REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/3j6t4564
Pages: 1-26

ADSORÇÃO DO HERBICIDA COMERCIAL 2,4-DICLOROFENOXIACÉTICO (2,4- D) POR CARVÃO ATIVADO

ADSORPTION OF COMMERCIAL HERBICIDE 2,4-DICHLOROPHENOXYACETIC (2,4- D) BY ACTIVATED CARBON

ADSORCIÓN DE HERBICIDA COMERCIAL 2,4-DICLOROFENOXIACÉTICO (2,4- D) POR CARBÓN ACTIVADO

Sálua Helito Abumanssur
Graduada em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste de Paraná (UNIOESTE), Toledo, Brasil
E-mail: sah.helito@gmail.com

Schaline Winck Alberti
Mestre e doutoranda em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste de Paraná (UNIOESTE), Toledo, Brasil
E-mail: Schaline_swa@hotmail.com

Edson Antônio da Silva
Doutor em Engenharia Química, Docente da Universidade Estadual do Oeste de Paraná (UNIOESTE), Toledo, Brasil
E-mail: edsondeq@gmail.com

Plínio Ribeiro Fajardo Campos
Doutor em Engenharia Química, Docente da Universidade Estadual do Oeste de Paraná (UNIOESTE), Toledo, Brasil
E-mail: plinio.fajardo@hotmail.com

Resumo
O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a aplicabilidade e a eficiência do carvão ativado comercial na remoção do herbicida 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), considerado um contaminante emergente de preocupação ambiental, principalmente em sistemas aquosos. O estudo experimental foi conduzido de forma a compreender a influência de parâmetros operacionais como o pH e concentração inicial do contaminante, na capacidade de adsorção do material. Para complementar as análises, o carvão ativado foi caracterizado por meio das técnicas de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), as quais permitiram identificar os principais grupos funcionais e observar a morfologia do carvão. Os resultados demonstraram que o pH 8,0 foi o mais favorável para o processo, resultando na maior capacidade de adsorção ($q = 84{,}56$ mg g^{-1}). A cinética de adsorção ajustou-se melhor ao modelo de pseudo-segunda. O equilíbrio foi definido pela isoterma de Langmuir. Por fim, o carvão comercial apresenta elevada eficiência na remoção do 2,4-D, mostrando seu potencial para aplicação em sistemas de tratamento de água e efluentes contaminados por contaminantes orgânicos.
Palavras-chave: Contaminante emergente; herbicida; cinética de adsorção, isotermas; Tratamento de água.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

Abstract

The objective of this research was to evaluate the applicability and efficiency of commercial activated carbon in the removal of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D), considered an emerging contaminant of environmental concern, particularly in aqueous systems. The experimental study was conducted to understand the influence of operational parameters such as pH and initial contaminant concentration on the adsorption capacity of the material. To complement the analyses, the activated carbon was characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM), which enabled the identification of the main functional groups and the observation of the carbon morphology. The results demonstrated that pH 8.0 was the most favorable condition for the process, resulting in the highest adsorption capacity (q = 84.56 mg g^{-1}). The adsorption kinetics were better described by the pseudo-second-order model. The equilibrium was defined by the Langmuir isotherm. Finally, the commercial activated carbon exhibited high efficiency in the removal of 2,4-D, demonstrating its potential for application in water treatment systems and effluents contaminated with organic pollutants.
Keywords: Emerging contaminants; herbicide; adsorption kinetics, isotherms; Water treatment.

Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar la aplicabilidad y la eficiencia del carbón activado comercial en la remoción del herbicida ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), considerado un contaminante emergente de preocupación ambiental, principalmente en sistemas acuosos. El estudio experimental se llevó a cabo con el fin de comprender la influencia de parámetros operacionales como el pH y la concentración inicial del contaminante en la capacidad de adsorción del material. Para complementar los análisis, el carbón activado fue caracterizado mediante las técnicas de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), las cuales permitieron identificar los principales grupos funcionales y observar la morfología del carbón. Los resultados demostraron que el pH 8,0 fue el más favorable para el proceso, resultando en la mayor capacidad de adsorción (q = 84,56 mg g^{-1}). La cinética de adsorción se ajustó mejor al modelo de pseudo-segundo orden. El equilibrio fue descrito por la isoterma de Langmuir. Finalmente, el carbón comercial presentó alta eficiencia en la remoción de 2,4-D, mostrando su potencial para su aplicación en sistemas de tratamiento de agua y efluentes contaminados por contaminantes orgánicos.
Palabras clave: Contaminante emergente; herbicida; cinética de adsorción, isotermias; Tratamiento de agua.

1. Introdução

A intensificação do uso de herbicidas no setor agrícola tem contribuído para o aumento da contaminação de recursos hídricos por poluentes emergentes. O uso de defensivos químicos, especialmente herbicidas, tornou-se uma prática indispensável para o controle de pragas e para a manutenção da produtividade agrícola. Entre os herbicidas mais empregados, encontra-se o ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), pertencente ao grupo dos fenoxiácidos. Esse produto é conhecido por sua eficiência no combate a ervas daninhas, proteção a plantas

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

de folhas largas e baixo custo, o que contribui para sua ampla utilização no setor agrícola (Samanth et al. 2025).

O 2,4-D é classificado como um herbicida hormonal seletivo de ação sistêmica, pertencente ao grupo químico ácido ariloxialcanóico, com aplicação em pós-emergência de plantas infestantes. A elevada solubilidade do 2,4-D em água, associada a sua natureza aniônica em pH acima de 3, favorece sua mobilidade no ambiente, implicando na lixiviação do herbicida em águas subterrâneas e superficiais (Gurav et al. 2023).

Apesar da relevância, o 2,4-D é considerado tóxico e, por isso, é rigorosamente regulamentado por órgãos nacionais e internacionais. No Brasil e pela Organização Mundial da Saúde (OMS), a concentração máxima de 2,4-D permitida em água potável é de 30 μg L^{-1} (Brasil, 2021; Kodali et al. 2021). Devido ao uso recorrente na agricultura, e por ser pouco biodegradável, esse herbicida tem sido constantemente identificado em corpos d'água superficiais e subterrâneos (Selvaraj et al. 2024). Nesse contexto, os valores encontrados tornam-se preocupantes, pois a exposição ao 2,4-D pode gerar efeitos diversos em humanos e animais, ocasionando alterações endócrinas e efeitos genotóxicos (Rashda et al. 2024; Vinayagam et al. 2024).

