FITORREMEDIAÇÃO DE AZUL DE METILENO POR *RICCIOCARPUS NATANS*: EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO DO CORANTE E DO NÚMERO DE PLANTAS

PHYTOREMEDIATION OF METHYLENE BLUE BY RICCIOCARPUS NATANS: EFFECTS OF DYE CONCENTRATION AND NUMBER OF PLANTS

Antonio Cesar Blois de Souza Junior[1]
Morgana Zinelli Garcia Silva[2]
Larry Ojeda Venturini[3]
Caroline Alvares Roehrs[4]
Rafael Roehrs[5]

Resumo: Corantes sintéticos como o azul de metileno (AM) são tóxicos e persistentes em ambientes aquáticos, o que exige alternativas de tratamento de baixo custo. Este estudo avaliou a remoção de AM por *Ricciocarpos natans* em soluções aquosas, testando o efeito da concentração inicial do corante (10 e 40 mg/L) e do número de plantas (cinco ou dez) por unidade experimental. Os ensaios foram realizados em triplicata, sob iluminação (LEDs azuis e vermelhos) e temperatura controladas, e a concentração remanescente foi acompanhada por espectrofotometria a 660 nm. O controle contendo apenas o corante manteve a absorbância inalterada, indicando que a descoloração decorreu da presença da macrófita. Com 10 mg/L e cinco plantas, a remoção foi de ~86% em 24 h e ~97% em 48 h. A 40 mg/L, o percentual removido foi menor (~72% e ~88%), embora a massa de corante removida tenha sido cerca de 3,3 a 3,6 vezes maior, indicando que a capacidade das plantas não foi saturada. Dobrar o número de plantas para dez não aumentou a remoção (~75% e ~91%), sugerindo que a resposta não é proporcional à biomassa, possivelmente por sombreamento e redução da área superficial efetiva. Os resultados indicam que *R. natans* é promissora para a remoção de AM, mas a eficiência depende da carga do poluente e da densidade de plantas.
Palavras-chave: Azul de metileno; Biossorção; Corantes; Fitorremediação; *Ricciocarpus natans*.

Abstract: Synthetic dyes such as methylene blue (MB) are toxic and persistent in aquatic environments, demanding low-cost treatment alternatives. This study evaluated MB removal from aqueous solutions by Ricciocarpos natans, testing the effects of initial dye concentration (10 and 40 mg/L) and number of plants (five or ten) per experimental unit. Assays were performed in triplicate under controlled lighting (blue and red LEDs) and temperature, and the remaining dye concentration was monitored by spectrophotometry at 660 nm. The control containing only the dye showed unchanged absorbance, indicating that decolorization resulted from the presence of the macrophyte. At 10 mg/L with five plants, removal reached ~86% at 24 h and ~97% at 48 h. At 40 mg/L, the percentage removed was lower (~72% and ~88%), although the mass of dye removed was about 3.3 to 3.6 times greater, indicating that the plants' capacity was not saturated.

[1] Graduando em Engenharia Química, UNIPAMPA, Bagé, RS;
[2] Graduanda em Química, UNIPAMPA, Bagé, RS;
[3] Graduando em Engenharia de Alimentos, UNIPAMPA, Bagé, RS;
[4] Doutora em Bioquímica, URCAMP, Bagé, RS;
[5] Doutor em Química, UNIPAMPA, Bagé, RS.

Doubling the number of plants to ten did not increase removal (~75% and ~91%), suggesting that the response is not proportional to biomass, possibly due to mutual shading and reduced effective surface area. The results indicate that R. natans is a promising option for MB removal, although efficiency depends on pollutant load and plant density.
Keywords: Methylene blue; Biosorption; Dyes; Phytoremediation; Ricciocarpus natans.

INTRODUÇÃO

A contaminação de corpos hídricos por corantes industriais, como o azul de metileno, representa um grave risco ambiental devido à sua toxicidade, caráter carcinogênico e persistência na degradação natural (Awad et al., 2023; Rolim et al., 2024). Esses poluentes sintéticos, amplamente utilizados nos setores têxtil e de couro, causam danos aos ecossistemas aquáticos ao impedir a penetração da luz e promover a eutrofização (El-Sadaawy & AGIB, 2024; Fito et al., 2023). Nesse contexto, a utilização de macrófitas como *Ricciocarpus natans* emerge como uma alternativa sustentável para a remoção desses contaminantes, dada a capacidade da flora aquática em promover a bioadsorção e bioacumulação de corantes tóxicos (Al-Tohamy et al., 2022; Dolui et al., 2024). Diante da necessidade de estratégias de remediação de baixo custo e alta eficiência, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de *Ricciocarpus natans* na remoção de azul de metileno sob diferentes concentrações (10 e 40 mg/L) e densidades populacionais (cinco ou dez exemplares) (Hamad & Idrus, 2022).

