

AVALIAÇÃO DO GRAU DE INTUMESCIMENTO E AÇÃO NEMATICIDA DE HIDROGÉIS DE POLIACRILAMIDA COM NANOPARTÍCULAS DE COBRE

Andressa M. C. Paiva^{1*}; Daniel R. A. A. dos Santos¹; Felipe A. A. Martins²; Juliano E. Oliveira³

¹ Programa de Pós Graduação em Agroquímica, Departamento de Química (DQI), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras - MG

²Ensino médio (3º ano), Escola Estadual Firmino Costa, Lavras - MG

³Departamento de Engenharia Química e de Materiais (DQM) – Universidade Federal de Lavras, UFLA

andressaapaiva8@gmail.com

Palavras-Chave: rede polimérica, nematoides, nanoestruturas.

Introdução

Estima-se que, até 2030, o número de habitantes do mundo alcance os 8,5 bilhões e ampliar a produtividade agrícola é fundamental para garantir segurança alimentar para todas as pessoas. O setor agrícola enfrenta diversos desafios, como doenças desencadeadas por fungos e bactérias. Elas reduzem o rendimento das lavouras, comprometendo a produção de alimentos em larga escala. Um dos causadores de doenças são os nematoides, parasitas de plantas, que afetam principalmente suas raízes (ULAŞ; YÜKSEL; DINÇER; DABABAT *et al.*, 2025). Dessa forma, é importante encontrar materiais sustentáveis, que auxiliem no controle dessas pragas, sem prejudicar o meio ambiente.

O uso de nanopartículas (NPs) no controle de doenças em culturas agrícolas é uma perspectiva promissora para atenuar impactos negativos causados por fitopatógenos. Entre as diversas NPs, as metálicas têm demonstrado elevada eficácia no controle de nematoides, como as nanopartículas de cobre (NPsCu) (FABIYI; BELLO; LATEEF; ABIODUN *et al.*, 2024). As NPs podem ser sintetizadas a partir de fontes biológicas, como plantas. Além de diminuir custos, toxicidade e riscos ao meio ambiente, a síntese biológica de NPs é mais simples e sustentável (ULAŞ; YÜKSEL; DINÇER; DABABAT *et al.*, 2025). Uma forma de aplicar essas NPs no solo, é por sua incorporação em hidrogeis. Eles são ótimas matrizes para a incorporação de nanoestruturas, tronando-se um sistema mais ecológico, afim de substituir nematicidas convencionais.

Os hidrogeis consistem em redes poliméricas hidrofílicas, ou seja, com elevada capacidade de absorver e reter volumes de água, propriedade conhecida como grau de intumescimento/inchaço. Possui textura macia e úmida na presença da água e, em função de seu alto teor hídrico, tem despertado interesse em diversas aplicações, como engenharia, biologia, liberação controlada de fármacos e na agricultura (SONG; JUNG; CHO; CHO *et al.*, 2025). No setor agrícola, o hidrogel pode auxiliar no estresse hídrico de plantas. Como é um polímero superabsorvente (SAP), ele pode manter a água retida no solo e disponibilizar para as plantas. Esse processo aumenta o teor de água no solo, podendo diminuir os ciclos de irrigação (RAMADAN; EL-KARAMANY; ABDALLAH; BAKRY *et al.*, 2025).

A síntese de hidrogeis, majoritariamente, acontece por reações de polimerização radicalar, envolvendo monômero, reticulador, iniciador e água. Essa reação é caracterizada por cadeias heterogêneas e defeitos na rede polimérica. A sequência da formação do polímero é

basicamente a formação da cadeia pelos monômeros e, após, uma rede é formada através dos pontos de reticulação (GUO; ZHU; CHEN; QU, 2025).

Diante das informações, o objetivo geral do trabalho foi produzir hidrogéis à base de poliacrilamida, por meio de síntese radicalar. Sendo assim, incorporar diferentes concentrações de NPsCu oriundas da curcumina, através de uma síntese verde. Com a obtenção desses materiais, avaliou-se o efeito da concentração das nanopartículas no grau de intumescimento dos materiais e sua eficiência no controle de nematoides.