Diante desses impactos, torna-se necessário desenvolver a aprimorar técnicas capazes de reduzir a concentração de herbicidas em águas contaminadas. Diversos métodos têm sido propostos, como processos oxidativos, combinação foto-Fenton, adsorção, degradação fotocatalítica, uso de membranas de filtração, coagulação, sedimentação e biodegradação (Adam e Al-Shammari, 2023; Gurav et al. 2023). No entanto, muitas dessas abordagens apresentam limitações relacionadas ao custo operacional, complexidade de implementação ou geração de subprodutos. Nesse cenário, a adsorção se destaca como alternativa mais simples e economicamente viável.

O carvão ativado é amplamente empregado como adsorvente devido a sua elevada área superficial, estrutura porosa e presença de grupos funcionais em sua superfície, que favorecem diferentes cenários de interação com contaminantes orgânicos (Kuśmierek et al. 2025). Pode ser produzido a partir de matérias-primas

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

vegetais e com alto teor de carbono como madeira, casca de coco, bambu e grãos de café. Devido essas características, possui ampla aplicação, desde o tratamento de poluentes gasosos e líquidos, até o uso como suporte de catalisadores, além da purificação de efluentes e de água (Ficher, et al. 2019). No entanto, a eficiência do carvão ativado na remoção de contaminantes, depende fortemente das condições operacionais, como a concentração inicial de poluente, pH da solução, temperatura, agitação e tempo de contato (Do Nascimento et al. 2023). Esses parâmetros podem ser avaliados através de estudos cinéticos e de isotermas, que contribuem para compreensão da interação do adsorvato e adsorvente.

Nesse contexto, embora diversos estudos tenham investigado a remoção do 2,4-D utilizando padrões analíticos da molécula, ainda são limitadas as pesquisas que avaliam o comportamento de adsorção utilizando formulações comerciais do herbicida. Essas formulações podem conter aditivos, solventes e sais que influenciam as propriedades físico-químicas da solução e, consequentemente, os mecanismos de interação com os adsorventes. Dessa forma, investigar o desempenho do carvão ativado na remoção do 2,4-D em sua forma comercial torna-se relevante para aproximar os resultados experimentais das condições reais de contaminação ambiental. Assim, este estudo diferencia-se por avaliar a adsorção do 2,4-D em formulação comercial, integrando a análise de parâmetros operacionais e possíveis mecanismos de interação. Essa abordagem permite uma avaliação mais representativa de condições reais de contaminação, contribuindo para o avanço de aplicações práticas no tratamento de águas contaminadas.

2. Metodologia

2.1. Reagentes

Os experimentos foram realizados com carvão ativado comercial (Alpha W 810) da Alpha Carbo Industrial Ltda. A matéria-prima utilizada para sua produção é a casca de coco de babaçu, carbonizada com vapor d'água e oxigênio a 800 °C.

O adsorvato utilizado foi o herbicida ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) comercial - U46 BR, composto por ácido 2,4-diclorofenoxiacético (80,60% m/v), equivalente ácido do 2,4-D (67,00% m/v) e outros ingredientes (38,09% m/v).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

2.2 Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ})

Preparou-se 11 soluções de cloreto de sódio (NaCl) a 0,01 mol L^{-1}, com pH ajustado entre 2,0 e 12,0, utilizando soluções diluídas de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl). Em cada Erlenmeyer, adicionaram-se 50 mg de carvão e 50 mL de solução ajustada, que foram levadas a uma mesa agitadora tipo *shaker* a 30 °C por 24 horas. Após o tempo de equilíbrio, foram medidos os valores de pH final e foi construído um gráfico de pH_{final} versus $pH_{inicial}$. O ponto de carga zero (PCZ) é o ponto em que o pH final se manteve igual ao inicial (Regalbuto e Robles, 2004).

2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Realizou-se as micrografias do carvão ativado em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As amostras foram recobertas com uma fina camada de ouro por um metalizador e fixadas em um porta-amostra por uma fita adesiva de carbono.

2.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A identificação dos grupos funcionais foi feita por espectrofotometria de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). As amostras do carvão ativo antes e depois da adsorção foram preparadas em pastilhas de brometo de potássio (KBr) previamente seco em estufa. As análises foram realizadas em um espectrofotômetro FTIR (PerkinElmer – Frontier), operando na faixa de 4000 a 400 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1}.

2.5 Curva de calibração 2,4-D

A curva de calibração foi construída a partir de uma solução padrão de 806 mg L^{-1} de ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) comercial, obtendo soluções de 5, 20, 35, 50, 65, 80, 95, 110 e 125 mg L^{-1}. As leituras foram feitas em espectrofotômetro UV-vis (BEL Engineering, UV-M51) no comprimento de onda de 282 nm. A partir do gráfico de absorbância versus concentração, realizou-se um ajuste linear, cuja equação da reta foi usada para a determinar as concentrações de equilíbrio dos ensaios. A seletividade analítica do método para quantificação do 2,4- D em formulação comercial foi avaliada por meio de varreduras espectrais no

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

UV–Vis, utilizando tanto a solução padrão quanto a solução da amostra comercial. A comparação dos espectros permitiu a identificação do comprimento de onda de máxima absorção (λmax) característico do 2,4-D, bem como a verificação da ausência de interferências significativas provenientes da matriz da formulação no comprimento de onda selecionado.

2.6 Teste de adsorção

Para avaliar a influência do pH, testes de adsorção foram conduzidos em batelada e em duplicata, misturando 50 mg de carvão com 50 mL de solução de 2,4- D a 100 mg L^{-1}, ajustada para os pHs 4,0; 7,0 e 10,0. Os ensaios foram mantidos em mesa agitadora (*shaker*) a 30 °C por 24 horas. Após o equilíbrio, foram medidos os valores de pH final, e filtrou-se as amostras em membrana de nylon (porosidade 0,45 µm; Kasvi, K18-2545NY). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro UV-vis a 282 nm e as concentrações calculadas com base na curva de calibração do ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D). A capacidade de adsorção foi determinada conforme a Equação 01.

$$q = \frac{(C_0 - C_{eq}) \cdot m}{V} \qquad (01)$$

Em que: q - concentração de soluto adsorvida pelo adsorvente (mg g^{-1}); C_0 e C_e - concentrações iniciais e finais de soluto em solução (mg L^{-1}), respectivamente; V - volume da solução (L); m - massa do adsorvente utilizada no ensaio (g).

2.7 Cinética de Adsorção

Os dados cinéticos foram obtidos a partir de 2,0 L de solução de ácido 2,4- diclorofenoxiacético (2,4-D) a 250 mg L^{-1}, ajustada para pH 8,0. A solução foi transferida para um béquer com um sistema de agitação mecânica central. Antes da adição do carvão ativado, retirou-se uma alíquota de 3 mL para a leitura do branco. Em seguida, adicionaram-se 2,0 g do carvão ativo, iniciando o ensaio.

