

## Nanocatalisador sustentável à base de sílica e nanopartículas de trióxido de molibdênio para aplicação na remoção do corante rodamina 6G

Matheus Londero da Costa<sup>1\*</sup>; Giovani Pavoski<sup>2</sup>; Denise Croce Romano Espinosa<sup>2</sup>; Jorge Alberto Soares Tenório<sup>2</sup>; Cristiane do Santos<sup>3</sup>; William Leonardo da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Nanociências, Universidade Franciscana (UFN), Santa Maria – RS, Brasil. E-mail: w.silva@ufn.edu.br

<sup>2</sup>Laboratório de Reciclagem, Tratamento de Resíduos e Extração (LAREX), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo – SP, Brasil. E-mail: giovanipavoski@gmail.com; espinosa@usp.br; jtenorio@usp.br

<sup>3</sup>Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, Brasil. E-mail: cristiane.engbio@gmail.com

\*autor correspondente: matheus.londero@ufn.edu.br

### Resumo/Abstract

**RESUMO** - A contaminação de corpos hídricos por corantes sintéticos, como a rodamina 6G (Rh6G), representa um grave problema ambiental, devido à toxicidade e resistência à degradação desses poluentes. Paralelamente, resíduos agroindustriais apresentam elevado potencial poluidor, quando descartados de forma inadequada, como as cascas de arroz. Neste contexto, a fotocatalise heterogênea surge como uma tecnologia promissora para a degradação de contaminantes orgânicos, especialmente com o uso de nanocatalisadores obtidos por rotas verdes. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar um nanocatalisador sustentável à base de sílica e nanopartículas de trióxido de molibdênio ( $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}$ ) a partir da casca de arroz e extrato de folhas de *Araucaria angustifolia*, para aplicação na remoção do corante Rh6G.  $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}$  apresentou elevada área superficial ( $263 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ ), energia de *band gap* de 2,7 eV e mesoporosidade favorável. A condição ideal foi  $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}] = 4,17 \text{ g.L}^{-1}$ , pH 7,  $[\text{Rh6G}] = 1,63 \text{ mg.L}^{-1}$ , com uma remoção de 99,9% de remoção da Rh6G ( $k = 0,027 \text{ min}^{-1}$ ;  $R^2 = 0,989$ ), evidenciando seu potencial como catalisador para a remediação ambiental.

**Palavras-chaves:**  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MoO}_3$ , fotocatalise, biossíntese.

**ABSTRACT** - Contamination of water bodies by synthetic dyes, such as rhodamine 6G (Rh6G), represents a serious environmental problem due to the toxicity and resistance to degradation of these pollutants. At the same time, agro-industrial waste has a high polluting potential when disposed of inappropriately, such as rice husks. In this context, heterogeneous photocatalysis emerges as a promising technology for the degradation of organic contaminants, especially with the use of nanocatalysts obtained by green routes. In this context, the present work aims to develop and characterize a sustainable nanocatalyst based on silica and molybdenum trioxide nanoparticles ( $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}$ ) from rice husk and *Araucaria angustifolia* leaf extract, for application in the removal of the Rh6G dye.  $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}$  showed high surface area ( $263 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ ), band gap energy of 2.7 eV and favorable mesoporosity. The ideal condition was  $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}] = 4.17 \text{ g.L}^{-1}$ , pH 7,  $[\text{Rh6G}] = 1.63 \text{ mg.L}^{-1}$ , with a removal of 99.9% of Rh6G ( $k = 0.027 \text{ min}^{-1}$ ;  $R^2 = 0.989$ ), evidencing its potential as a catalyst for environmental remediation.

**Keywords:**  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MoO}_3$ , photocatalysis, biosynthesis.

### Introdução

A contaminação de recursos hídricos por corantes sintéticos provenientes de indústrias têxteis, plásticas e de tintas, representa um grave problema ambiental devido à toxicidade e potencial bioacumulativo desses poluentes (1). Paralelamente, os resíduos (agro)industriais apresentam elevado potencial poluidor, pois devido a sua alta produção e destinação de forma não correta como cascas e polpas de cultivos (2).