A fitorremediação baseia-se em mecanismos biológicos como a fitoextração e a rizofiltração, processos nos quais as plantas atuam como agentes depuradores ao interagir diretamente com os efluentes contaminados (Eftekhari et al., 2023; Kaur & Kaushal, 2022). Estudos indicam que essas técnicas oferecem alternativas economicamente viáveis e ambientalmente seguras em comparação aos métodos físico-químicos convencionais, como a adsorção com carvão ativado ou nanomateriais (Hummadi et al., 2021; Wentzell, 2025). Por sua vez, o azul de metileno é reconhecido por sua persistência ambiental e potencial toxicidade, tornando imperativa a investigação de métodos biotecnológicos eficazes para sua eliminação de matrizes aquosas (Oladoye et

al., 2022). Neste cenário, a *Ricciocarpus natans*, uma briófita aquática de crescimento rápido, destaca-se pela sua elevada área superficial e adaptabilidade em sistemas de tratamento de águas residuais (Tesser et al., 2021). A espécie apresenta mecanismos adaptativos eficazes para lidar com contaminantes aquáticos, possuindo potencial de absorção comparável a outras macrófitas flutuantes frequentemente utilizadas em estudos de fitodepuração (Singh & Bowman, 2023). A capacidade desta espécie de acumular poluentes em sistemas controlados reflete sua eficácia em processos de rizofiltração, uma vez que suas estruturas radiculares facilitam a interação direta com contaminantes dissolvidos na coluna d'água (Sitarska et al., 2023), (Khan et al., 2022). além de sua natureza como hepática que permite a rápida captura de compostos orgânicos através de sua ampla superfície de contato (Sompura et al., 2024). A eficácia dessa macrófita é particularmente relevante no tratamento de corantes catiônicos, uma vez que a literatura demonstra que plantas flutuantes podem alcançar taxas de remoção superiores a 80% para o azul de metileno em condições controladas (Yuliasni et al., 2022). Dessa forma, a modelagem cinética do processo sugere que a remoção do corante segue frequentemente modelos de adsorção complexos, nos quais a capacidade de absorção é influenciada tanto pelo tempo de exposição quanto pela carga poluidora inicial (Urucu et al., 2025). Adicionalmente, fatores como a densidade populacional das plantas e a concentração de contaminantes na solução são determinantes críticos na eficiência da remoção, visto que a carga excessiva de poluentes pode saturar os sítios ativos de adsorção das estruturas vegetais (Karaghool et al., 2022; Sanjana et al., 2024). Nesse sentido, a modulação da densidade de biomassa vegetal permite otimizar a disponibilidade de sítios de troca, compensando o aumento da carga tóxica e minimizando os impactos negativos do corante sobre a saúde da macrófita (Mazzeo et al., 2023; Mzinyane, 2024). Portanto, a compreensão do equilíbrio cinético e termodinâmico torna-se essencial para elucidar as interações moleculares envolvidas, como a troca iônica e forças de van der Waals, que regem a afinidade entre o azul de metileno e os tecidos desta hepática (Kanwal et al., 2023). Nesse sentido, a investigação

da eficiência de *R. natans* frente a variações na carga orgânica e no número de espécimes possibilita determinar as taxas ótimas de bioadsorção, alinhando-se a estratégias sustentáveis de manejo de efluentes (Sharma et al., 2024). Este estudo contribui para a literatura ao fornecer dados experimentais sobre o desempenho dessa briófita sob condições específicas de carga, preenchendo lacunas sobre a dinâmica de remoção de corantes catiônicos em sistemas botânicos menos convencionais (Carneiro et al., 2022; Kundu et al., 2024). Ao analisar o desempenho biológico dessa espécie sob concentrações de 10 e 40 mg/L, busca-se estabelecer correlações precisas entre o incremento da biomassa, representada por cinco ou dez plantas, e a capacidade máxima de adsorção do corante (Yadav et al., 2021). A análise da performance destas variações permitirá validar se o aumento da densidade biológica compensa a saturação dos sítios de adsorção observada em concentrações mais elevadas do contaminante (Ren et al., 2024).

METODOLOGIA

O delineamento experimental foi conduzido em ambiente controlado, utilizando volumes fixos de solução contendo concentrações de 10 e 40 mg/L de azul de metileno. Para avaliar a influência da densidade vegetal na capacidade de depuração, foram estabelecidos ensaios comparativos utilizando grupos de cinco e dez plantas por unidade experimental. O cultivo foi mantido sob condições constantes de luminosidade e temperatura, permitindo observar como o aumento da biomassa, ao elevar a disponibilidade de sítios de adsorção, influencia a cinética de remoção do corante em cada regime de concentração testado. As amostras foram monitoradas periodicamente para quantificação da remoção do soluto, permitindo a correlação direta entre o acúmulo de biomassa e a eficiência de sorção. Adicionalmente, o experimento buscou determinar a viabilidade metabólica da espécie sob estresse químico, observando-se possíveis alterações morfológicas que pudessem indicar a toxicidade do corante em níveis de saturação distintos. A comparação dos tratamentos permitirá verificar se o aumento da biomassa favorece a remoção do corante ou se a carga mais elevada limita a resposta da espécie. Para a quantificação da concentração

