Avaliação da Eficiência de Adsorventes Naturais e Modificados na Remoção de Contaminantes Emergentes em Sistema de Leito Fixo

Paulo Jorge Silva de Oliveira Junior (Bolsista PIBIC/CNPq) E-mail: ra133212@uem.br, João Victor Silva Baddini (Co-orientador). E-mail: pg56102@uem.br, Angélica Maequetotti Salcedo Vieira (Orientadora). E-mail: amsvieira@uem.br

Universidade Estadual de Maringá,Centro de Tecnologia (CTC), Maringá, PR

Área e subárea do conhecimento: Engenharia sanitária/Tratamento de águas de abastecimento e residuárias.

Palavras-chave: Zeólita modificada; Fluoxetina; Coluna de adsorção

RESUMO

O crescimento populacional e a intensificação das atividades humanas têm ampliado a demanda por recursos hídricos e a preocupação com a presença de contaminantes emergentes. Entre esses compostos, os fármacos têm recebido crescente atenção devido à sua detecção em ambientes aquáticos, destacando-se a fluoxetina, antidepressivo amplamente utilizado. Nesse cenário, a adsorção apresenta-se como uma alternativa eficiente para a remoção desses micropoluentes, enquanto sistemas de leito fixo possibilitam a aplicação do processo em regime contínuo e melhor aproveitamento do adsorvente. Este trabalho avaliou a aplicação de zeólita natural funcionalizada com prata e cobre por síntese verde, utilizando extrato de *Moringa oleifera*, na remoção de fluoxetina em coluna de leito fixo. A caracterização do material foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e potencial zeta, indicando alterações morfológicas e estruturais associadas à funcionalização e características favoráveis à adsorção de micropoluentes orgânicos. Nos ensaios em coluna, foram investigados os efeitos da vazão, altura do leito e concentração inicial, obtendo-se melhor desempenho nas condições de 6 mL/min, 8 cm e 20 mg/L, respectivamente. Nessa condição, o sistema apresentou tempo de saturação de 2600 min e capacidade adsortiva de 23,24 mg/g. Os resultados evidenciam o potencial da zeólita funcionalizada como adsorvente para aplicação em sistemas contínuos de tratamento de água.

INTRODUÇÃO

A problemática da contaminação dos recursos hídricos por poluentes emergentes alinha-se diretamente aos desafios globais abordados na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). Entre esses objetivos destaca-se o ODS 6 (água potável e saneamento), em especial a meta 6.3 que estabelece a melhora da qualidade da água através da redução da poluição e minimização da liberação de

produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas (Liu *et al*., 2025). Dentre os contaminantes de preocupação emergente, os fármacos de uso contínuo, como o cloridrato de fluoxetina, um antidepressivo amplamente prescrito, enquadra-se como um poluente a ser removido dos efluentes para melhora da qualidade dos recursos hídricos (Ghosh *et al*., 2024).

Neste contexto, a adsorção aparece como uma via de solução para o tratamento a contaminação por cloridrato de fluoxetina em água, desta forma, este trabalho tem como objetivo a avaliação da adsorção de fluoxetina através da zeólita impregnada com prata e cobre via síntese verde com extrato de *Moringa oleifera*, os testes ocorreram em coluna de leito fixo buscando avaliar os parâmetros ótimos de operação e sua máxima eficiência adsortiva, além de avaliações de comparação entre a zeólita natural e modificada buscando entender o impacto das modificações.

MATERIAIS E MÉTODOS

Síntese da zeólita funcionalizada e preparo da solução de contaminante (FLX)

A zeólita natural (ZN, 1 mm) foi obtida da Celta Brasil. A funcionalização in situ foi realizada por síntese verde utilizando nitrato de prata (AgNO□) e nitrato de cobre (Cu(NO□)□), ambos na proporção de 1:10 (m/v), com extrato de folhas de Moringa oleifera (1:10) como agente redutor. As folhas foram coletadas manualmente e secas a 60 °C para obtenção do extrato fenólico. A mistura permaneceu 24 h em agitador orbital (TECNAL TE-4200), seguida de lavagem. As soluções de fluoxetina foram preparadas a partir de solução estoque (200 mg/L) e analisadas por UV-Vis (HACH DR6000; 230 nm).