A rodamina 6G (Rh6G) é um corante catiônico amplamente utilizado, em virtude da alta estabilidade química, entretanto apresenta elevada resistência à

degradação por processos convencionais, tornando necessária a busca por métodos eficientes e sustentáveis para sua adequada remoção (3). Nesse contexto, a fotocatalise heterogênea emerge como uma tecnologia promissora, capaz de mineralizar contaminantes orgânicos, por meio da geração de espécies reativas, principalmente os radicais hidroxila, sob irradiação luminosa (4).

Nos últimos anos, o desenvolvimento de nanopartículas metálicas com propriedades fotocatalíticas tem despertado crescente interesse, especialmente quando sintetizadas por rotas verdes a partir de agentes bio-redutores naturais, minimizando o uso de reagentes tóxicos (5). O molibdênio

(Mo) destaca-se como um material estratégico para aplicações fotocatalíticas, devido às suas características ópticas e à capacidade de formar óxidos semicondutores com *band gaps* ajustáveis (6). A síntese verde de nanopartículas à base de molibdênio não apenas alinha-se aos princípios da química sustentável, mas também permite o controle de morfologia e tamanho, fatores determinantes para a eficiência do processo fotodegradativo (7).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar um nanocatalisador à base de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) a partir da casca de arroz, como matriz catalítica, e nanopartículas de trióxido de molibdênio ( $\text{MoO}_3$ -NPS) verdes a partir do extrato de *Araucaria angustifolia*, como fase fotoativa para fotodegradação do corante rodamina 6G (Rh6G), sob radiação visível.

## Experimental

### Síntese do nanocatalisador sustentável

Inicialmente, a matriz catalítica de  $\text{SiO}_2$  foi preparada a partir do tratamento térmico, conforme a literatura (8).

Assim, 10 g de casca de arroz foram adicionadas a uma solução de 200 mL de HCl (2 mol.L<sup>-1</sup>), sob agitação magnética (60°C / 900 rpm) durante 1 hora. Após, o material foi lavado com água destilada até o pH 7, filtrado à vácuo e calcinado (600 °C / 4 horas / 30 °C.min<sup>-1</sup>).

As  $\text{MoO}_3$ -NPs foram preparadas a partir do processo de biossíntese (9) a partir do extrato das folhas de araucária (*A. angustifolia*), seguido das etapas de redução, nucleação e estabilização com o precursor metálico de molibdato de amônia (0,06 mol L<sup>-1</sup>).

O nanocatalisador sustentável ( $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3$ -NPs) foi preparado pelo método de impregnação (10), com 5% (base molar) de fase ativa sob a matriz catalítica, seguida de agitação magnética (900 rpm / 60 min) e calcinação (450 °C / 3 horas / 3°C.min<sup>-1</sup>).

### Caracterização

A porosimetria de  $\text{N}_2$  foi utilizada para determinação da área específica ( $S_{\text{BET}}$ ) e porosidade (diâmetro – Dp e volume de poros - Vp) em um equipamento ASAP 2020 Plus Micrometrics, por meio do método de BET/BJH (11). A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizado para avaliar aspectos morfológicos em um microscópio eletrônico de varredura (MEV JEOL, operando em 15 kV), com magnificação na faixa de 430 – 220x. A difração de raios x (DRX) foi utilizada para avaliar a cristalinidade em um difratômetro da marca Bruker (modelo D2 Phaser) com faixa angular de 10° a 70°. A energia *band gap* ( $E_g$ ) foi determinada por espectroscopia de refletância difusa UV-Vis (DRS) em um equipamento JASCOV-670 variando de 200 a 800 nm, utilizando a equação de Planck (12).

### Processo de fotocatalise

Os ensaios de fotocatalise foram realizados sob regime batelada em um reator do tipo *slurry*, sob radiação visível (Empalux® Bulb LED Lamp, 50 Watt Halogen Equivalent com 600 W.m<sup>-2</sup>), em duas etapas: (i) ausência de radiação por 15 min para o processo de adsorção das moléculas de Rh6G sob a superfície catalíticas do  $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3$ -NPs e (ii) sob radiação, onde alíquotas foram coletadas nos tempos de 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150 e 180 min, seguida da diluição 1:10 (v.v<sup>-1</sup>) e centrifugação (4500 rpm durante 5 min). O acompanhamento da reação foi por meio da espectroscopia UV-VIS (Kasvi) no comprimento de onda 530 nm (13).