Amostras de 3 mL foram coletadas nas primeiras 2 horas em intervalos de 15 minutos, nas 2 horas seguintes em intervalos de 30 minutos e, posteriormente, a cada 60 minutos até a estabilização da concentração. As amostras foram filtradas

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

em membrana de nylon (porosidade 0,45 µm; Kasvi, K18-2545NY), diluídas conforme necessário e analisadas em UV-vis a 282 nm. As concentrações foram calculadas com base na curva de calibração do 2,4-D e as capacidades de adsorção conforme a Equação 01.

Para análise, foi construído um gráfico da capacidade de adsorção (q) *versus* tempo (t) aplicando modelos cinéticos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem.

2.7.1 Modelo de pseudo-primeira ordem

O modelo de pseudo-primeira descreve um processo no qual a transferência de massa na superfície do sólido pode ser dominante, gerando resistência, sendo a taxa de adsorção proporcional à diferença entre a concentração de saturação e os sítios ativos disponíveis (Wang, *et al*. 2022). Esse modelo é descrito pela Equação 02:

$$q_t = q_e \cdot (1 - e^{-K_1 \cdot t}) \quad (02)$$

Sendo K_1 a constante da taxa de adsorção de pseudo-primeira ordem (min^{-1}), q_e e q_t as capacidades de adsorção no equilíbrio e no tempo (t), respectivamente (mg g^{-1}).

2.7.2 Modelo de pseudo-segunda ordem

O modelo de pseudo-segunda ordem é aplicado a sistemas que apresentam forças não lineares, considerando que que a de taxa de adsorção é dependente da concentração adsorvida e no equilíbrio (Wang, *et al*. 2022). O modelo é representado pela Equação 03:

$$q_t = \frac{q_e^2 \cdot K_2 \cdot t}{1 + q_e \cdot K_2} \quad (03)$$

Sendo K_2 a constante da taxa de adsorção (g mg^{-1} min^{-1}).

2.8 Equilíbrio de adsorção

A isoterma de adsorção foi obtida através de 7 soluções de 2,4-D nas concentrações de 50, 90, 100, 125, 150, 200, 250 e 300 mg L^{-1}, todas ajustadas para

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

pH 8,0. Para cada concentração foram utilizados 3 Erlenmeyer com 50 mL de solução: um branco (sem carvão) e dois para duplicata contendo 50 mg de carvão ativado. Os ensaios foram mantidos sob agitação em *shaker* a 30 °C por 24 horas.

Após o equilíbrio, mediu-se os valores de pH final, realizaram-se as diluições necessárias e as leituras de absorbância no espectrofotômetro UV-vis a 282 nm. As concentrações foram estimadas com base na equação da curva de calibração do 2,4-D e as capacidades de adsorção conforme a Equação 01. Em seguida, foi plotado um gráfico de concentração em equilíbrio (C_e) *versus* capacidade de adsorção em equilíbrio (q_e) e utilizou-se de modelos da literatura como Langmuir e Freundlich para caracterizar o mecanismo de adsorção.

2.8.1 Modelo de Langmuir

A isoterma de Langmuir descreve um processo de adsorção que ocorre em monocamada e com sítios de energia de adsorção constante (Langmuir, 1918). A isoterma é escrita conforme a Equação 04.

$$q_e = \frac{q_{máx} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (04)$$

Em que q_e é a quantidade de soluto adsorvida por massa de adsorvente no equilíbrio (mg g^{-1}), $q_{máx}$ é a capacidade máxima de adsorção (mg g^{-1}), K_L é a constante de Langmuir (L mg^{-1}) relacionada a energia de adsorção e à afinidade do adsorvato a superfície e C_e é a concentração do soluto em solução no equilíbrio (mg L^{-1}).

2.8.2 Modelo de Freundlich

A isoterma de Freundlich é um modelo empírico que descreve a adsorção em superfície heterogênea, em multicamadas e os sítios são distribuídos exponencialmente (Freundlich, 1907). A isoterma é descrita pela Equação 05.

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n} \quad (05)$$

Sendo q_e a quantidade de soluto adsorvida por massa de adsorvente no equilíbrio (mg g^{-1}), K_F a constante de capacidade de adsorção de Freundlich, C_e a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

concentração de equilíbrio na fase líquida (mg L^{-1}) e 1/n uma constante relacionada à heterogeneidade da superfície.

2.8.3 Modelo de Sips

A isoterma de sips considera a heterogeneidade do sólido adsorvente e as interações entre as moléculas adsorvidas, combinando os modelos de Langmuir e Freundlich (Sips, 1948). A Equação 06 representa o modelo:

$$q_e = \frac{q_{máx}(bC_e)^{ns}}{1+(bC_e)^{ns}} \quad (06)$$

Em que: q_e é a quantidade de adsorbato no equilíbrio (mg g^{-1}); $q_{máx}$ a capacidade máxima de adsorção (mg g^{-1}); b é a constante de equilíbrio (L mg^{-1}), C_e é a concentração de equilíbrio (mg L^{-1}), e ns é o parâmetro empírico que indica a heterogeneidade do sistema.

2.9 Tratamento dos dados

Os experimentos de adsorção foram realizados em duplicata, e os resultados são apresentados como média ± desvio padrão. O desvio padrão foi calculado utilizando a função DESVPAD.A do software Excel.

Os ajustes dos modelos cinéticos e isotérmicos foram realizados por regressão não linear, em ambiente Python, utilizando o Visual Studio Code como interface de execução. Para a comparação avaliou-se o coeficiente de determinação (R^2) e do teste qui-quadrado (χ^2), empregados como critérios para comparação da qualidade dos ajustes.

3. Resultados e Discussão

3.1 Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ})

O ponto de carga zero (pH_{PCZ}) é um parâmetro essencial para o processo de adsorção, pois indica o pH em que a superfície do carvão possui carga neutra. Abaixo desse valor a superfície do adsorvente torna-se carregada positivamente,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

