



## APROVEITAMENTO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA PRODUÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS PARA REMOÇÃO DO HERBICIDA PICLORAM

Vitória F. O. Alvarenga<sup>1</sup>; Maria E. A. Barboza<sup>1</sup>; João A. T. Barboza<sup>1</sup>; Guilherme M. D. Ferreira<sup>1</sup>; Fabiano Magalhães<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Lavras, Departamento de Química, Instituto de Ciências Naturais, Lavras, Minas Gerais, Brasil, 37200-900

vfrancisca565@gmail.com

**Palavras-Chave:** Ativação física; Herbicida; Adsorção.

### Introdução

O bagaço de cana-de-açúcar é um dos principais resíduos da indústria sucroalcooleira e apresenta composição lignocelulósica favorável à produção de materiais carbonáceos com potencial adsorativo (Gopinath et al., 2018; Kumar; Upadhyay; Mishra, 2019; Naqvi et al., 2020). No contexto brasileiro, sua disponibilidade é expressiva, o que reforça seu interesse como precursor para a obtenção de carvões ativados de alto valor agregado, especialmente em rotas voltadas à valorização de resíduos agroindustriais (Pérez et al., 2025).

A produção de carvões ativados pode ocorrer por ativação química ou física, sendo esta última baseada no tratamento térmico do precursor na presença de gases oxidantes, como CO<sub>2</sub>, em temperaturas elevadas (Lima; Bigner; Wright, 2017; Moaseri et al., 2017; Saad et al., bentarf2022). Estudos anteriores mostram que carvões obtidos por ativação física com CO<sub>2</sub> apresentam elevada área superficial e bom desempenho adsorativo, evidenciando seu potencial para aplicações ambientais (Bentarfa et al., 2021; Giusto et al., 2017; Zaini et al., 2019).

Entre os contaminantes de interesse, destaca-se o picloram, um herbicida amplamente utilizado e caracterizado por alta mobilidade em solos e águas devido ao seu comportamento aniônico em pH próximo da neutralidade, o que favorece sua lixiviação e persistência ambiental (Loewy et al., 1999; Marco-Brown et al., 2019; Palma et al., 2004; Zhang et al., 2013). Diante disso, a adsorção em carvões ativados surge como alternativa promissora para sua remoção. Assim, este trabalho teve como objetivo produzir carvões ativados a partir do bagaço de cana-de-açúcar por ativação física com CO<sub>2</sub> proveniente de fonte alternativa, buscando uma rota sustentável e economicamente viável para a obtenção de adsorventes aplicáveis à remoção de picloram em efluentes aquosos. Ressalta-se que detalhes específicos da metodologia de produção dos materiais foram propositalmente omitidos ou generalizados devido à proteção de propriedade intelectual vinculada a parcerias institucionais e empresariais, que exigem sigilo.

### Material e Métodos

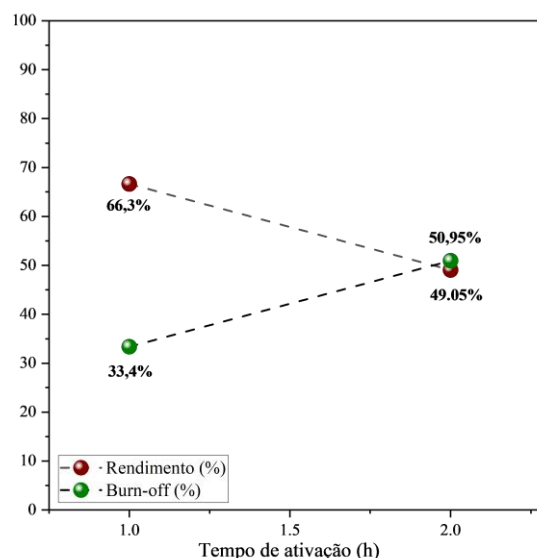
Os carvões foram ativados a partir do biocarvão obtido do bagaço de cana-de-açúcar por ativação física com CO<sub>2</sub>, por 1 e 2 horas a 800 °C sob atmosfera de N<sub>2</sub>. O rendimento dos carvões foi determinado a partir da razão entre a massa final ( $m_f$ ) obtida após cada etapa do