Material e Métodos

- Produção dos hidrogéis

Os hidrogéis foram produzidos a partir de uma síntese verde via polimerização radicalar. Os reagentes foram: acrilamida (AAM); suspensão de nanopartículas de cobre; água deionizada; solução de N, N' - metilenobisacrilamida (MBAAm) 0,01g/10mL; solução de persulfato de amônio (APS) 0,1g/10mL e tetrametilenodiamina (TEMED). Foram adicionadas concentrações de 5, 10 e 20% (v/v%) de NPsCu nas matrizes poliméricas. Além disso, foi produzido o hidrogel com 0% de nanopartícula, totalizando 4 tratamentos: PAAm/NPsCu0; PAAm/NPsCu5; PAAm/NPsCu10 e PAAm/NPsCu20. Todas as quantidades estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Relação dos reagentes adicionados na síntese dos hidrogéis. Fonte: Da Autora (2025).

Reagentes	AAM (g)	MBAAm (mL)	APS (mL)	TEMED (uL)	Água (mL)	NP-Cu (mL)
Amostras						
PAAm/NPsCu0	7,5	10	10	40	50	0
PAAm/NPsCu5	7,5	10	10	40	47,5	2,5
PAAm/NPsCu10	7,5	10	10	40	45	5
PAAm/NPsCu20	7,5	10	10	40	40	10

Após a síntese, 20mL de cada amostra foram vertidos em moldes de silicone e colocados em estufa por 48 horas a 35°C.

- Grau de intumescimento

O grau de intumescimento foi avaliado pelo teste de absorção de água baseado na norma ASTM D540, utilizada para avaliar a absorção de água em polímeros. Os hidrogéis de poliacrilamida com 0, 5, 10 e 20% de nanopartículas de cobre foram pesados, inseridos em 30mL de água destilada e colocados na incubadora a 23°C com rotação de 100 RPM. Sendo assim, os materiais foram pesados nos intervalos de 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 720, 1440 e 2880 minutos. O grau de intumescimento (I%) foi calculado a partir da Equação 1.

$$I(\%) = \frac{m_f - m_i}{m_i} * 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde m_f é a massa do hidrogel inchado e m_i a massa seca.

- Teste de ação nematicida

Para a realização do teste de ação nematicida in vitro, foram utilizados nematoides *Panagrellus sp.* Todos os hidrogéis foram imersos numa suspensão contendo os nematoides e

esse sistema ficou na incubadora por 24 horas a 25°C. Para a comparação e verificação da eficácia dos materiais, foi feito um branco, com ausência de hidrogel. Após as 24 horas, 50 µL da suspensão foi colocada em lâminas e contadas num microscópio (Biofocus – 110 V) na objetiva 4x e em triplicata. A taxa de mortalidade (%) foi calculada pela diferença da quantidade de nematoides antes e após as 24 horas em contato com os hidrogeis.

Resultados e Discussão

Os hidrogeis foram produzidos com sucesso. Os resultados da análise de intumescimento mostraram que as amostras absorvem quantidades significativas de água, logo nas primeiras horas de experimento, como mostra a Figura 1.

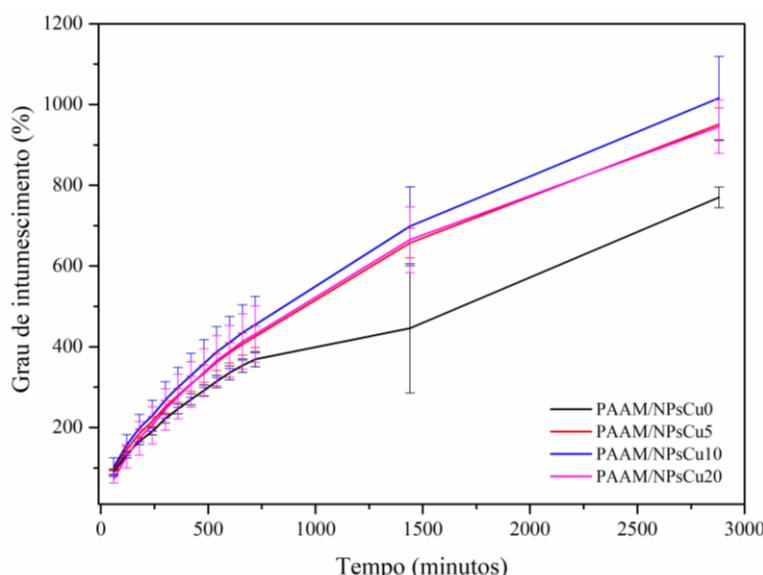


Figura 1. Grau de intumescimento (%) dos materiais *x* tempo (minutos). Fonte: Da Autora (2025).