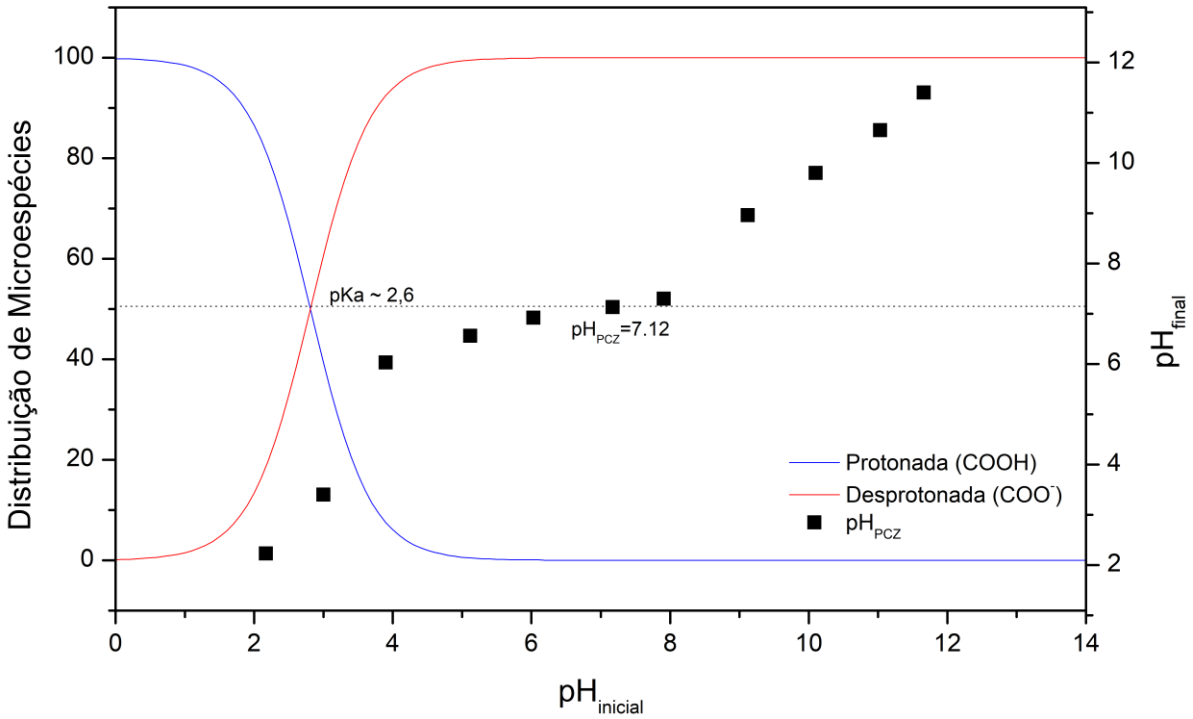
Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

favorecendo a adsorção de ânions em solução. Já acima do pH_{PCZ}, a superfície do carvão se torna carregada negativamente, favorecendo a adsorção de cátions, ou seja, cargas positivas (Saadi *et al*. 2024).

No caso do 2,4-D, em que o pKa é de aproximadamente 2,6, observa-se que a molécula se encontra predominantemente em sua forma aniônica (COO^-) em pH superior a 3,0. Assim, na faixa entre 4 e 7 ocorre maior disponibilidade de espécies aniônicas, o que permite avaliar a interação entre a distribuição de espécies do 2,4-D e a superfície do carvão ativado.

De acordo com a Figura 1, os valores finais de pH se comportam como tampão entre os valores 6, 7 e 8. Dessa forma, calculou-se a média aritmética desses pontos, definindo o pH_{PCZ} em 7,12. Observa-se ainda que nessa faixa a superfície do carvão encontra-se em uma região neutra, o que pode influenciar diretamente o equilíbrio entre forças atrativas e repulsivas durante a adsorção.

Figura 1. Distribuição das espécies do herbicida 2,4-D em função do pH e determinação do pH_{PCZ} do carvão ativado.



Fonte: Autores.

O valor obtido é coerente com o encontrado na literatura para carvões ativados de diferentes origens e tratamentos, como: carvão ativo comercial (pH_{PCZ} = 7,53) e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

carvão ativo modificado com $CaCl_2$ (pH_{PCZ} = 7,16) conforme Zanela *et al*. (2012); carvão ativo proveniente de bagaço de malte (pH_{PCZ} = 7,15) por Barbosa *et al*. (2024); carvão do mesocarpo do coco ativado a 600° e funcionalizado com peróxido de hidrogênio (pH_{PCZ} = 7,27) observado por Sobral *et al*. (2024); e carvão ativo em pó obtido de madeira de pinus (pH_{PCZ} = 7,10) por Kuśmierek *et al*. (2025).

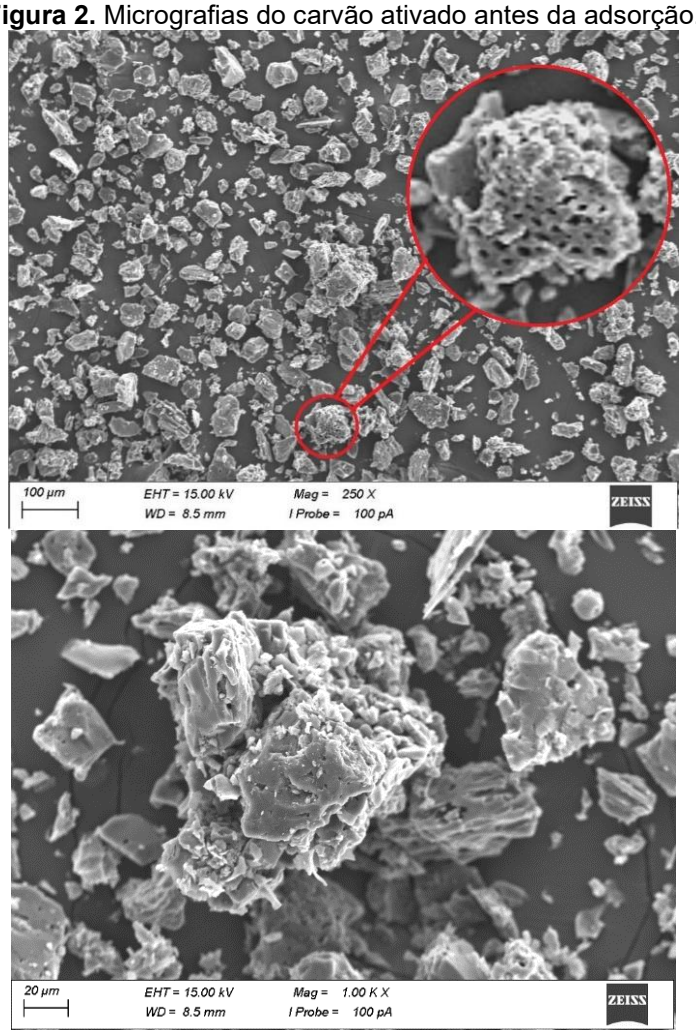
3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A morfologia do carvão ativado foi analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 2 exibe as micrografias em que o carvão apresentou estrutura irregular, superfície rugosa e poros de diferentes dimensões. Essa morfologia sugere a presença de uma superfície potencialmente favorável à adsorção, com disponibilidade de sítios ativos. No entanto, a área superficial específica e a distribuição de poros não foram determinadas neste estudo, de modo que essa interpretação deve ser considerada de forma qualitativa.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

Figura 2. Micrografias do carvão ativado antes da adsorção.