processo (pirólise ou ativação) e a massa inicial ( $m_i$ ) do precursor, em gramas. Os grupos funcionais superficiais dos carvões ativados foram avaliados por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR-ATR), na faixa de 650-4000  $\text{cm}^{-1}$ . A morfologia dos carvões ativados foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de ultra alta resolução utilizando o equipamento TESCAN CLARA com banho de carbono. Os estudos cinéticos foram realizados em pH 2,0 utilizando 10,0 mg dos carvões ativados (CA-1 e CA-2) em contato com 10,0 mL de solução de picloram (20,0  $\text{mg L}^{-1}$ ), sob agitação de 150 rpm a  $25 \pm 1$  °C, com tempos de contato entre 5 e 1440 min. As isoterms de adsorção foram obtidas nas mesmas condições experimentais, utilizando soluções de picloram com concentrações iniciais entre 20,0 e 400  $\text{mg L}^{-1}$ . Após os ensaios, as amostras foram centrifugadas e os sobrenadantes analisados por espectrofotometria UV-Visível em 223 nm.

## Resultados e Discussão

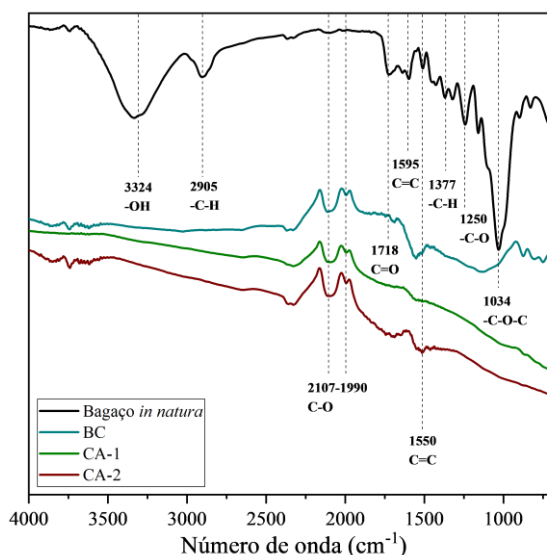
A Figura 1 apresenta os valores de rendimento e *burn-off* obtidos para os carvões ativados em função do tempo de ativação. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar o processo de ativação e compreender a relação entre a perda de massa do biocarvão precursor e o desenvolvimento da estrutura porosa dos materiais obtidos.

Figura 1 - Rendimento e burn-off dos carvões ativados CA-1, CA-2.



Os valores de rendimento e *burn-off* evidenciaram a influência do tempo de ativação sobre a oxidação do biocarvão e o desenvolvimento da estrutura porosa dos materiais. O aumento do tempo de ativação promoveu redução do rendimento e aumento do *burn-off*, indicando maior consumo da matriz carbonácea durante o processo. Para o CA-1, o baixo *burn-off* (<40%) sugere ativação limitada, com menor desenvolvimento poroso e maior preservação de massa. Já o CA-2 apresentou valores intermediários e praticamente equivalentes de rendimento e *burn-off*, indicando um equilíbrio entre preservação estrutural e formação de poros, condição favorável para obtenção de melhores propriedades adsorptivas.

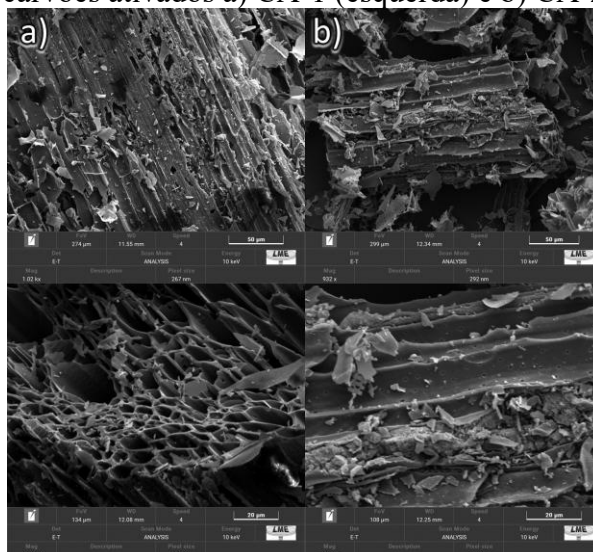
A Figura 2 apresenta os espectros de FTIR do bagaço de cana *in natura*, do biocarvão e dos materiais ativados em diferentes tempos (CA-1 e CA-2).