remanescente de azul de metileno, as alíquotas coletadas foram submetidas à espectrofotometria no comprimento de onda de 660 nm, utilizando uma curva de calibração padrão composta por concentrações de 10, 20, 40, 60 e 80 mg/L. Devido à linearidade do equipamento, as amostras foram submetidas a uma diluição prévia de 10 vezes para assegurar que as leituras de absorbância permanecessem dentro da faixa dinâmica operacional do espectrofotômetro. Posteriormente, os valores de absorbância obtidos foram correlacionados com as concentrações nominais da curva de calibração para determinar a massa residual de corante em cada intervalo de tempo. A partir desses dados, a eficiência de remoção foi calculada pela razão entre a massa de corante adsorvida e a biomassa vegetal empregada, permitindo uma análise comparativa robusta entre os diferentes tratamentos (Figura 1).

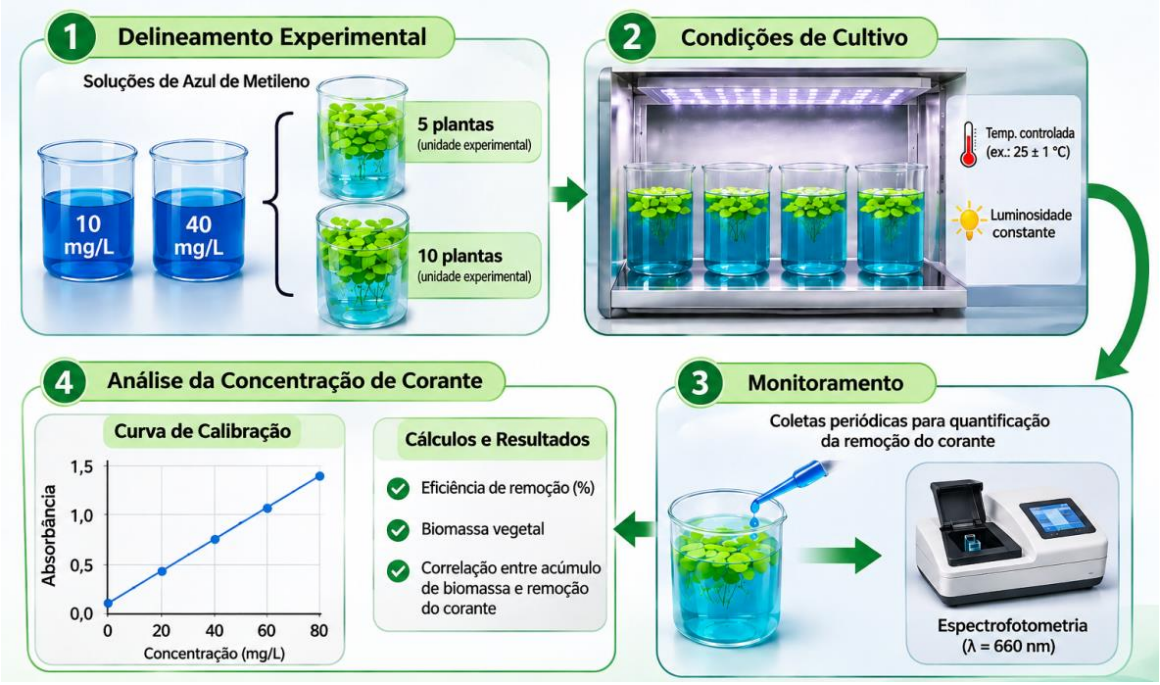


Figura 1 – Representação esquemática do delineamento experimental para avaliação da remoção de azul de metileno por Lemna minor, considerando diferentes concentrações do corante, densidades vegetais, condições controladas de cultivo e monitoramento espectrofotométrico a 660 nm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curva de calibração

A curva de calibração do azul de metileno a 660 nm foi construída com cinco padrões (10 a 80 mg/L), obtendo-se a equação $A = 9{,}05\times10^{-3}\cdot C + 0{,}0983$ ($R^2 = 0{,}995$), indicando boa correlação linear na faixa estudada (Figura 2).