Fonte: Autor.

Zaaboul et al. (2024), avaliaram um carvão ativado comercial na remoção de corante, e identificaram uma estrutura rugosa e porosa. Da mesma maneira, Divya *et al.* (2025) estudaram carvões ativados obtidos de espécies de bambu, como *Bambusa balcooa*, e relataram uma superfície rugosa e porosa, com estrutura predominantemente mesoporosa, favorável à adsorção de moléculas orgânicas.

Assim, as micrografias do carvão ativado apresentaram caracterísitcas análogas com as encontradas na literatura, confirmando características favoráveis para a adsorção de moléculas orgânicas, como o 2,4-D.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

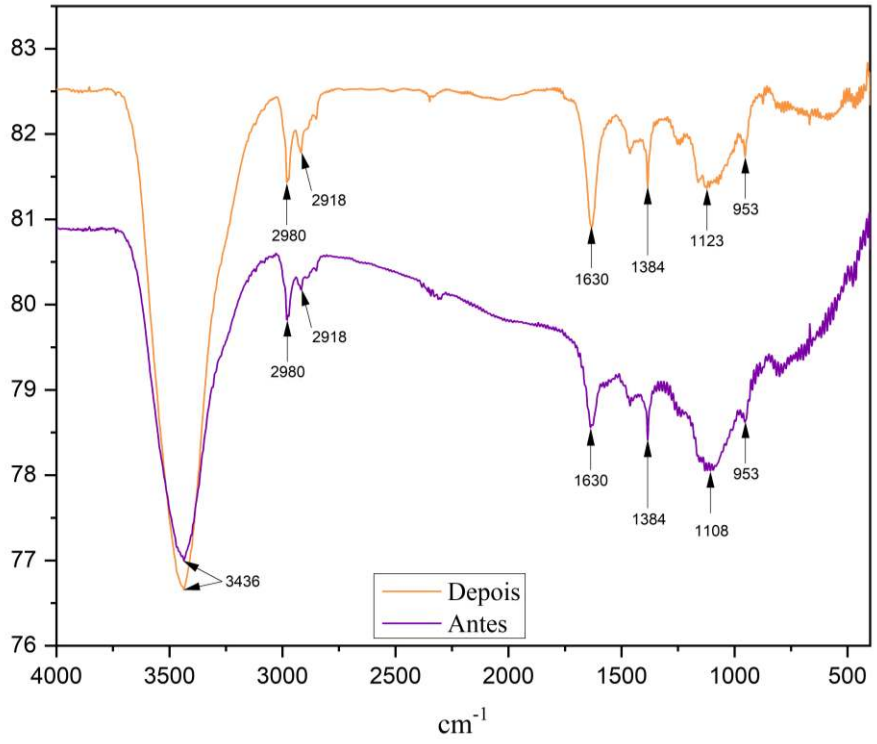
Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

3.3 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Na espectrofotometria de infravermelho do carvão ativo antes e depois da adsorção de 2,4-D (Figura 3), foi possível identificar os principais grupos funcionais presentes nas amostras de carvão.

Observa-se que as principais bandas antes da adsorção se mantêm após o processo, porém com maior intensidade, o que sugere maior interação dos grupos funcionais da superfície do carvão ativado com a molécula de 2,4-D.

Figura 3. Grupos funcionais do carvão ativado antes e depois da adsorção.



Fonte: Autor.

Em ambos os espectros destaca-se uma banda intensa em 3436 cm^{-1} que corresponde às vibrações de estiramento dos grupos hidroxila (–OH) e presença de água. As bandas localizadas na região de 2980 a 2845 cm^{-1} correspondem às vibrações simétricas e assimétricas do grupo metila ($–CH_3$) e do grupo metileno ($– CH_2$). Já a banda em 1630 cm^{-1} pode ser atribuída tanto às vibrações de estiramento de duplas ligações (C=C), típicas de anéis aromáticos, comuns em materiais carbonizados.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

Na região de 1384 cm^{-1} observa-se a vibração simétrica C-H. As bandas situadas entre 1123 e 1108 cm^{-1} correspondem ao estiramento C-O e C-C, enquanto em 953 cm^{-1} indica vibrações de estiramento C-O, características de éteres e/ou ésteres. Os ensaios de adsorção ocorreram em pH 8, condição na qual a molécula do 2,4-D encontra-se predominantemente desprotonada (COO^-), e a superficie do carvão ativado situa-se próxima a região de neutralidade (vide Figura 1 pH_{PCZ}).

A Tabela 1 resume os grupos funcionais identificados no carvão antes e após a adsorção de 2,4-D.

Tabela 1. Identificação dos grupos funcionais.

Posição (cm^{-1})	Grupo Funcional	Referências
3436	Vibrações de O−H	Bhattarai (2025) e Li (2022)
2980	Estiramento das vibrações de C-H	Terzyk (2001)
2918	Vibrações assimétricas de C–H (–CH_3 e –CH_2)	Bhattarai (2025); Mafra (2022) e Terzyk (2001)
1630	Estiramento de C=C de anel aromático	Bhattarai (2025); Mafra (2022); Reza (2025) e Li (2022)
1384	vibração simétrica C–H	Bhattarai (2025); Mafra (2022); Reza (2025) e Li (2022)
1123 –1108	Estiramento de C–O e C–C	Shewatatek (2025)
953	Vibrações de estiramento C–O	Samanth *et al.*, (2025)

Fonte: Autor

Estudos de adsorção com 2,4-D utilizando biochar de *Pterocarpus pterocarpum* Samanth *et al.* (2025) e biochar de *Vateria indica* Vinayagam *et al.* (2025), indicam que grupos funcionais ricos em oxigênio, estruturas aromáticas e hidroxilas, contribuem para a adsorção por meio de ligações de hidrogênio, interações dipolo-dipolo e interação π-π. A contribuição desses mecanismos está diretamente relacionada às características do material carbonáceo, que apresenta elevada fração de carbono aromático, bem como à presença de grupos oxigenados em sua superfície. As alterações na intensidade das bandas 3436 e 1630 cm^{-1}, deste estudo, reforçam a hipótese, indicando que grupos oxigenados da superfície participam da formação de ligações de hidrogênio, nas quais, o grupo carbocilato (COO^-) do 2,4-D