### Delineamento composto central rotacional (DCCR)

Para a análise estatística, foi utilizado software *Statistica* 10 (versão 10), a fim de determinar a condição ideal de Rh 6G e  $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3$ -NPs, por meio da metodologia DCCR 2<sup>3</sup> e a análise das superfícies de resposta. Para a execução do DCCR foram fixados as variáveis independentes e os limites mínimos e máximos para a Rh6G (1,63 – 18,37 mg.L<sup>-1</sup>),  $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3$ -NPs (0,68 – 7,65 g.L<sup>-1</sup>) e pH 1,14 – 12,86, para se obter as superfícies de respostas e gráfico de pareto (9).

### Cinética de fotodegradação

Para o estudo cinético do processo fotocatalise, o modelo de Langmuir-Hinshelwood (L-H) (14) foi utilizado, conforme a Equação (1).

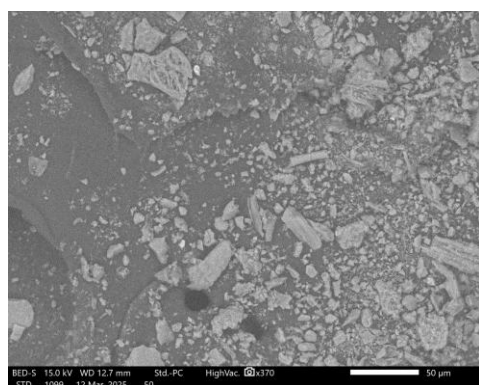
$$C = C_0 \cdot \exp^{-k \cdot t} \quad (1)$$

Onde  $C$  (mg L<sup>-1</sup>) é a concentração da Rh6G no tempo  $t$ ;  $C_0$  (mg L<sup>-1</sup>) é a concentração inicial da Rh6G (mg.L<sup>-1</sup>),  $k$  (min<sup>-1</sup>) é a velocidade aparente da reação de pseudo primeira-ordem (min<sup>-1</sup>) e  $t$  (min) é tempo reacional sob radiação visível.

## Resultados e Discussão

### Caracterização do nanocatalisador sustentável

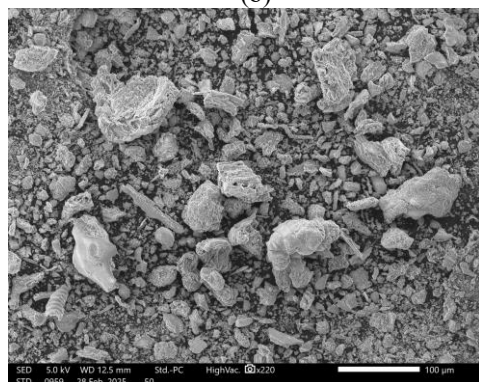
As Figuras 1(a), 1(b) e 1(c) apresentam as características morfológicas da para as amostras  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MoO}_3$ -NPs e  $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3$ -NPs com as magnificações de 370x, 430x e 220x respectivamente.



(a)



(b)



(c)

**Figura 1:** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para (a) SiO<sub>2</sub>, (b) MoO<sub>3</sub>-NPs e (c) SiO<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub>-NPs.

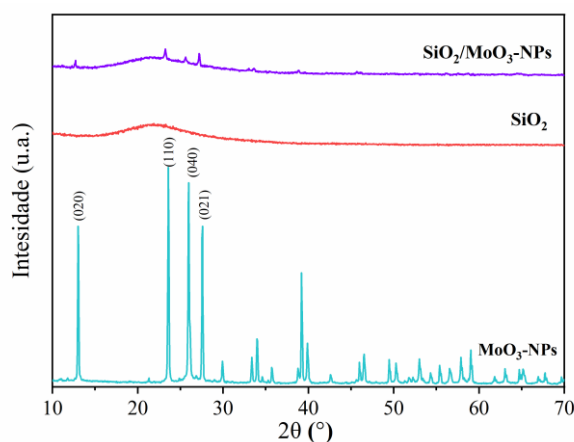
Conforme a Fig. 1(a), foi possível verificar que SiO<sub>2</sub> apresenta uma estrutura heterogênea, enquanto as MoO<sub>3</sub>-NPs (Fig. 1b) apresentaram uma estrutura característica com o formato de micro bastões e o nanocatalisador SiO<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub>-NPs apresentou uma morfologia heterogênea e com considerável porosidade, favorecendo a potencial difusão intra e interpartícula das moléculas da Rh6G até os sítios ativos, potencializando as reações de oxirredução e a

fotodegradação do poluente-alvo (15). A Tabela 1 apresenta as propriedades texturais e óptica das amostras.