Caracterização dos adsorventes

As caracterizações da zeólita natural e da zeólita funcionalizada foram conduzidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV; Shimadzu SuperScan SS-550), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR; 400–4000 cm^{-1}, Thermo Fisher Scientific Inc.), potencial zeta (pH 2–12, Beckman Coulter Delsa™ Nano UI).

Ensaio adsortiva em coluna de leito fixo

Os ensaios em coluna de leito fixo foram realizados com solução de fluoxetina em concentrações iniciais (C0) de 10, 20 e 30 mg/L, utilizando bomba peristáltica em fluxo ascendente. A coluna (reator tubular de diâmetro interno de 16 mm) foi empacotada com zeólita funcionalizada em alturas de leito de 8, 10 e 12 cm. Foram avaliados os efeitos da vazão (2, 4 e 6 mL/min), da altura do leito e da concentração inicial. Ao longo dos ensaios, a concentração efluente (Ct) foi determinada por espectroscopia UV-Vis (HACH DR6000), permitindo a construção das curvas de ruptura. A partir dessas curvas foram obtidos a capacidade adsortiva, a porcentagem de remoção, o tempo de ruptura e o tempo de saturação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a avaliação nos testes em coluna foram variados os parâmetros de vazão, altura de leito e concentração de contaminante, nesta ordem, tentando buscar os

parâmetros ótimos de operação da coluna baseados na máxima capacidade adsortiva (q_e),se utilizando a metodologia de ensaio em coluna de leito fixo citado nos materiais e métodos deste trabalho, selecionando o parâmetro de máxima relação massa de contaminante adsorvida / massa de adsorvente, obtendo assim:

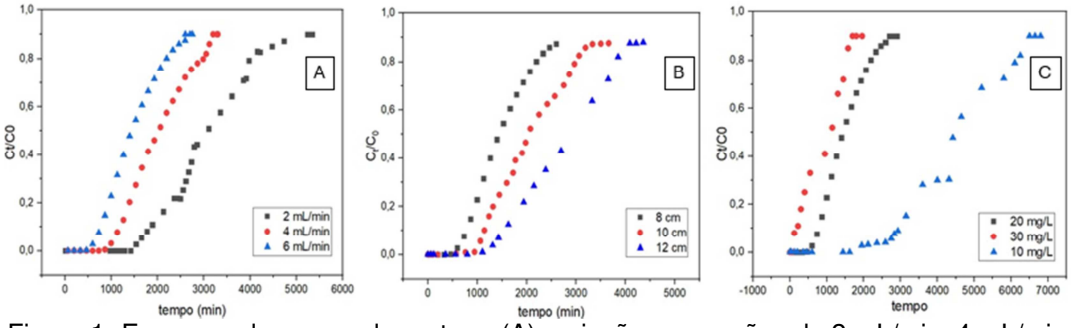


Figura 1 -Esquema de curvas de ruptura: (A) variação nas vazões de 2 mL/min, 4 mL/min, 6 mL/min a uma altura de leito de 8 cm e C_0=30 mg/L; (B) variação nas alturas de leito de 8 cm,10 cm e 12cm a 6 ml/min e C_0= 30 mg/min; (C) variação nas concentrações de contaminante de 10 mg/L, 20 mg/L, 30 mg/L a 6 mL/min e 8 cm de altura de leito

Com estes testes foi possível chegar a máxima capacidade adsortiva variando os parâmetros de altura, vazão e concentração inicial, obtendo os parâmetros ótimos de 6 ml/min, 8 cm de altura de leito e 20 mg/L de concentração inicial.
Para tentar encontrar evidências e hipóteses de como as modificações submetidas ao material puderam melhorar sua capacidade adsortiva se utilizou de métodos instrumentais para tentar encontrar essas evidências, obtendo assim:

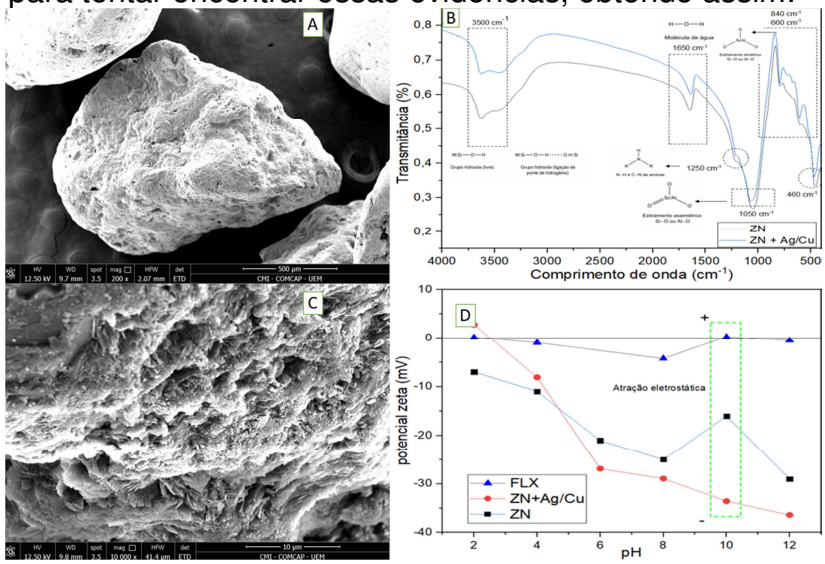


Figura 2 -Esquema de avaliações instrumentais:(A) Ampliação de 200 vezes na zeólita modificada(MEV); (B)espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier em zeólita natural e modificada (Ag+Cu);(C) Ampliação de 10.000 vezes na zeólita modificada (MEV); (D) Teste de potencial zeta em zeólita natural e modificada e em cloridrato de fluoxetina

Com as imagens da análise MEV (A) e (C), podemos notar a superfície irregular da zeólita e na imagem mais ampliada (C) , a presença de cristais que podem evidenciar a impregnação metálica desejada, no teste de espectrofotometria comparativo da zeólita natural e modificada é possível observar diferenças nas

intensidades de picos e vales dos materiais evidenciando a mudança da presença de grupos funcionais, que mostram uma alteração vinda da impregnação por prata e cobre, já na imagem (D) do esquema é possível notar a diferença dos potenciais zeta em diferentes pH, onde o material modificado apresenta maior diferença de potencial zeta do contaminante quando comparado ao natural, fator este que pode ajudar a explicar sua melhor capacidade adsortiva.

CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível avaliar a capacidade de adsorção da zeólita com o contaminante cloridrato de fluoxetina, mediante a impregnação com prata e cobre por síntese verde, em coluna, e encontrar parâmetros de máxima eficiência deste sistema em leito fixo, obtendo assim uma vazão ótima de operação de 6 ml/min, uma altura de leito ótima de 8 cm e uma concentração de contaminante ótima de 30 mg/L.
Também foi possível buscar evidências de como as modificações feitas na zeólita alteram sua capacidade adsortiva pelos testes comparativos de potencial zeta em que o material modificado apresenta maior diferença de potencial com o contaminante, o FTIR que demonstra mudanças de picos que evidenciam alterações na intensidade dos grupos funcionais, e, análise MEV que demonstram cristalização em meio a superfície do material evidenciando a impregnação dos metais na zeólita.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de iniciação científica PIBIC. Também à Universidade Estadual de Maringá (UEM), ao Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental (LGCPA) e a todos os seus integrantes pelo apoio estrutural, colaboração e auxílio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

GHOSH, R. *et al.* Occurrence, fate, transport, and removal technologies of emerging contaminants: a review on recent advances and future perspectives. **CLEAN – Soil, Air, Water**, v. 52, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/clen.202300259.

LIU, W. *et al.* Global overlooked multidimensional water scarcity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 122, 2025. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.2413541122.