REMUNOM
ISSN 2178-6925

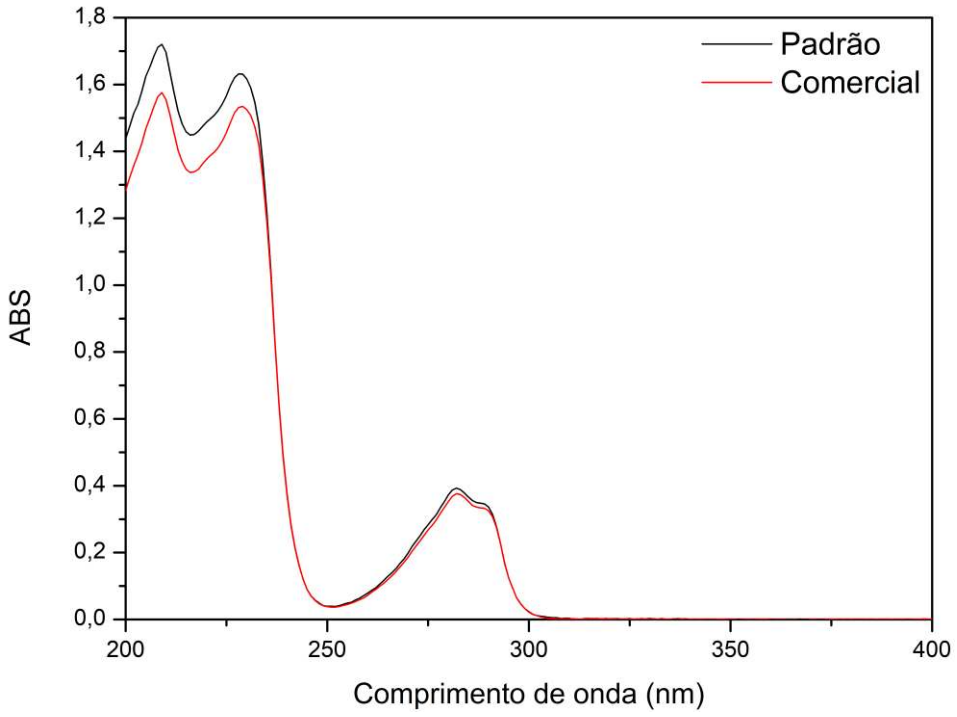
Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

pode estar interagindo com grupos OH, C=O ou C-O da superfície do carvão (Quach An, B. & Hong-Hai, N., 2020).

3.4 Curva de calibração 2,4-D

Na Figura 4, apresenta-se a varredura espectral (50 mg L^{-1}) das soluções padrão e da formulação comercial de 2,4-D. Observam-se três bandas de absorção características, centradas aproximadamente em 210 nm, 230 nm e 282 nm. Embora os perfis espectrais sejam semelhantes, pequenas variações são observadas, atribuídas à influência da matriz da formulação comercial. Considerando a presença de um anel aromático na estrutura do 2,4-D, as bandas de absorção observadas estão associadas a transições eletrônicas do tipo π-π. Em particular, a absorção em torno de 282 nm está relacionada a transições de menor energia do sistema aromático conjugado, sendo mais característica da molécula e menos suscetível a interferências da matriz, quando comparada às bandas em menores comprimentos de onda. (Skoog, Holler, Crouch, 2014). Dessa forma, o comprimento de onda de 282 nm foi selecionado para as análises quantitativas.

Figura 4. Varredura de solução de 2,4-D a 50 mg L^{-1} das soluções padrão e da formulação comercial do ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D).

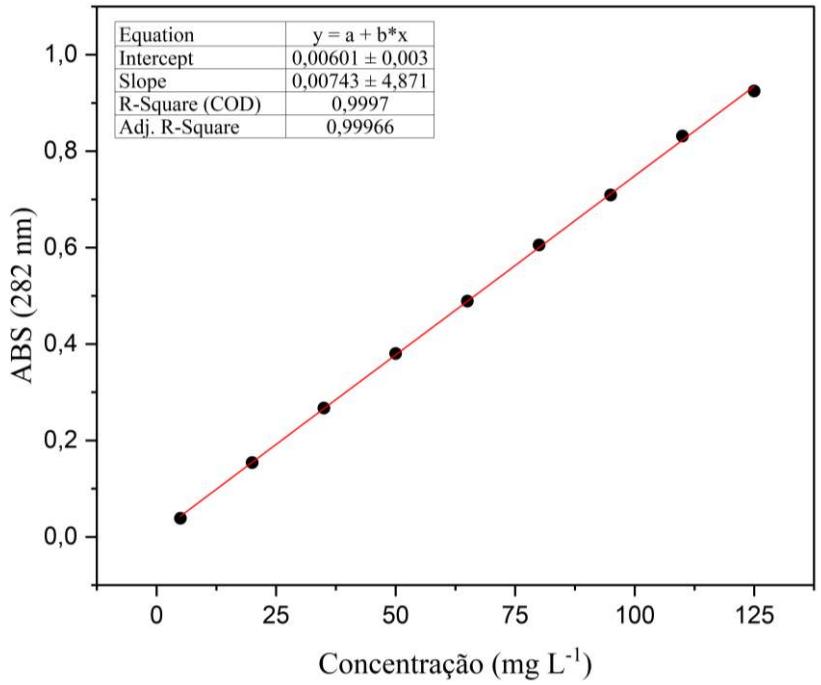


REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

A Figura 5, apresenta a curva de calibração obtida para o herbicida comercial. Observa-se uma relação linear entre a absorbância e a concentração do herbicida dentro da faixa estudada, indicando a adequada resposta do método analítico. O ajuste linear dos dados resultou na equação y = 0,0074 + 0,006, com excelente coeficiente de determinação (R^2 = 0,9997).

Figura 5. Curva de calibração do ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D).



Fonte: Autor.

3.5 Teste de adsorção

Os ensaios de adsorção em diferentes valores de pH, foram realizados com o objetivo de avaliar sua influência na capacidade de adsorção do carvão. A concentração final da solução de 2,4-D foi determinada a partir da curva de calibração, permitindo o cálculo da capacidade de adsorção (q_e) conforme a Equação 01. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2. Os valores da capacidade de adsorção são expressos como média ± desvio padrão, evidenciando a variabilidade experimental entre as duplicatas.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

Tabela 2. Teste de adsorção com diferentes pHs.