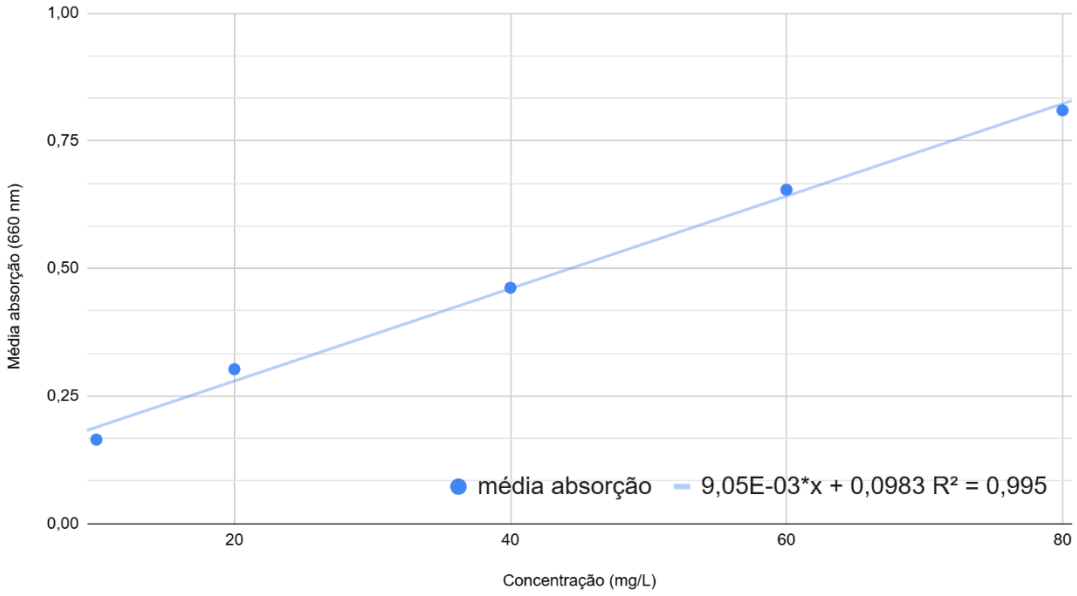


Figura 2. Curva de calibração para o Azul de metileno (660 nm).

Estabilidade do corante nas condições experimentais

O controle positivo, contendo apenas azul de metileno (AM) em água, manteve a absorbância a 660 nm praticamente inalterada (100% da concentração inicial) em todos os tempos de acompanhamento e nos três ensaios. Esse comportamento indica que, sob irradiação contínua com LEDs azuis e vermelhos e com a temperatura controlada, o AM não sofreu fotólise, auto degradação ou adsorção apreciável às paredes dos frascos plásticos. Assim, o decaimento observado nos tratamentos pode ser atribuído à presença de *R. natans*, e não a processos abióticos.

Capacidade de remoção do AM por *R. natans*

No ensaio com 1000 µL de AM (concentração nominal de ~10 mg/L) e cinco plantas (Tf), a concentração do corante caiu para ~14% do valor inicial em 24 horas e para ~2–3% em 48 horas (Figura 3), o que corresponde a remoções estimadas de ~86% e ~97%, respectivamente. A queda mais acentuada no primeiro intervalo, seguida de aproximação gradual do valor final, é o perfil frequentemente descrito para a remoção de corantes catiônicos por biomassa vegetal, em que uma etapa rápida de interação com a superfície é seguida de processos mais lentos.

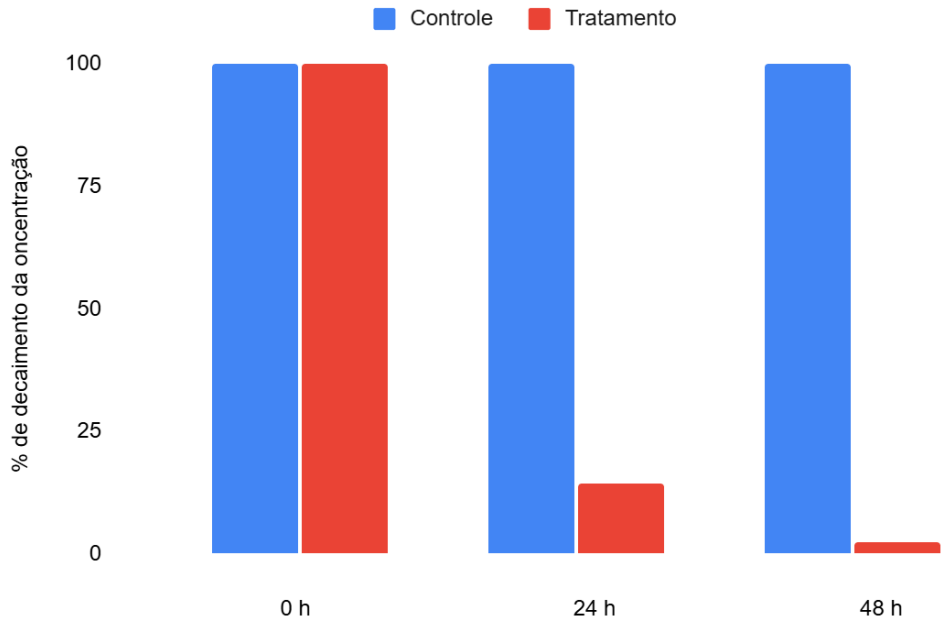


Figura 3. Remoção de azul de metileno (AM) por R. natans no ensaio Tf (1000 µL de AM; cinco plantas), em comparação aos controles, ao longo do tempo.

O AM é um corante catiônico e, em solução aquosa, tende a interagir com grupos carboxila, hidroxila e fosfato presentes na parede celular de briófitas, o que sugere a biossorção como contribuinte relevante. Outros processos podem atuar em conjunto: absorção pelos tecidos, transformação enzimática e redução do AM à forma leuco, incolor. Como a técnica empregada acompanha apenas a absorbância a 660 nm, a perda de cor não distingue remoção física (sorção) de

transformação química e, no caso da redução, não comprova mineralização. Essa distinção deve ser tratada como limitação do estudo.