Os espectros de FTIR do bagaço *in natura* apresentaram bandas características de materiais lignocelulósicos, destacando-se 3324 cm<sup>-1</sup> (-O-H), 2905 cm<sup>-1</sup> (-C-H), 1718 cm<sup>-1</sup> (C=O), 1595 cm<sup>-1</sup> (C=C aromático), além das regiões entre 1510-1500 cm<sup>-1</sup>, 1375-1250 cm<sup>-1</sup> e das bandas em 1034 e 908 cm<sup>-1</sup> associadas a estruturas de lignina, celulose e hemicelulose. Após a carbonização, o BC apresentou redução significativa das bandas relacionadas a grupos oxigenados e alifáticos, além do desaparecimento quase completo da banda em 1718 cm<sup>-1</sup>, indicando aumento do caráter aromático da matriz carbonácea. Nos carvões ativados CA-1 e CA-2, observou-se intensificação das bandas aromáticas entre 1590-1510 cm<sup>-1</sup>, associadas a estruturas aromáticas condensadas, além do surgimento de bandas entre 2107-1990 cm<sup>-1</sup>, atribuídas a espécies de CO adsorvidas na superfície. Esses resultados indicam que a ativação promoveu maior reorganização estrutural e aromatização dos materiais.

Na Figura 3 (a-b), são apresentadas micrografias que evidenciam as características morfológicas dos carvões ativados.

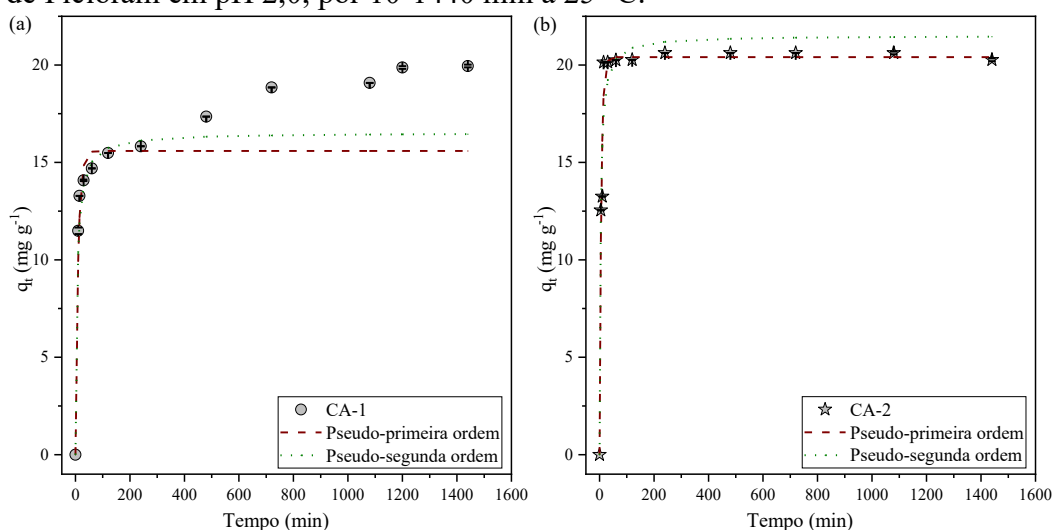
Figura 3. MEV dos carvões ativados a) CA-1 (esquerda) e b) CA-2 (direita).



As micrografias obtidas para os materiais CA-1 e CA-2 indicaram morfologias semelhantes, sem alterações estruturais expressivas entre as amostras. Observou-se a presença de partículas irregulares com diferentes dimensões, além de superfícies contendo fissuras, cavidades e regiões mais compactas. Também foram identificadas estruturas alongadas e organizadas, características remanescentes da biomassa lignocelulósica original, associadas à preservação parcial de fibras e arranjos lamelares típicos do bagaço de cana-de-açúcar.