$pH_{inicial}$	pH_{final}	q_e (mg g^{-1})
3,78	8,17	73,27 ± 3,97
7,03	8,57	69,57 ± 4,36
8,30	7,13	84,56 ± 2,15
10,47	10,19	49,49 ± 0,11

Fonte: Autor

Para melhor interpretação dos resultados, o efeito do pH foi analisado considerando três aspectos principais: (i) a especiação do 2,4-D em solução, (ii) o estado de carga superficial do carvão ativado em relação ao pH_{PCZ} e (iii) a contribuição de interações não eletrostáticas, como interações π-π e ligações de hidrogênio.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, percebe-se que os valores de pH final das soluções em equilibrio ficaram próximos de 8,0. A menor capacidade de adsorção foi registrada para o pH inicial de 10,0, com valor de 49,49 mg g^{-1}, o que pode ser explicado pela forte repulsão eletrotástica entre as cargas negativas do carvão e a solução de 2,4-D que se encontra na forma desprotonada (COO^-), pH em que a espécie aniônica do herbicida predomina, influenciando diretamente os mecanismos de interação com a superfície do adsorvente (Samanth *et al.* 2025). Esse efeito torna-se mais pronunciado em pH mais elevados, como observado em pH 10,0, enquanto em pH próximo ao pH_{PCZ} (≈7,12), como em pH 8,0, essa repulsão é menos intensa, permitindo maior contribuição de interações não eletrostáticas.

Nesse contexto, verificou-se que a condição de pH ajustada para 8,0 favoreceu (pois esta proxima ao PCZ) a interação entre o carvão ativado e a molécula de 2,4- D, resultando em maior eficiência do processo. Para confirmar esse comportamento, foi realizado um ensaio adicional nesse pH, obtendo uma maior capacidade de adsorção (84,56 mg g^{-1}).

Mesmo estando acima do ponto de carga zero (Figura 1) onde interações eletrostáticas desfavoráveis podem ocorrer, a adsorção ainda se mantém significativa, indicando a contribuição de outros mecanismos não eletrostáticos, como sugerido pela análise de FTIR, incluindo possíveis interações π-π, forças de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

van der Waals e a formação de ligações de hidrogênio entre os grupos oxigenados da superfície do carvão e os grupos carboxilato do herbicida (Rashda et al., 2024; Vinayagam et al., 2025).

A literatura apresenta resultados variados quanto ao pH ótimo para a adsorção de 2,4-D. Rashda et al. (2024) observaram alta eficiência de remoção em pH próximo ao pH_{PCZ} do adsorvente, indicando possível contribuição de interações mais fortes, como a da adsorção química. Samanth et al. (2025) relataram que o biochar de vagem de *P. pterocarpum* apresentou maior eficiência em pH 2,0, embora também tenha mantido bons resultados em pH 4, 6 e 8. Já Vinayagam et al. (2024) destacaram que a baixa capacidade de adsorção para o biochar de *Vateria indica* em pH 12,0 ($q = 1,59$ mg g^{-1}) deve-se à intensa repulsão eletrostática, enquanto em pH 2,0 ($q = 35,71$ mg g^{-1}) a adsorção foi favorecida pela atração eletrostática.

Embora o pH ácido (em torno de 2,0) favoreça a adsorção do herbicida em alguns sistemas, os resultados deste estudo demonstram que o pH 8,0 apresenta desempenho superior para o carvão ativado analisado. Além dos aspectos físico-químicos, a escolha do pH também foi avaliada sob a perspectiva operacional. Portanto, a escolha do pH 8,0 mostra-se mais vantajosa ao ponto de vista prático. Embora um pH ácido de 3,78 tenha resultado em uma boa adsorção (73,27 mg g^{-1}), manter o processo nessa condição exigiria um controle operacional rigoroso e constante, o que tornaria o método mais caro e complexo. Considerando que o pH nas estações de tratamento de água normalmente varia entre 5 e 9, o uso do pH 8,0 dispensaria a necessidade de correções de acidez. Dessa forma, a escolha do pH 8,0 consolida-se como a condição mais favorável.

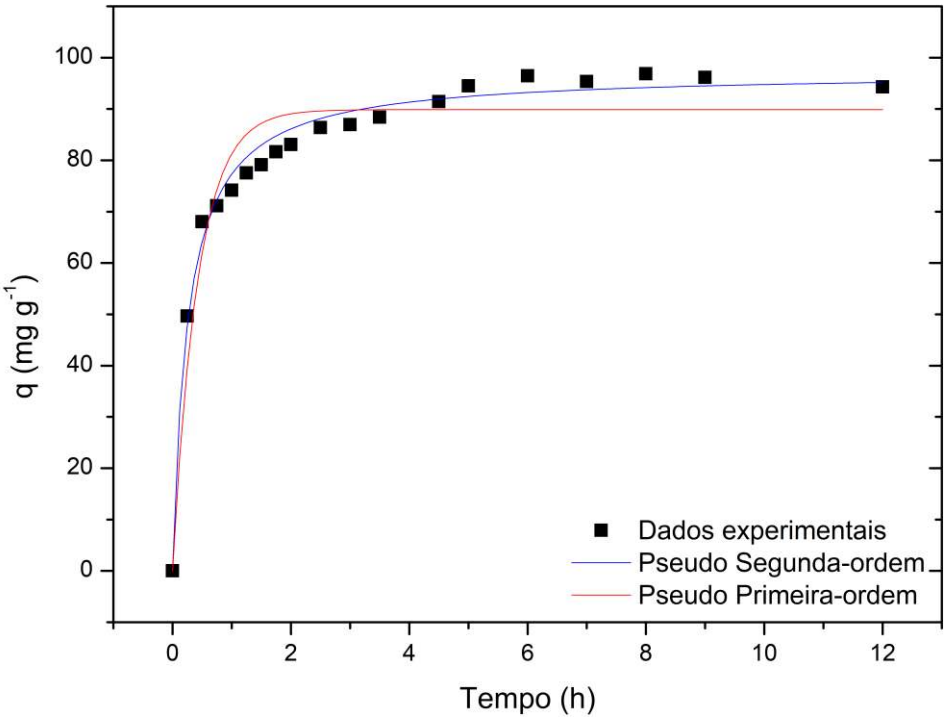
3.6 Cinética de Adsorção

O estudo cinético é fundamental auxiliar na compreenção dos mecanismos que regem o processo de adsorção do 2,4-D pelo carvão ativado ao longo do tempo. A Figura 6 apresenta o comportamento cinético experimental, ajustado aos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, conforme a metodologia.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

Figura 6. Cinética de adsorção do 2,4-D em carvão ativado.



Fonte: Autores.

Observa-se que a adsorção ocorre de forma rápida nos primeiros 15 minutos, o que pode ser atribuído à elevada disponibilidade de sítios ativos na superfície do carvão e ao forte gradiente de concentração, que impulsionou a transferência de massa. Em seguida, a taxa de adsorção torna-se mais lenta, indicando o esgotamento progressivo dos sítios. O equilíbrio foi atingido após aproximadamente 12 horas, com capacidade máxima de adsorção de 96,84 mg g^{-1}.

