

TRATAMENTO DE EFLUENTES CONTENDO FÁRMACOS ATRAVÉS DE ADSORÇÃO EM HIDROGEL PRODUZIDO A PARTIR DAS CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E ALGINATO

VITÓRIA BÔAVENTURA MIDON ^{1,2*}, YAGO VITÓRIO COLARES PINTO ^{2,3},
BIANCA TRINDADE OLDONI ^{2,4}, KAUÊ CÂMARA LEAL DE OLIVEIRA ^{2,5},
EDUARDO PAVAN KORF ^{2,6}, GEAN DELISE LEAL PASQUALI ^{2,7}

1 Introdução

O crescimento populacional e industrial tem intensificado a contaminação de matrizes aquáticas por fármacos, como o bromazepam, gerando riscos aos ecossistemas devido à sua persistência ambiental e a ineficácia dos tratamentos convencionais na sua remoção. Diante desse desafio, a adsorção destaca-se como uma tecnologia versátil e de baixo custo, sendo potencializada pelo uso de biopolímeros sustentáveis, como o alginato, integrados a resíduos agroindustriais como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), permitindo o desenvolvimento de hidrogéis eficientes e alinhados aos princípios da economia circular (Islam et al., 2024). No presente estudo, foi desenvolvido e caracterizado de um hidrogel de alginato-CBCA, voltado à remoção de bromazepam, buscando suprir a lacuna científica sobre o tratamento de benzodiazepinas com compósitos de origem residual.

2 Objetivos

Desenvolver e avaliar um hidrogel de alginato incorporado com cinzas do bagaço de cana-de-açúcar para a remoção de bromazepam em meio aquoso.

3 Metodologia

-
- 1 Graduanda, Universidade Federal fronteira Sul, *campus Erechim*, vitoria.midon@estudante.uffs.edu.br
 - 2 Grupo de Pesquisa: REGEOAMB
 - 3 Doutorando(a), Universidade Federal fronteira Sul, *campus Erechim*,
 - 4 Doutorando(a), Universidade Federal fronteira Sul, *campus Erechim*,
 - 5 Graduando, Universidade Federal fronteira Sul, *campus Erechim*
 - 6 Professor, Doutor, Universidade Federal fronteira Sul, *campus Erechim*
 - 7 Professora, Doutora, Universidade Federal fronteira Sul, *campus Erechim*, orientadora

O hidrogel híbrido foi produzido a partir de alginato de sódio e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), empregando uma metodologia adaptada de Lee et al. (2023), com formação do material por gelificação iônica. Para sua preparação, 4 g de alginato de sódio foram dissolvidos em 100 mL de água destilada, aos quais foram incorporados 20 g de CBCA. A suspensão foi gotejada para formação de esferas, posteriormente imersas em solução de CaCl_2 a 2% (m/v) por 2 h para a cura. Após esse período, as esferas foram lavadas com água destilada e armazenadas sob refrigeração até sua utilização.

A caracterização estrutural foi realizada por Difração de Raios X (DRX), comparando-se o hidrogel antes (HG-CBCA) e após a adsorção de bromazepam (HG-CBCA/BRM). As amostras foram congeladas a $-20\text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h, liofilizadas a $-45\text{ }^\circ\text{C}$ por 72 h e posteriormente pulverizadas. As análises foram realizadas em difratômetro Rigaku Miniflex 300, utilizando radiação $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,54184\text{ \AA}$). Para a avaliação cinética, foram realizados ensaios em sistema de batelada, utilizando 20 g de hidrogel, concentração inicial de bromazepam de 1 mg L^{-1} e temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$, sob diferentes condições de pH (4,0; 4,5 e 5,0), conforme apresentado na Tabela 1. O tempo de contato variou de 0 a 1440 min, e o bromazepam residual foi determinado por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC).

Tabela 1. Condições experimentais utilizadas nos ensaios cinéticos.