**Tabela 1.** Área superficial ( $S_{BET}$ ), volume de poros ( $V_p$ ), diâmetro de poros ( $D_p$ ) e energia de *band gap* ( $E_g$ ) para SiO<sub>2</sub>, MoO<sub>3</sub>-NPs e SiO<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub>-NPs.

| Material                                | $S_{BET}$<br>( $m^2.g^{-1}$ ) | $V_p$<br>( $cm^3.g^{-1}$ ) | $D_p$<br>(nm) | $E_g$<br>(eV) |
|-----------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|
| SiO <sub>2</sub>                        | 320                           | 0,4                        | 5,4           | 3,0           |
| MoO <sub>3</sub> -NPs                   | 1                             | 0,003                      | 44,1          | 2,4           |
| SiO <sub>2</sub> /MoO <sub>3</sub> -NPs | 263                           | 0,4                        | 5,6           | 2,7           |

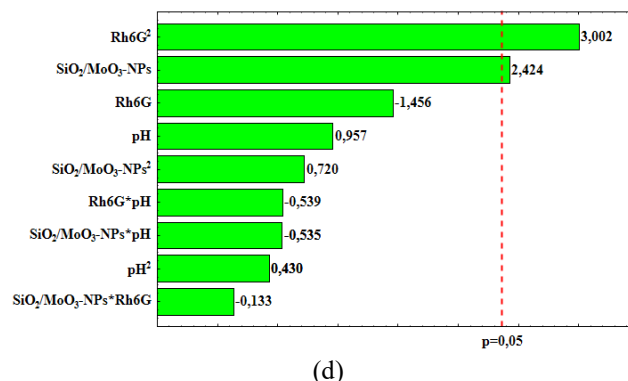
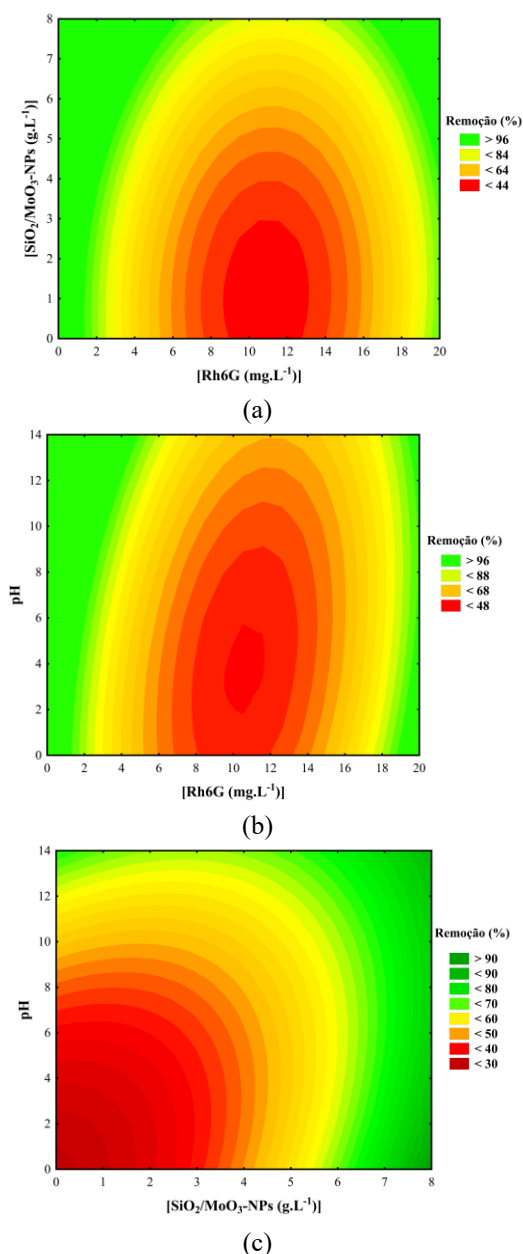
Conforme a Tabela 1, o nanocatalisador sustentável SiO<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub>-NPs apresentou considerável área superficial ( $S_{BET} = 263 m^2.g^{-1}$ ), efeito da combinação sinérgica da matriz catalítica e a fase fotoativa, bem como considerável porosidade ( $V_p = 0,4 cm^3.g^{-1}$ ), tornando-o promissor para aplicação na fotocatalise heterogênea, sob radiação visível ( $E_g = 2,7 eV - \lambda = 459,2 nm$ ) (16). Além disso, todos os materiais se caracterizaram com mesoporoso  $2 < D_p < 50 nm$  (17), característicos de nanocatalisadores suportados (18). A Figura 2 mostra os difratogramas da matriz catalítica, fase fotoativa e nanocatalisador sustentável, onde foi possível verificar a SiO<sub>2</sub> apresentou uma fase amorfa (19), enquanto o MoO<sub>3</sub>-NPs apresentou uma fase cristalina nos ângulos principais de 13° (020), 23,58° (110), 25,96° (040) e 27,58° (021) (JCPDS card n°. 05-0508), indicando uma cristalinidade ortorrômbica (20). Além disso, o nanocatalisador apresentou uma estrutura semicristalina, com a presença dos principais picos das MoO<sub>3</sub>-NPs.