Efeito da concentração inicial de AM

Quando a dose foi quadruplicada (4000 µL, ~40 mg/L; ensaio Tf40), a remoção percentual foi menor: restaram ~28% do corante em 24 h e ~12% em 48 h (Figura 4), ou seja, remoções de ~72% e ~88%. Contudo, ao se considerar a massa removida, e assumindo proporcionalidade entre absorbância e concentração, o tratamento Tf40 removeu cerca de ~29 mg/L em 24 h e ~35 mg/L em 48 h, contra ~9 mg/L e ~10 mg/L no ensaio Tf10, isto é, cerca de 3,3 a 3,6 vezes mais corante. Esse resultado indica que, na faixa estudada, a capacidade das plantas não foi saturada, e que a menor eficiência percentual reflete a maior carga de corante para a mesma quantidade de biomassa. Em 48 h, o residual no Tf40 (~5 mg/L) ainda é bem superior ao do Tf10 (~0,3 mg/L), de modo que a remoção completa em doses mais altas exigiria mais tempo ou mais biomassa. Efeitos fitotóxicos em concentrações maiores também não podem ser descartados mas clorose não foi observado. . A análise comparativa entre os grupos de cinco e dez plantas revelou que a duplicação da densidade biológica impulsionou uma cinética de decaimento mais célere, sugerindo que a disponibilidade de sítios ativos na superfície foliar é um fator limitante primário na otimização do processo. Essa correlação entre a densidade de biomassa e a velocidade de descoloração é consistente com mecanismos de interações eletrostáticas, onde o aumento dos sítios funcionais, como grupos carboxila e fosfato, amplia a capacidade de adsorção de cátions do corante (El-Naggar et al., 2021; Remenárová et al., 2021). No entanto, é preciso considerar que o incremento excessivo de biomassa em volumes restritos pode induzir a aglomeração das plantas, reduzindo a área superficial efetivamente exposta e comprometendo a eficiência estequiométrica da remoção.

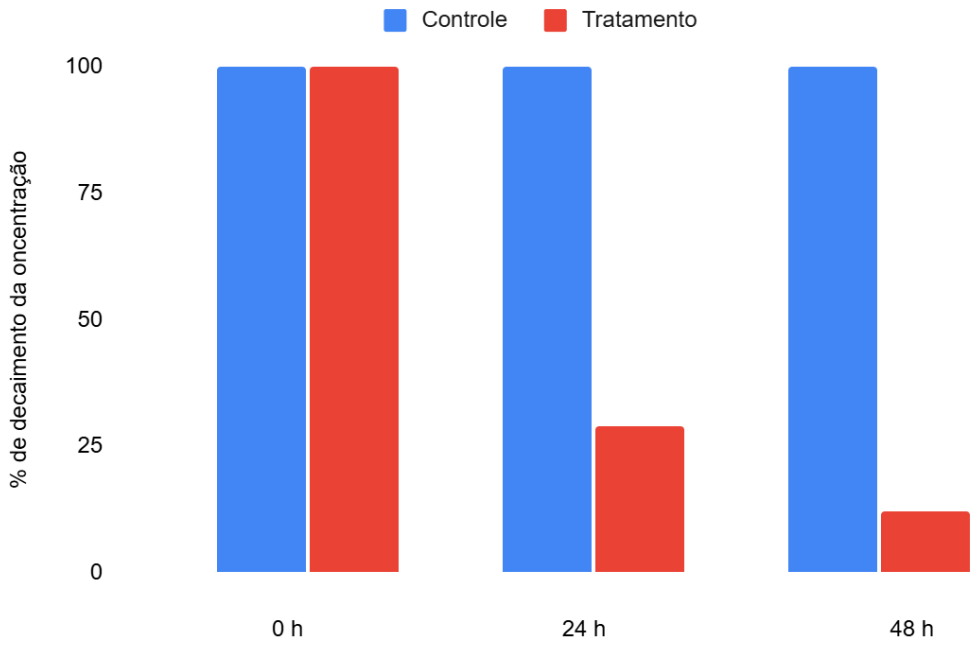


Figura 4. Remoção de AM por R. natans no ensaio Tf40 (4000 µL de AM), em comparação aos controles, ao longo do tempo.

Efeito do número de plantas

Dobrar o número de plantas de cinco para dez, mantendo-se 1000 µL de AM (Tf10), não aumentou a remoção. Restaram ~24–25% do corante em 24 h e ~9% em 48 h (Figura 5), isto é, remoções de ~75% e ~91%, valores inferiores aos obtidos com cinco plantas (~86% e ~97%). Assim, nas condições avaliadas, o aumento do número de plantas não resultou em maior remoção de AM, indicando que a resposta não foi proporcional à biomassa empregada. Esse fenômeno pode ser atribuído a uma possível competição entre os espécimes por nutrientes ou condições lumínicas, resultando em um efeito de sombreamento mútuo que compromete a atividade fotossintética e, consequentemente, a capacidade metabólica necessária para a degradação enzimática do corante. Adicionalmente, a aglomeração excessiva de espécimes em volumes restritos pode induzir a saturação de sítios de ligação e o aumento da resistência à difusão, reduzindo a área superficial efetiva disponível para a biossorção (Gaber et al., 2025). Dessa forma, a otimização da densidade de *R. natans* em sistemas

de fitorremediação exige um equilíbrio entre a oferta de sítios de adsorção e a manutenção de condições favoráveis ao desenvolvimento fisiológico individual.