A cinética de adsorção foi empregada para elucidar o mecanismo de remoção do herbicida picloram pelos carvões ativados, os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Cinética de adsorção dos carvões (a) CA-1 e (b) CA-2, utilizando 1 g L<sup>-1</sup> com 20 mg L<sup>-1</sup> de Picloram em pH 2,0, por 10-1440 min a 25 °C.

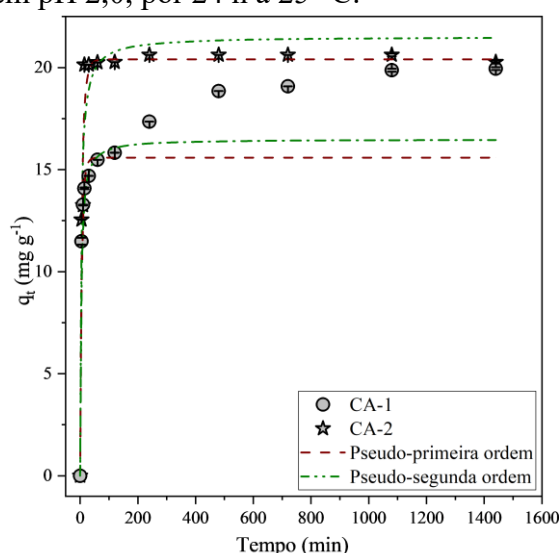


Os estudos cinéticos demonstraram rápida adsorção do picloram nos estágios iniciais para ambos os materiais. O CA-1 atingiu equilíbrio em aproximadamente 720 min, com capacidade máxima de adsorção de 19,75 mg g<sup>-1</sup>, enquanto o CA-2 alcançou equilíbrio mais

rapidamente, em cerca de 120 min, apresentando capacidade máxima de  $20,6 \text{ mg g}^{-1}$ . Os resultados indicam elevada afinidade entre adsorvente e adsorvato, além de maior velocidade de adsorção para o CA-2. O ajuste cinético mostrou melhor adequação do modelo de pseudossegunda ordem para o CA-1 e de pseudoprimeira ordem para o CA-2, sugerindo diferenças nos mecanismos predominantes de adsorção entre os materiais.

A Figura 5 são apresentadas as isotermas de adsorção do picloram nos carvões CA-1 e CA-2.

Figura 5 - Isoterma de adsorção dos carvões (a) CA-1 e (b) CA-2, utilizando  $1 \text{ g L}^{-1}$  com  $20\text{-}400 \text{ mg L}^{-1}$  de Picloram em pH 2,0, por 24 h a  $25^\circ\text{C}$ .



Os resultados das isotermas evidenciaram a saturação dos sítios adsorptivos em elevadas concentrações de picloram. De acordo com a classificação de Giles, o CA-1 apresentou isoterma do tipo L, associada à elevada afinidade inicial e formação de monocamada, enquanto o CA-2 exibiu isoterma do tipo H, indicando forte interação adsorvente-adsorvato mesmo em baixas concentrações de equilíbrio. O CA-2 apresentou maior capacidade adsorptiva experimental ( $259,3 \text{ mg g}^{-1}$ ) em relação ao CA-1 ( $131,6 \text{ mg g}^{-1}$ ), resultado associado ao maior desenvolvimento poroso e à maior disponibilidade de sítios ativos promovidos pelo maior tempo de ativação. Para o CA-1, o melhor ajuste foi obtido pelo modelo de Freundlich, sugerindo superfície heterogênea e adsorção em multicamadas.

