

USO DE NANOPARTÍCULAS DE Co_3O_4 EM FOTODEGRADAÇÃO SUSTENTÁVEL DE CIPROFLOXACINO: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA CATALÍTICA

MSc. Osmar Vieira da Silva¹

Rafael Ravagnani da Costa¹

Dr. Lucas Danilo Dias¹

Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA¹

RESUMO

A persistência de antibióticos como a ciprofloxacina (CIP) em sistemas hídricos representa um grande desafio ambiental, contribuindo para a resistência antimicrobiana e a perturbação do ecossistema. Processos de oxidação avançados (POA), particularmente a fotocatalise com óxidos de metais de transição, oferecem alta eficiência e simplicidade operacional para a degradação de poluentes. As nanopartículas de Co_3O_4 apresentam alta capacidade catalítica podendo ser usadas na fotodegradação de fármacos. Este estudo teve como objetivo desenvolver um processo sustentável de fotodegradação de ciprofloxacino utilizando nanopartículas de Co_3O_4 sintetizadas de forma verde. Foram realizadas degradações do fármaco ciprofloxacino em condições na presença de nanopartícula de Co_3O_4 e ausência de luz, na presença de nanopartículas de Co_3O_4 e presença de luz, sem presença de luz e sem nanopartículas e sem nanopartículas com a presença de luz. Depois de degradadas as amostras foram analisadas utilizando cromatografia líquida de alta eficiência em fase reversa. A proposta alia inovação tecnológica e sustentabilidade, oferecendo um potencial recurso para o tratamento de águas residuárias da indústria farmacêutica.

Palavras-chave: Ciprofloxacino; Fotocatalise; Nanopartículas; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto e de águas residuárias contendo fármacos constitui um desafio para a sociedade moderna devido ao alto risco de contaminação do meio ambiente. Os antibióticos quando jogados na natureza sem o tratamento prévio adequado pode provocar o surgimento de bactérias resistentes aos medicamentos atuais. Para garantir que não haverá o surgimento da resistência bacteriana, tanto o fármaco como seus produtos de degradação devem ser decompostos de forma adequada [1,2]. A síntese verde de nanopartículas constitui uma alternativa econômica e eficiente como fonte de novas substâncias para o tratamento desses resíduos [3]. O uso das nanopartículas de Co_3O_4 pode provocar degradações mais

rápidas, baratas e eficientes nos aspectos custos, tempo de exposição, eficiência e sustentabilidade [3,4]. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um novo processo de degradação sustentável do fármaco ciprofloxacino utilizando Co_3O_4 combinado com a exposição à luz.

MATERIAIS E MÉTODOS

CIP e NPs de Co_3O_4 biossintetizados com extrato de folhas de café foram adicionados a um béquer contendo 30 mL de água (com pH em torno de 3) e agitados magneticamente a 25 °C. Em intervalos de tempo específicos, uma alíquota de 3 mL foi coletada, filtrada e analisada por HPLC utilizando metodologia analítica validada para essa finalidade. Para experimentos envolvendo irradiação luminosa (quando aplicada), foi utilizada uma lâmpada fluorescente com irradiância de 4,82 mW/cm².

RESULTADOS

O perfil de degradação fotocatalítica do CIP sob quatro condições experimentais distintas foi monitorado por 72 h e determinado pela medição da razão de concentração normalizada (C_f/C_0). O experimento controle, no qual o CIP foi incubado sem qualquer tratamento, revelou redução insignificante na concentração ao longo do experimento, confirmando a estabilidade química. Da mesma forma, a exposição apenas à luz fluorescente produziu degradação mínima, indicando que o ciprofloxacino é resistente à fotólise sob as condições de iluminação fluorescente empregadas. Em contraste, a introdução de nanopartículas de óxido de cobalto (Co-NPs) sozinhas aprimorou significativamente o processo de degradação.

A degradação mais eficiente foi alcançada sob o tratamento combinado de NPs de Co_3O_4 e luz fluorescente, o que resultou em uma redução rápida e substancial em C_f/C_0 , culminando em degradação quase completa ($C_f/C_0 < 0,1$) ao final do experimento. Esse efeito aditivo sugere que a irradiação de luz pode aumentar a atividade catalítica das nanopartículas, possivelmente promovendo a geração de pares elétron-lacuna ou facilitando reações redox na superfície das nanopartículas para gerar ROS.

Para determinar a cinética de degradação do ciprofloxacino sob diferentes condições experimentais, análises de regressão linear foram realizadas usando três modelos cinéticos clássicos: ordem zero (C_f/C_0 vs. t), primeira ordem ($\ln(C_f/C_0)$ vs. t) e segunda ordem ($1/(C_f/C_0)$ vs. t). O modelo com o maior coeficiente de determinação (R^2) foi considerado indicativo da ordem de reação mais representativa para cada condição. Além disso, a constante de velocidade (k) foi derivada da inclinação da respectiva curva de regressão linear. Para o grupo controle (ciprofloxacino isoladamente) e o grupo exposto apenas à luz fluorescente, nenhuma degradação significativa foi observada em 72 horas. Consequentemente, a modelagem cinética foi considerada não aplicável para essas condições.