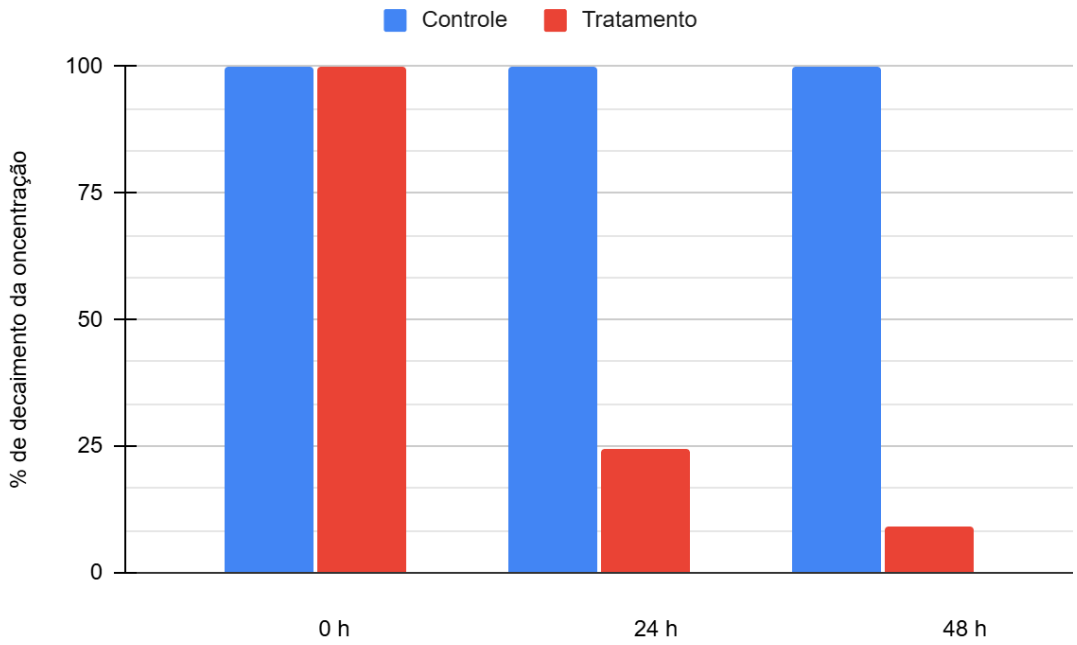


Figura 5. Remoção de AM por R. natans no ensaio com dez plantas (1000 µL de AM), em comparação aos controles, ao longo do tempo.

CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que *Ricciocarpus natans* apresenta um potencial significativo na remoção de azul de metileno, alcançando elevadas taxas de descoloração em condições controladas, embora a eficiência seja dependente da carga de poluente e da densidade populacional. A exploração de diferentes densidades de biomassa e faixas de concentração revelou que o incremento populacional não garante linearmente uma maior remoção, sugerindo que fatores como o sombreamento e a disponibilidade de nutrientes modulam a eficácia do processo (Bollinger et al., 2025). Investigações futuras devem priorizar a análise da viabilidade de reutilização da biomassa saturada e a identificação das vias metabólicas responsáveis pela degradação intracelular do corante. Adicionalmente, estudos em escala de fluxo contínuo seriam essenciais para avaliar a aplicabilidade desta macrófita em efluentes reais,

considerando a influência de interferentes químicos e variações na turbidez da água.

AGRADECIMENTOS (opcional)

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e pelas bolsas concedidas, que viabilizaram a realização desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

Al- Fawwaz, A., Shra'ah, A. A., & Elhaddad, E. (2023). Bioremoval of Methylene Blue from Aqueous Solutions by Green Algae (Bracteacoccus sp.) Isolated from North Jordan: Optimization, Kinetic, and Isotherm Studies. **Sustainability**, 15(1), 842. https://doi.org/10.3390/su15010842

Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K., Mahmoud, Y. A. - G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 231, 113160. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160

Awad, H. E. A., Mohammad, A. M., & Farahat, E. A. (2023). Potential use of dry powder of Vossia cuspidata (Roxb.) Griff. rhizomes and leaves in methylene blue dye remediation. **Scientific Reports**, 13(1), 11073. https://doi.org/10.1038/s41598-023-37987-0

Bollinger, J., Lima, É. C., Mouni, L., Salvestrini, S., & Tran, H. N. (2025). Molecular properties of methylene blue, a common probe in sorption and degradation studies: a review. **Environmental Chemistry Letters**, 23(5), 1403–1424. https://doi.org/10.1007/s10311-025-01856-1

Brunhoferová, H., Venditti, S., Schlienz, M., & Hansen, J. (2021). Removal of 27 micropollutants by selected wetland macrophytes in hydroponic conditions.