A amostra com 0% de nanopartículas apresentou com o menor teor de absorção de água. PAAM/NPsCu5 e PAAM/NPsCu20 apresentaram comportamentos semelhantes e, PAAM/NPsCu10 mostrou-se como o material com o maior grau de inchaço. Fica evidente que a adição de NPsCu nas matrizes poliméricas aumentou significativamente a taxa de intumescimento dos hidrogeis. Tal acontecimento pode ser justificado pela interação dos grupos amida presentes nas cadeias poliméricas do hidrogel com os íons cobre das NPs. Essa reação aumentou a polaridade, favorecendo a adsorção de mais moléculas de água.

Outra propriedade essencial no intumescimento de hidrogeis é sua pressão osmótica. Existem íons na rede polimérica que geram um desequilíbrio osmótico em relação ao meio externo (PEIGHAMBARDOUST; SAFARZADEH, 2023). Quando há a presença de nanopartículas, essa pressão osmótica pode ser neutralizada, aumentando os espaços de alojamento livres dentro da matriz polimérica, fazendo com que as moléculas de água se fixem (DE OLIVEIRA; CAMPOS; CAMARA; DELLA VECHIA *et al.*, 2020).

Como mencionado, a amostra com 10% de nanopartículas apresentou-se com o maior grau de intumescimento. Tal fato pode ser devido à maior interação com as NPsCu, o que aumentou a quantidade de sítios ativos para entrada das moléculas de água. Enquanto que, os hidrogeis com 5 e 20% tiveram menor teor de inchaço, que pode ser justificado pela maior reticulação da rede polimérica durante a síntese, levando ao menor intumescimento (SARAVANAN; HARI; DURAI; BRZEZINSKI *et al.*, 2025).

Os resultados do teste de ação nematicida estão mostrados na Figura 2.

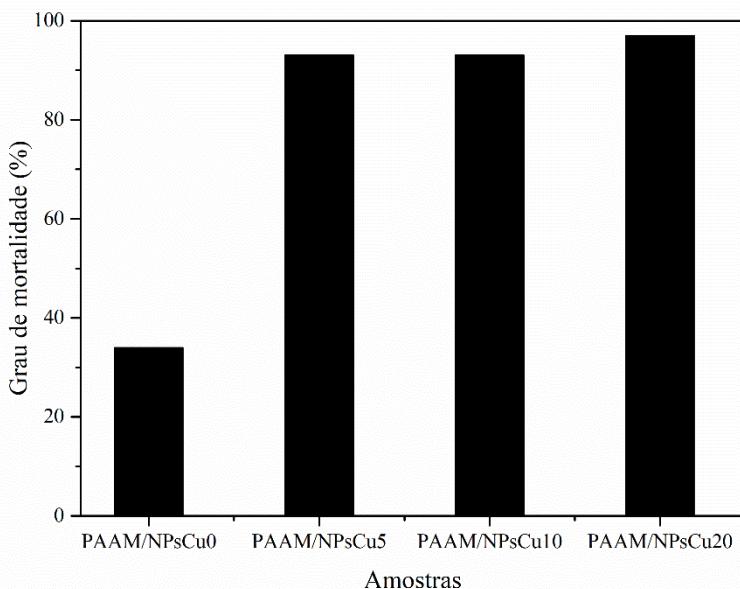


Figura 2. Grau de mortalidade dos nematoides para cada amostra. Fonte: Da Autora (2025).