## Conclusões

Os resultados obtidos demonstraram que a ativação física do bagaço de cana-de-açúcar utilizando  $\text{CO}_2$  proveniente de fonte alternativa foi eficiente para a produção de carvões ativados com propriedades favoráveis à adsorção de picloram. As análises de FTIR evidenciaram redução significativa de grupos oxigenados e aumento do caráter aromático dos materiais após a carbonização e ativação, indicando reorganização estrutural da matriz carbonácea. Os estudos cinéticos mostraram rápida adsorção do picloram, especialmente para o CA-2, que atingiu o equilíbrio em menor tempo e apresentou maior taxa inicial de adsorção. As isotermas evidenciaram elevada afinidade entre adsorvente e adsorvato, com destaque para



o CA-2, que apresentou capacidade máxima experimental de  $259,3 \text{ mg g}^{-1}$ , superior ao CA-1. Esse comportamento foi associado ao maior desenvolvimento poroso e à maior disponibilidade de sítios ativos promovidos pelo maior tempo de ativação. De modo geral, os resultados indicam que o aumento do tempo de ativação favoreceu o desenvolvimento estrutural dos carvões ativados e ampliou seu desempenho adsorptivo para remoção de picloram. Assim, a estratégia proposta apresenta potencial para aplicação no tratamento de efluentes contaminados com herbicidas, além de contribuir para o aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais e de fontes alternativas de  $\text{CO}_2$ .

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro. Agradecem também à Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Química, ao Laboratório de Inorgânica, ao Laboratório do Grupo de Materiais, Interfaces e Soluções (MATIS) pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizados para a realização deste trabalho.

### Referências

- BENTARFA, Djehad *et al.* Characterization of activated carbon prepared from date palm fibers by physical activation for the removal of phenol from aqueous solutions. **Desalination and Water Treatment**, v. 236, p. 190–202, 1 out. 2021.
- GIUSTO, Luana A. R. *et al.* Preparation of Activated Carbon from Sugarcane Bagasse Soot and Methylene Blue Adsorption. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 228, n. 7, 1 jul. 2017.
- GOPINATH, Athira *et al.* A circular framework for the valorisation of sugar industry wastes: Review on the industrial symbiosis between sugar, construction and energy industries. **Journal of Cleaner Production**, 1 dez. 2018.
- KUMAR, Mohit; UPADHYAY, S. N.; MISHRA, P. K. A comparative study of thermochemical characteristics of lignocellulosic biomasses. **Bioresource Technology Reports**, v. 8, 1 dez. 2019.
- LIMA, Isabel; BIGNER, Renee; WRIGHT, Maureen. Conversion of Sweet Sorghum Bagasse into Value-Added Biochar. **Sugar Tech**, v. 19, n. 5, p. 553–561, 1 out. 2017.
- LOEWY, Miriam *et al.* Groundwater contamination by azinphos methyl in the Ž. Northern Patagonic Region Argentina. **The Science of the Total Environment**.
- MARCO-BROWN, Jose L. *et al.* Adsorption of picloram on clays nontronite, illite and kaolinite: equilibrium and herbicide-clays surface complexes. *Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, v. 54, n. 4, p. 281–289, 3 abr. 2019.
- MOASERI, Ehsan *et al.* Effect of pretreatment process on the characteristics of activated carbons produced from chemical activation of scrap tire. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 36, n. 3, p. 796–801, 1 maio 2017.



NAQVI, Salman Raza *et al.* Assessment of agro-industrial residues for bioenergy potential by investigating thermo-kinetic behavior in a slow pyrolysis process. **Fuel**, v. 278, 15 out. 2020.

PALMA, Graciela *et al.* Pesticide levels in surface waters in an agricultural-forestry basin in Southern Chile. **Chemosphere**, v. 57, n. 8, p. 763–770, nov. 2004.

PÉREZ, Nestor Proenza *et al.* Unlocking the potential of sugarcane bagasse: a comprehensive analysis for advanced energy conversion. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2025.

SAAD, Roula Abi *et al.* Vanadium-Substituted Polyoxomolybdates for Methylene Blue Adsorption from Aqueous Solutions. **Journal of Cluster Science**, v. 33, n. 5, p. 2077–2083, 1 set. 2022.

ZAINI, Muhammad Abbas Ahmad *et al.* Effects of physical activation on pore textures and heavy metals removal of fiber-based activated carbons. *In*: Elsevier Ltd, 2019.

ZHANG, Jingyi *et al.* Adsorption of methyl parathion on PAC from natural waters: The effect of NOM on adsorption capacity and kinetics. **Adsorption**, v. 19, n. 1, p. 91–99, fev. 2013.