**Figura 2.** Difratograma de DRX da SiO<sub>2</sub>, MoO<sub>3</sub>-NPs e SiO<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub>-NPs.

### DCCR 2<sup>3</sup>

A Figura 3 apresenta a superfície de resposta 2D para a remoção da Rh6G, considerando as variáveis independentes de: (a)  $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}]$  versus Rh6G, (b) pH versus  $[\text{Rh6G}]$  e (c) pH versus  $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}]$ . Além disso, a Figura 3(d) representa o gráfico de Pareto, sobre a influência das variáveis frente a remoção da Rh6G.

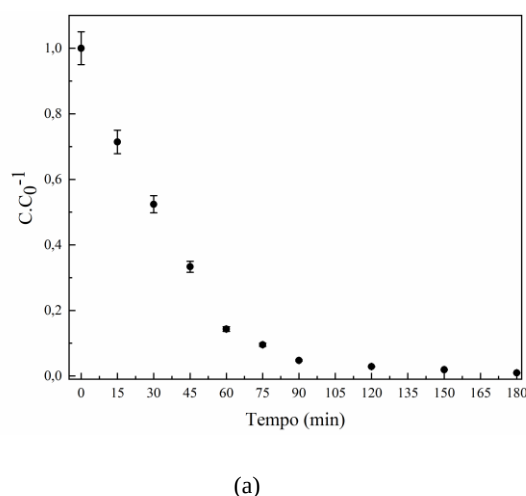


**Figura 3.** Superfície de resposta para (a)  $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}]$  versus  $[\text{Rh6G}]$ , (b) pH versus  $[\text{Rh6G}]$ , (c) pH versus  $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}]$  e (d) o gráfico de Pareto.

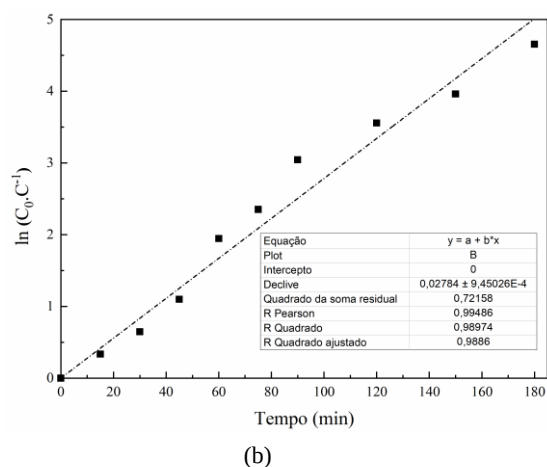
Conforme a Figura 3, a condição ideal para os processos de fotocatalise heterogênea foi utilizando  $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}] = 4,17 \text{ g.L}^{-1}$ , pH 7 e  $[\text{Rh6G}] = 1,63 \text{ mg.L}^{-1}$ , com uma remoção de 99,9%, após 180 minutos, sob radiação visível. Além disso, as variáveis  $[\text{Rh6G}]$  e  $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}]$  apresentaram uma influência direta quadrática e linear, respectivamente, na fotodegradação da Rh6G indicando como correlação entre sítios ativos disponíveis e moléculas de Rh6G adsorvidas (21).

### Cinética

A Figura 4(a) e Figura 4(b) apresentam a curva cinética e o ajuste ao modelo de L-H na condição ideal respectivamente, onde foi possível verificar um comportamento cinético de pseudo primeira-ordem com um  $k = 0,027 \text{ min}^{-1}$  e indicando um bom ajuste  $R^2 = 0,989$  (22).