O grupo tratado com nanopartículas de óxido de cobalto (NPs de Co_3O_4) apresentou uma redução significativa na concentração de ciprofloxacino, atingindo mais de 90% de degradação em 72 horas. Entre os três modelos cinéticos aplicados, o modelo de segunda ordem forneceu o melhor ajuste ($R^2 = 0,9924$), sugerindo que a taxa de degradação é dependente tanto da concentração de ciprofloxacino quanto dos sítios catalíticos ativos. A constante cinética de segunda ordem foi calculada como $k = 2 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. A combinação de NPs de Co_3O_4 com luz fluorescente resultou em degradação ainda mais pronunciada, com 98,5% do antibiótico removido após 72 h. Neste caso, a degradação seguiu um perfil cinético de primeira ordem ($R^2 = 0,9869$), indicando que a etapa limitante da taxa é diretamente proporcional à concentração de ciprofloxacino. A constante de velocidade correspondente foi determinada como $k = 9 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$, reforçando o papel aditivo da fotoativação na intensificação do processo catalítico.

No geral, os dados cinéticos corroboram o potencial catalítico das NPs de Co_3O_4 na remoção de CIP de sistemas aquosos e destacam a eficácia aprimorada em condições fotoassistidas. A mudança no comportamento cinético de segunda ordem no tratamento com NPs de Co_3O_4 no escuro para primeira ordem sob iluminação sugere uma mudança no mecanismo de degradação, potencialmente envolvendo ROS fotogerados ou reações redox de superfície aprimoradas na interface das nanopartículas.

CONCLUSÃO

Neste estudo, demonstramos que nanopartículas de óxido de cobalto (NPs de Co_3O_4), sintetizadas usando extratos de folhas de *C. arabica* L., demonstram alta eficiência na degradação fotocatalítica de ciprofloxacino (CIP). Na ausência de luz, a degradação seguiu cinética de segunda ordem ($R^2 = 0,9924$; $k = 2 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$) com 90,4% de remoção em 72 h. Sob luz fluorescente, a reação mudou para cinética de primeira ordem ($R^2 = 0,9869$; $k = -9 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$), atingindo 98,5% de degradação. Condições de controle e somente luz resultaram em remoção mínima ($\leq 8\%$). No geral, o sistema catalítico baseado em nanopartículas de Co_3O_4 provou ser uma estratégia eficaz e sustentável para a remoção de antibiótico com altas taxas de degradação. Esses resultados corroboram sua aplicação em tecnologias avançadas de tratamento de água visando resíduos de fluoroquinolonas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) (201810267001556 e *Inovação, Desenvolvimento e Sustentabilidade: Estreitamento entre Universidade e Setor Produtivo no Estado de Goiás* – Convênio para pesquisa, desenvolvimento e inovação — PD&I 07/2020, chamada pública nº 04/2023 — Programa de Auxílio à Pesquisa Científica e Tecnológica — aquisição de equipamentos, Chamada Pública FAPEG 12/2023 CAPES/FAPEG — Rede de Pesquisa e Desenvolvimento da Região Centro-Oeste — Processo 202410267000982), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (88887.710665/2022-00, 8887.820460/2023-00), FAPEG edital 21/2024 – Chamada Pública de Auxílio (2024), FAPEG Nº 23/2025 – Programa de Auxílio à Pesquisa – Apoio à Consolidação de Centros de Pesquisa Emergentes, FAPEG/SES Nº 18/2025 – Edital de Apoio à Pesquisa – Inovações Tecnológicas para o Controle Vetorial de Arboviroses, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Bolsa de Produtividade/303307/2025-0) e Projeto Inova Talentos (IEL/CNPq/Laboratório Teuto). Osmar Vieira da Silva e Rafael Ravagnani Costa agradecem ao Programa Inova Talentos/Laboratório Teuto, CNPq e IEL/GO pela bolsa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. GHAZAL. Pharmaceuticals contamination in the environment, *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 103 (2023) 104251. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2023.104251>.
- [2] B. GWOREK, M. KIJEŃSKA, J. WRZOSEK, M. GRANIEWSKA, Pharmaceuticals in the Soil and Plant Environment: a Review, *Water. Air. Soil Pollut.* 232 (2021) 145. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04954-8>.

[3] J.J. LÓPEZ-PEÑALVER, M. SÁNCHEZ-POLO, C.V. GÓMEZ-PACHECO, J. RIVERA-UTRILLA, Photodegradation of tetracyclines in aqueous solution by using UV and UV/H₂O₂ oxidation processes, J. Chem. Technol. Biotechnol. 85 (2010) 1325–1333. <https://doi.org/10.1002/jctb.2435>.

[4] F. QUDDUS, A. SHAH, F.J. IFTIKHAR, N.S. SHAH, A. HALEEM, Environmentally Benign Nanoparticles for the Photocatalytic Degradation of Pharmaceutical Drugs, Catalysts 13 (2023) 511. <https://doi.org/10.3390/catal13030511>.