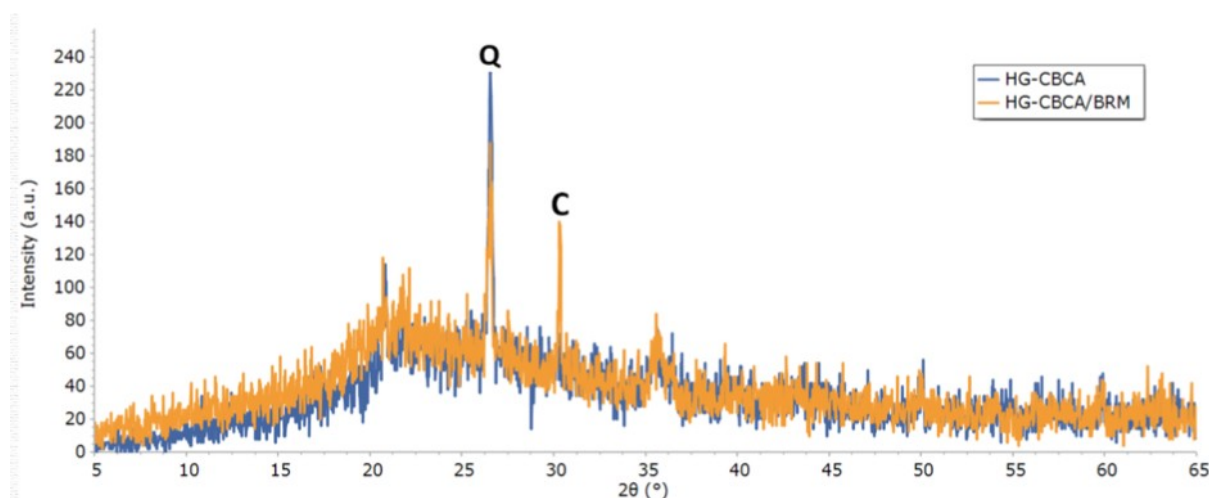
Condições experimentais					
Variáveis	pH	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Hidrogel (g)	Concentração (mg/L)	Tempo (min)
Cinética	4, 4,5 e 5	25	20	1	0 - 1440

4 Resultados e Discussão

Os difratogramas do hidrogel antes e após a adsorção de bromazepam são apresentados na Figura 1. Observa-se uma região ampla de difração, aproximadamente entre 15° e 35° em 2θ , característica da contribuição predominantemente amorfa da matriz de alginato e das frações amorfas da CBCA. Sobre essa região, destacam-se dois picos cristalinos, identificados como quartzo (Q) e calcita (C), associados à fração mineral presente na cinza. A comparação entre HG-CBCA e HG-CBCA/BRM demonstra a manutenção do perfil difratométrico após a adsorção, sem o surgimento de novos picos cristalinos bem definidos.

Esse comportamento indica que a adsorção do bromazepam não promoveu alterações estruturais expressivas na matriz do hidrogel, sugerindo a retenção do fármaco de forma dispersa ou não cristalina no material.

Figura 1: Difratomogramas de raios X do hidrogel antes da adsorção (HG-CBCA) e após a adsorção de bromazepam (HG-CBCA/BRM).