**Figura 4.** (a) Curva cinética e (b) ajuste ao modelo de L-H na condição ideal ( $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}] = 4,17 \text{ g.L}^{-1}$ , pH 7 e  $[\text{Rh6G}] = 1,63 \text{ mg.L}^{-1}$ ).

## Conclusões

O nanocatalisador  $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}$  desenvolvido neste estudo, a partir de resíduos agroindustriais (casca de arroz) e de um agente bio redutor natural com extrato de araucária, demonstrou características morfológicas e texturais favoráveis, com elevada área superficial ( $263 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ ), porosidade adequada e *band gap* de 2,7 eV, compatível com excitação sob radiação visível. A incorporação da fase fotoativa de  $\text{MoO}_3\text{-NPs}$  à matriz de sílica resultou em um material mesoporoso, favorecendo a fotodegradação eficiente da Rh6G. A aplicação do DCCR permitiu otimizar as variáveis do processo, alcançando 99,9% de remoção da Rh6G em 180 minutos sob radiação visível, na condição ideal  $[\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}] = 4,17 \text{ g.L}^{-1}$ , pH = 7 e  $[\text{Rh6G}] = 1,63 \text{ mg.L}^{-1}$  de. A cinética de fotodegradação seguiu um modelo de pseudo-primeira ordem com constante de velocidade  $k = 0,027 \text{ min}^{-1}$  e alto coeficiente de correlação ( $R^2 = 0,989$ ). Estes resultados evidenciam o potencial do nanocatalisador  $\text{SiO}_2/\text{MoO}_3\text{-NPs}$  como uma alternativa eficiente, sustentável e de baixo custo para a remediação de efluentes contendo corantes, alinhando-se ao desenvolvimento da química verde reutilizando resíduos.

## Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela (CAPES), Código de Financiamento 001. Além disso, os autores agradecem a Universidade Franciscana (UFN), Universidade de São Paulo (USP) e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para apoio e suporte para realização do estudo.

## Referências

1. Khan, W. U.; Ahmed, S.; Dhoble, Y.; Madhav, S. A critical review of hazardous waste generation from textile industries and associated ecological impacts. *J. Indian Chem. Soc.* **2023**, *100*(1), 100829–100836.
2. Singh, R.; Das, R.; Sangwan, S.; Rohatgi, B.; Khanam, R.; Peera, S. K. P. G.; et al. Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: a review. *Environ. Sustain.* **2021**, *4*(4), 619–636.
3. Thangamuniyandi, P.; Umapathy, D.; Nagarajan, L.; Velanganni Arockiam, A. J. Blue-LED assisted Photodegradation kinetics of rhodamine-6G dye, enhanced anticancer activity and cleavage of plasmids using Au-ZnO nanocomposite. *Heliyon* **2025**, *11*(1), 1–16.
4. Rani, M.; Yadav, J.; Shanker, U.; Wang, C. Recent updates on remediation approaches of environmentally occurring pollutants using visible light-active nano-photocatalysts. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2024**, *31*(15), 22258–22283.
5. Dikshit, P.; Kumar, J.; Das, A.; Sadhu, S.; Sharma, S.; Singh, S.; et al. Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: Applications and Limitations. *Catalysts* **2021**, *11*(8), 902–936.
6. Bhattacharjee, J.; Roy, S. Exploration of Molybdenum Oxide Compounds-A Review. *Catalysis Research* **2024**, *04*(03), 1–19.
7. Bukhari, M. A.; Bukhari, S. M. Z. S.; Khalid, M. Y.; Arif, Z. U. Advancing photocatalytic activity through a green route: Bismuth ferrite@molybdenum trioxide heterostructure for sustainable water treatment. *J. Mol. Struct.* **2024**, *1315*, 138811–138820.
8. Oviedo, L. R.; Muraro, P. C. L.; Pavoski, G.; Espinosa, D. C. R.; Ruiz, Y. P. M.; Galembeck, A.; et al. Synthesis and characterization of nanozeolite from (agro)industrial waste for application in heterogeneous photocatalysis. *Mater. Today Proc.* **2022**, *29*(3), 3794–3807.
9. Oviedo, L. R.; Druzian, D. M.; Nora, L. D. D.; Da Silva, W. L. Biosynthesis and characterization of a novel supported nanocatalyst for the methylene blue dye photodegradation: Machine learning modeling and photocatalytic activity. *Catal. Today* **2024**, *441*, 114888–114894.
10. Li, Y.; Lu, Y.; Li, X.; Zhong, W.; Zhu, B.; Liu, K. Enhanced activation of peroxy monosulfate for tetracycline degradation via Cu-doped natural pyrite-based  $\text{CuFeS}_2/\text{FeS}_2$  composite catalysts: Elucidating the catalytic mechanism and synergistic effect of dual catalytic sites. *J. Chem. Eng.* **2025**, *509*, 161454–161468.
11. Anabalón Fuentes, P.; Kopp Pailañir, M.; Rocha Mella, S.; González Quijón, M. E.; Marzalletti Bernardi, T.; Cea Lemus, M. Development of bifunctional biochar/iron oxide composites for tetracycline removal from synthetic