Chemosphere, 281, 130980. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130980

Carneiro, M. T., Barros, A. Z. B., Morais, A. Í. S., Melo, A. L. F. C., Bezerra, R. D. S., Osajima, J. A., & Silva-Filho, E. C. (2022). Application of Water Hyacinth Biomass (Eichhornia crassipes) as an Adsorbent for Methylene Blue Dye from Aqueous Medium: Kinetic and Isothermal Study. **Polymers**, 14(13), 2732. https://doi.org/10.3390/polym14132732

Dolui, D., Das, A., Hasanuzzaman, M., & Adak, M. K. (2024). Physiological and biomolecular interventions in the bio-decolorization of Methylene blue dye by Salvinia molesta D. Mitch. **International Journal of Phytoremediation**, 27(2), 215–232. https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2412242

Eftekhari, Z., Norastehnia, A., & Masoudian, Z. (2023). Biodecolorization of azo dye Acid Blue 92 (AB92) by Ceratophyllum de-mersum L.: process optimization using Taguchi method and toxicity as-sessment. **Acta** Agriculturae Slovenica, 119(2). https://doi.org/10.14720/aas.2023.119.2.13593

El- Naggar, N. E., Hamouda, R. A., Saddiq, A. A., & Alkinani, M. H. (2021). Simultaneous bioremediation of cationic copper ions and anionic methyl orange azo dye by brown marine alga Fucus vesiculosus. **Scientific Reports**, 11(1), 3555. https://doi.org/10.1038/s41598-021-82827-8

El-Sadaawy, M. M., & AGIB, N. S. (2024). Removal of Textile dyes by ecofriendly aquatic plants From wastewater: A review on Plants Species, Mechanisms, and Perspectives. **Blue Economy**, 2(2). https://doi.org/10.57241/2805-2994.1023

Fito, J., Abewaa, M., Mengistu, A., Angassa, K., Ambaye, A. D., Moyo, W., & Nkambule, T. T. I. (2023). Adsorption of methylene blue from textile industrial wastewater using activated carbon developed from Rumex abyssinicus plant. **Scientific Reports**, 13(1), 5427. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32341-w

Gaber, M. M., Shokry, H., Hassanin, A. H., Awad, S., Samy, M., & Elkady, M. (2025). Novel palm peat lignocellulosic adsorbent derived from agricultural residues for efficient methylene blue dye removal from textile wastewater. **Applied Water Science**, 15(2). https://doi.org/10.1007/s13201-025-02363-y

Hamad, H. N., & Idrus, S. (2022). Recent Developments in the Application of Bio-Waste-Derived Adsorbents for the Removal of Methylene Blue from Wastewater: A Review. **Polymers**, 14(4), 783. https://doi.org/10.3390/polym14040783

Hummadi, K. K., Luo, S., & He, S. (2021). Adsorption of methylene blue dye from the aqueous solution via bio-adsorption in the inverse fluidized-bed adsorption column using the torrefied rice husk. **Chemosphere**, 287, 131907. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131907

Kanwal, A., Rehman, R., Imran, M., Samin, G., Jahangir, M., & Ali, S. (2023). Phytoremediative adsorption methodologies to decontaminate water from dyes and organic pollutants. **RSC Advances**, 13(38), 26455–26474. https://doi.org/10.1039/d3ra02104a

Karaghool, H. A. Kh., Hashim, K., Kot, P., & Muradov, M. (2022). Preliminary Studies of Methylene Blue Remotion from Aqueous Solutions by Ocimum basilicum. **Environments**, 9(2), 17. https://doi.org/10.3390/environments9020017

Kaur, N., & Kaushal, J. (2022). Screening the six plant species for phytoremediation of synthetic textile dye waste water. **Materials Today Proceedings**, 71, 232–238. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.512

Khan, A. U., Khan, A. N., Waris, A., Ilyas, M., & Zamel, D. (2022). Phytoremediation of pollutants from wastewater: A concise review. **Open Life Sciences**, 17(1), 488–496. https://doi.org/10.1515/biol-2022-0056

Kotowska, U., Piekutin, J., Polińska, W., & Kotowski, A. (2024). Removal of contaminants of emerging concern by Wolffia arrhiza and Lemna minor depending on the process conditions, pollutants concentration, and matrix type. **Scientific Reports**, 14(1), 15898. https://doi.org/10.1038/s41598-024-66962-6

Kundu, D., Sharma, P., Bhattacharya, S., Gupta, K., Sengupta, S., & Shang, J. (2024). Study of methylene blue dye removal using biochar derived from leaf and stem of Lantana camara L. **Carbon Research**, 3(1). https://doi.org/10.1007/s44246-024-00108-1

Mazzeo, L., Marzi, D., Bavasso, I., Piemonte, V., & Palma, L. D. (2023). Removal of Methylene Blue from Wastewater by Waste Roots from the Arsenic-Hyperaccumulator Pteris vittata: Fixed Bed Adsorption Kinetics. **Materials**, 16(4), 1450. https://doi.org/10.3390/ma16041450