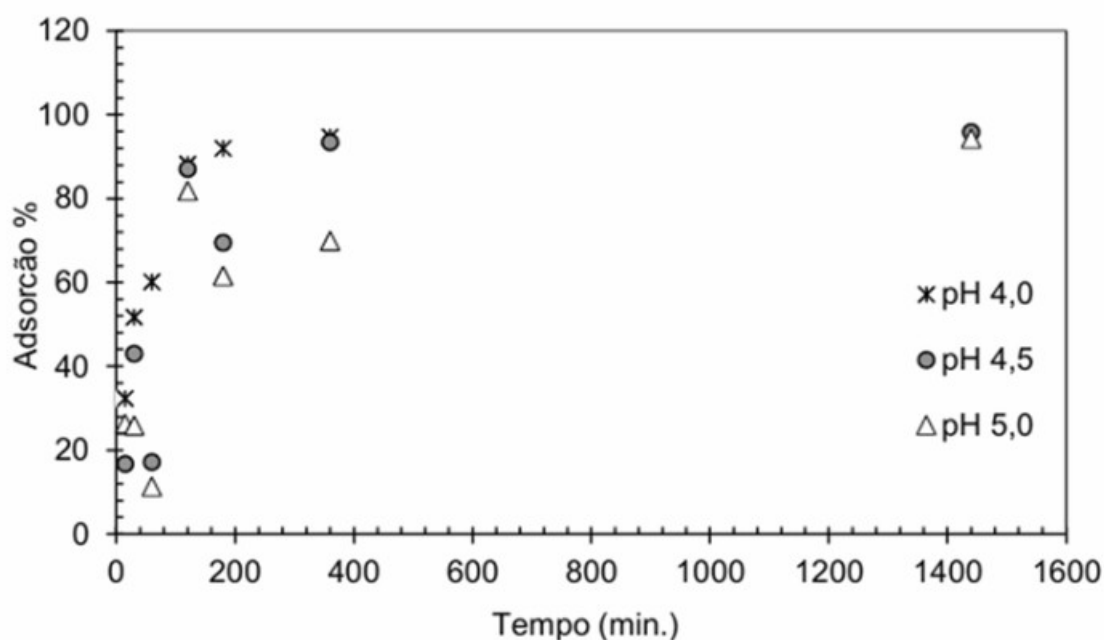


Fonte: Os autores, 2026.

A comparação entre os difratogramas permite observar que, apesar da presença das fases minerais cristalinas provenientes da CBCA, o hidrogel mantém caráter predominantemente amorfo. A manutenção dos principais sinais após o processo de adsorção indica que a estrutura mineralógica do compósito permaneceu preservada, permitindo então avaliar o comportamento do material durante a retenção do bromazepam.

A Figura 2 apresenta a cinética de adsorção do bromazepam pelo hidrogel em diferentes condições de pH. Observa-se que a adsorção ocorreu de maneira mais regular em pH 4,0, enquanto os ensaios em pH 4,5 e 5,0 apresentaram maior variação ao longo do tempo. Em pH 4,0, a adsorção aumentou nas etapas iniciais e apresentou tendência de estabilização nos maiores tempos de contato, atingindo aproximadamente 95% ao final de 1440 min. Esse comportamento indica que o pH influenciou a interação entre o bromazepam e o hidrogel, sendo a condição de pH 4,0 aquela que apresentou maior adsorção ao final do período avaliado.

Figura 2. Cinética de adsorção do bromazepam pelo hidrogel em diferentes condições de pH.



Fonte: Os autores, 2026.

De forma geral, os resultados cinéticos demonstram que o hidrogel apresentou capacidade de remoção do bromazepam ao longo do período avaliado, sendo o tempo de equilíbrio obtido em torno de 360 min, com comportamento mais regular em pH 4,0. A evolução da adsorção ao longo do tempo evidencia a influência simultânea das condições do meio e da disponibilidade de sítios de interação na retenção do fármaco, indicando que o sistema apresenta potencial para aplicação na remoção de bromazepam em meio aquoso.

5 Conclusão

O hidrogel de alginato incorporado com CBCA mostrou-se uma alternativa eficiente e sustentável para a remoção de bromazepam em meio aquoso. O adsorvente híbrido apresentou alta afinidade pelo fármaco e manteve eficiência superior a 88% após quatro ciclos de reutilização, evidenciando seu potencial para o tratamento de águas e a valorização de resíduos agroindustriais, consolidando-se como uma tecnologia sustentável que promove a economia circular.

Referências Bibliográficas

LEE, JEONG WOO ET AL. Esferas de hidrogel de alginato/carvão ativado/carboximetil celulose reaproveitáveis para adsorção de ibuprofeno a partir de soluções aquosas. International Journal of Biological Macromolecules, v. 249, p. 126053, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813023029483>

ISLÃ, SHAHID-UL; SHALLA, AABID HUSSAIN; KHAN, SALMAN AHMAD (ED.). Manual de Valorização da Biomassa para Aplicações Industriais. Hoboken: Scrivener Publishing LLC; John Wiley & Sons, 2022. <https://doi.org/10.1002/9781119818816>

Palavras-chave: Remoção; Adsorção; Contaminantes emergentes; Fármacos.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES 2025 - 0361 EDITAL Nº 72/GR/UFFS/2025.

Agradecimentos: UFFS- Campus Erechim

Financiamento: Universidade Federal da Fronteira Sul.