wastewater. *J. Water Process Eng.* **2024**, 64, 105509–105525.

12. Brum, L. F. W.; Da Silva, M. D. C. R.; Dos Santos, C.; Pavoski, G.; Espinosa, D. C. R.; Da Silva, W. L. Green synthesis of niobium (V) oxide nanoparticles using pecan nutshell (*Carya illinoensis*) and evaluation of its antioxidant activity. *Catal. Today* **2025**, 445, 115106–115109.

13. Rubina, S.; Vineetha, P. K.; Anas, S. An efficient polymer supported Fenton type catalyst for photodegradation of organic dyes. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* **2024**, 449, 115410–115418.

14. Thompson, W. A.; Sanchez Fernandez, E.; Maroto-Valer, M. M. Probability Langmuir-Hinshelwood based CO<sub>2</sub> photoreduction kinetic models. *J. Chem. Eng.* **2020**, 384, 123356–123367.

15. Shabna, S.; Singh, C. J. C.; Dhas, S. D. S. J.; Jeyakumar, S. C.; Biju, C. S. An overview of prominent factors influencing the photocatalytic degradation of cationic crystal violet dye employing diverse nanostructured materials. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **2024**, 99(5), 1027–1055.

16. Lukiyanchuk, I. V.; Vasilyeva, M. S.; Adigamova, M. V.; Morozova, V. P.; Budnikova, Yu. B.; Korochentsev, V. V. Ferromagnetic PEO coatings on titanium as photo-Fenton-like heterogeneous catalysts. *J. Phys. Chem. Solids.* **2024**, 193, 112154–112166.

17. Liang, Z.; Yang, Y.; Zhang, Y.; Li, S.; Zhang, W.; Zhang, L.; et al. Synergistic photocatalysis of mesoporous confinement effect and Si-O-Ti interface for organic pollutants degradation. *J. Surf.* **2024**, 51, 104715.

18. Zhang, H.; Liu, J.; Xu, T.; Ji, W.; Zong, X. Recent Advances on Small Band Gap Semiconductor Materials ( $\leq 2.1$  eV) for Solar Water Splitting. *Catalysts* **2023**, 13(4), 728–757.

19. Rangelova, N.; Aleksandrov, L.; Yaneva, S. Synthesis and structure of amorphous SiO<sub>2</sub>/ZnO composites with potential application for azo dye degradation. *Mater. Today: Proc.* **2022**, 61, 1272–1279.

20. Castellanos-Espinoza, R.; González-Urbe, G.; Arjona, N.; Rodríguez-González, C.; Ramos-Castillo, C. M.; Álvarez-Contreras, L.; et al. The impact of the design of MoO<sub>3</sub> nanorods on the bactericidal performance. *Appl. Surf. Sci.* **2025**, 684, 161889–161899.

21. Aziri, S.; Bozetine, H.; Meziane, S.; Allam, D.; Berkane, N.; Bakri, R.; et al. Screening and optimization of the most influencing factors during the photodegradation of Rhodamine B by zinc oxide photocatalyst: application of Plackett–Burman and central composite designs. *Reac. Kinet. Mech. Cat.* **2024**, 137(4), 2395–2414.

22. Al-Zaqri, N. Highly operative near full spectrum Cu doped NiO/ZnO photocatalyst: Photodegradation of phenol and organic dyes. *Opt. Mater.* **2023**, 143, 114139–114148.