Monroy- Licht, A., Carranza-López, L., Parra-Guerra, A. C. D. la, & Acevedo-Barrios, R. (2024). Unlocking the potential of Eichhornia crassipes for wastewater treatment: phytoremediation of aquatic pollutants, a strategy for advancing Sustainable Development Goal-06 clean water. **Environmental Science and Pollution Research**, 31(31), 43561–43582. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33698-9

Mzinyane, N. N. (2024). Removal of Methylene Blue dye from aqueous solution using Fenton-modified submerged aquatic plant Schoenoplectus species (Bulrush). **Heliyon**, 10(21). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40071

Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. **Results in Engineering**, 16, 100678. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678

Remenárová, L., Pipíška, M., Horník, M., & Augustín, J. (2021). Sorption of cationic dyes from aqueous solutions by moss Rhytidiadelphus squarrosus: Kinetics and equilibrium studies. **Nova** Biotechnologica et Chimica, 9(1), 53–62. https://doi.org/10.36547/nbc.1287

Ren, J., Zhang, S., Wang, Y., & Yang, H. (2024). Adsorption Properties and Mechanisms of Methylene Blue by Modified Sphagnum Moss Bio-Based Adsorbents. **Materials**, 17(17), 4329. https://doi.org/10.3390/ma17174329

Rolim, E. M., Silva, A. M. B. da, Batista, J. dos S., Serrão, N. O., Laier, L. O., Freitas, F. A. de, Perotti, G. F., Carmo, D. F. de M. do, Celestino, G. de G., & Maia, P. J. S. (2024). Removal of rhodamine B and methylene blue using residual Onecarpus bacaba Mart fibers as biosorbent: kinetic and thermodynamic parameters. **Discover Water**, 4(1). https://doi.org/10.1007/s43832-024-00058-0

Sanjana, M. V., Prajna, R., Katti, U. S., & Kavitha, R. (2024). Bioremediation – the recent drift towards a sustainable environment. **Environmental Science Advances**, 3(8), 1097–1110. https://doi.org/10.1039/d3va00358b

Sharma, M., Rawat, S., & Rautela, A. (2024). Phytoremediation in sustainable wastewater management: an eco-friendly review of current techniques and future prospects. **AQUA - Water Infrastructure Ecosystems and Society**, 73(9), 1946–1975. https://doi.org/10.2166/aqua.2024.427

Singh, H. G., Raj, S., Kumar, D., Sharma, S., Bhatt, U., Kalaji, H. M., Wróbel, J., & Soni, V. (2021). Tolerance and decolorization potential of duckweed (Lemna gibba) to C.I. Basic Green 4. **Scientific Reports**, 11(1), 10889. https://doi.org/10.1038/s41598-021-90369-2

Singh, S., & Bowman, J. L. (2023). The monoicous secondarily aquatic liverwort Ricciocarpos natans as a model within the radiation of derived Marchantiopsida. **Frontiers in Plant Science**, 14, 1260596. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1260596

Sitarska, M., Traczewska, T. M., Hołtra, A., Zamorska-Wojdyła, D., Filarowska, W., & Hanus- Lorenz, B. (2023). Removal of mercury from water by phytoremediation process with Salvinia natans(L.) All. **Environmental Science and Pollution Research**, 30(36), 85494–85507. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27533-w

Sompura, Y., Bhardwaj, S., Selwal, G., Soni, V., & Ashokkumar, K. (2024). Unrevealing the potential of aquatic macrophytes for phytoremediation in heavy metal-polluted wastewater. **Journal of Current Opinion in Crop Science**, 5(1), 48–61. https://doi.org/10.62773/jcocs.v5i1.233

Tesser, T. T., Bordin, J. O., Rocha, C. M. da, & Silva, A. dos S. da. (2021). Application of the dry and wet biomass of bryophytes for phytoremediation of

metals: Batch experiments. **Environmental Challenges**, 5, 100382. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100382

Urucu, O. A., Garosi, B., & Musah, R. A. (2025). Efficient Phytoremediation of Methyl Red and Methylene Blue Dyes from Aqueous Solutions by Juncus effusus. **PubMed Central**, 10(2), 1943–1953. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c07468

Wentzell, B. M. (2025). Phytoremediation for water quality improvement: current advances and future prospects. **Biotechnology for the Environment**, 2(1). https://doi.org/10.1186/s44314-025-00022-9

Yadav, M., Thakore, S., & Jadeja, R. N. (2021). Removal of organic dyes using Fucus vesiculosus seaweed bioadsorbent an ecofriendly approach: Equilibrium, kinetics and thermodynamic studies. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, 4, 67–77. https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.12.003

Yuliasni, R., Kurniawan, S. B., Marlena, B., Hidayat, M. R., Kadier, A., Ma, P., & Imron, M. F. (2022). Recent Progress of Phytoremediation-Based Technologies for Industrial Wastewater Treatment. **Journal of Ecological Engineering**, 24(2), 208–220. https://doi.org/10.12911/22998993/156621