical reservoir. *Harmful Algae*, v. 117, 2022. DOI: 10.1016/j.hal.2022.102262.

HWANG, S.-J. Eutrophication and the Ecological Health Risk. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, v. 17, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17176332.

IGWARAN, A.; KAYODE, A. J.; MOLOANTOA, K. M.; KHETSHA, Z. P.; UNUOFIN, J. O. Cyanobacteria harmful algae blooms: causes, impacts, and risk management. **Water Air Soil Pollut**, v. 235, n. 71, 2024. DOI: 10.1007/s11270-023-06782-y.

LI, R.; QI, X.; WANG, W.; CHENG, M.; WANG, Y.; ZHANG, P.; SONG, G. Flocculation Kinetics in Dual-coagulation for the Treatment of High-concentration Surfactant-kaolin Wastewater. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 32, p. 1706–1716, 2024. DOI: 10.1007/s10924-023-03079-3.

LUCENA-SILVA, D.; MOLOZZI, J.; SEVERIANO, J. S.; BECKER, V.; BARBOSA, J. E. L. Removal efficiency of phosphorus, cyanobacteria and cyanotoxins by the “flock & sink” mitigation technique in semi-arid eutrophic waters. **Water research**, v. 159, p. 262-273, 2019. DOI: 10.1016/j.watres.2019.04.057.

LUCENA-SILVA, D.; SEVERIANO, J. S.; SILVA, R. D. S.; BECKER, V.; BARBOSA, J. E. L.; MOLOZZI, J. Impacts of the Flocculation and Sink technique on the phytoplankton community: A morpho-functional approach in eutrophic reservoir water. **Journal of Environmental Management**, v. 308, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114626.

MIRANDA, M.; NOYMA, N.; PACHECO, F. S.; MAGALHÃES, L.; PINTO, E.; SANTOS, S.; SOARES, M. F. A.; HUSZAR, V. L.; LÜRLING, M.; MARINHO, M. M. The efficiency of combined coagulant and ballast to remove harmful cyanobacterial blooms in a tropical shallow system. **Harmful Algae**, v. 65, pp. 27-39, 2017. DOI: 10.1016/j.hal.2017.04.007.

REITZEL, K.; BALSLEV, K. A.; JENSEN, H. S. The influence of lake water alkalinity and humic substances on particle dispersion and lanthanum desorption from a lanthanum modified bentonite. **Water Research**, v. 125, p. 191-200, 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2017.08.044.

TAY, C. J.; MOHD, M. H.; TEH, S. Y.; KOH, H. L. Internal phosphorus recycling promotes rich and complex dynamics in an algae-phosphorus model: Implications for eutrophication management. **Journal of Theoretical Biology**, v. 532, 2022. DOI: 10.1016/j.jtbi.2021.110913.