Os resultados mostraram bastante sucesso no controle dos nematoides. O hidrogel com 0% de NPsCu apresentou a menor taxa de mortalidade, com cerca de 34%. Os hidrogeis com 5, 10 e 20% apresentaram grau de mortalidade de 93, 93 e 97%. Assim como as nanopartículas de prata, as NPsCu são carregadas positivamente. Essas cargas positivas se atraem pelas cargas negativas presentes na cutícula dos nematoides, debilitando sua estrutura e afetando seu desenvolvimento. Além disso, essas nanoestruturas podem promover a produção de metabólitos secundários responsáveis pelo sistema de defesa das plantas, aumentando sua resistência aos nematoides (ULAŞ; YÜKSEL; DINÇER; DABABAT *et al.*, 2025).

Conclusões

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que os hidrogeis de poliacrilamida tiveram seu grau de intumescimento aumentado com a incorporação de NPsCu. Além disso, apresentou-se como um material com ação nematicida em ensaios in vitro. Portanto, essa pode ser uma alternativa sustentável para aplicação na agricultura, tanto em ação nematicida, como no auxílio da retenção de água no solo.

Agradecimentos

Agradecimento à Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Laboratório de Materiais e Biossistemas (LAMAB), ao Laboratório de Polímeros, ao Departamento de Engenharia Química e de Materiais (DQM) e ao Departamento de Química (DQI-UFLA) pela estrutura necessária para realização dos experimentos. Ao CNPq, CAPES, , Rede Mineira de Valorização de Resíduos Sólidos, INCT-Circularidade em Materiais Poliméricos e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Referências

DE OLIVEIRA, J. L.; CAMPOS, E. V. R.; CAMARA, M. C.; DELLA VECHIA, J. F. *et al.* Hydrogels Containing Botanical Repellents Encapsulated in Zein Nanoparticles for Crop Protection. **ACS Applied Nano Materials**, 3, n. 1, p. 207-217, 2020/01/24 2020.

FABIYI, O. A.; BELLO, T. T.; LATEEF, A.; ABIODUN, O. A. *et al.* Evaluation of Borreria Verticillata (L.) Synthesized Copper, Iron and Zinc Nanoparticles Against Meloidogyne Incognita On Cowpea and the Effect On Cowpea Seed Quality. **Journal of Crop Health**, 76, n. 6, p. 1507-1518, 2024/12/01 2024.

GUO, Y.; ZHU, H.; CHEN, Z.; QU, S. The mapping relationship between initiator and mechanical properties of free radical polymerized hydrogels. **Extreme Mechanics Letters**, 77, p. 102327, 2025/06/01/ 2025.

PEIGHAMBARDOUST, S. J.; SAFARZADEH, H. Swelling behavior study of poly(methacrylic acid-co-acrylamide) nano-composite hydrogel adsorbents containing different nanoparticles. **Desalination and Water Treatment**, 298, p. 44-52, 2023/06/01/ 2023.

RAMADAN, A. A.; EL-KARAMANY, M. F.; ABDALLAH, M. M. S.; BAKRY, B. A. *et al.* Enhancing faba bean (*Vicia faba*) productivity under drought stress through modulation of physiological traits and antioxidant enzyme system using thiourea and hydrogel. **BMC Plant Biology**, 25, n. 1, p. 873, 2025/07/04 2025.

SARAVANAN, M.; HARI, B. N. V.; DURAI, R.; BRZEZIŃSKI, M. *et al.* Interpenetrating PVA hydrogels with rGO-Ag nanoparticles: In vitro biocompatibility and antibacterial properties. **Diamond and Related Materials**, 158, p. 112586, 2025/10/01/ 2025.

SONG, H.; JUNG, D. H.; CHO, Y.; CHO, H. H. *et al.* Nanoparticle-integrated hydrogels as versatile colorimetric sensors. **Coordination Chemistry Reviews**, 541, p. 216835, 2025/10/15/ 2025.

ULAŞ, F.; YÜKSEL, E.; DINÇER, D.; DABABAT, A. *et al.* Recent advances in plant-based green synthesis of nanoparticles: a sustainable approach for combating plant-parasitic nematodes. **Sustainability**, 17, n. 9, p. 4152, 2025.