Os modelos cinéticos foram aplicados aos dados experimentais conforme as Equações 02 e 03, obtendo-se os parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos de Pseudo-primeira ordem e Pseudo-segunda ordem.

Modelo	Parâmetros	
Pseudo-primeira ordem	q_{eq} (mg g^{-1})	89,74
	K_1 (min^{-1})	2,33
	R^2	0,9335
Pseudo-segunda ordem	q_{eq} (mg g^{-1})	96,86
	K_2 (g mg^{-1} min^{-1})	0,038
	R^2	0,9882

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

Fonte: Autor.

O melhor ajuste foi obtido pelo modelo de pseudo-segunda ordem, o que está em concordância com o comportamento experimental observado. Segundo Wang *et al.* (2022), esse modelo descreve sistemas em que a taxa de adsorção está associada à interação entre o adsorbato e os sítios ativos do adsorvente, sugerindo interações mais fortes e complexas.

Resultados semelhantes foram relatados por Selvaraj *et al.* (2024), que também identificaram o modelo de pseudo-segunda ordem como o mais adequado (R^2 = 0,9485). Os autores atribuem o excelente ajuste à presença de interações complexas, como interações π–π e ligações de hidrogênio, entre o 2,4-D e os grupos funcionais presentes na superfície do carvão ativado obtido de vagens do arbusto-de-vela (*Senna alata*). Além disso, Quach An e Hong-Hai (2020), obteram o mesmo comportamento utilizando biocarvão de sabugo de milho como adsorvente associando as mesma contribuições de interações.

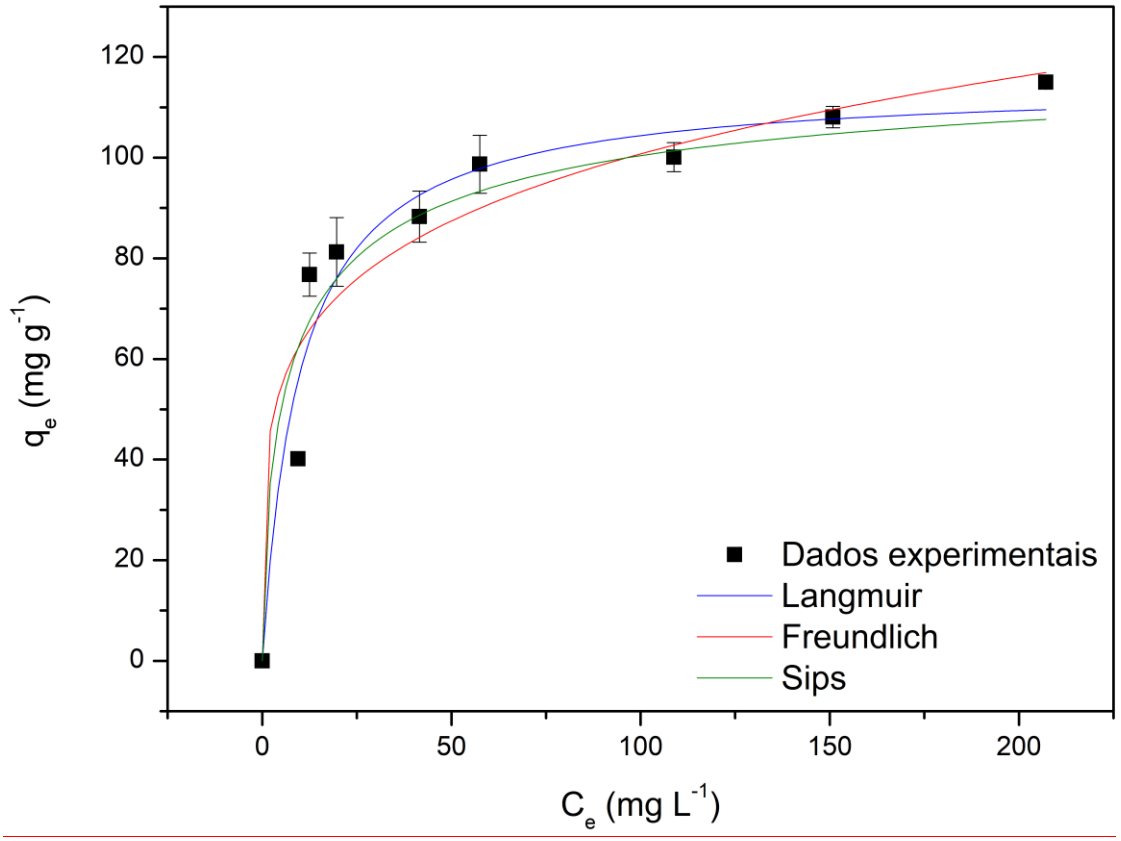
3.7 Equilíbrio de adsorção

Os modelos isotérmicos foram aplicados com o objetivo de compreender as interações entre adsorvato e adsorvente (Figura 7), além de descrever o comportamento do processo de adsorção. Para isso, os modelos clássicos de Langmuir, Freundlich e Sips foram aplicados aos dados experimentais, permitindo a obtenção dos parâmetros de cada modelo, juntamente com o coeficiente de correlação (R^2), considerado um dos principais critérios para a definição do melhor ajuste. A Tabela 4 contém os parâmetros dos modelos de Langmuir e Freundlich.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

Figura 7. Isoterma de adsorção do 2,4-D em carvão ativo.



Fonte: Autores.

Tabela 4. Parâmetros obtidos para os modelos de Langmuir e Freundlich.

Isotermas	Parâmetros	
Langmuir	$q_{máx}$	114,82
	K_L	0,096
	χ^2	20,72
	R^2	0,9521
Freundlich	K_F	39,28
	n	4,89
	χ^2	31,69
	R^2	0,9268
Sips	$q_{máx}$	123,09
	b	0,11
	ns	0,62
	χ^2	27,99
	R^2	0,9353

Fonte: Autores.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

Entre os modelos avaliados, o de Langmuir apresentou melhor desempenho com R^2=0,9521, indicando que os dados experimentais foram melhor descritos por esse modelo dentro da faixa de concentração estudada. Os modelos de Freundlich e Sips apresentaram ajustes inferiores, com valores de R^2 e χ^2 menos favoráveis em comparação ao modelo de Langmuir. Nesse contexto, o ajuste sugere que o processo de adsorção pode ocorrer em monocamada e uma superfície com energia de adsorção uniforme. No entanto, para uma afirmação mais conclusiva é necessário análises complementares, como fisissorção de N_2 e análises termodinâmicas.

Resultados semelhantes foram observados, para adsorção com 2,4D com solução padrão, por France et al. (2025) que também verificaram o modelo de Langmuir como o mais representativo na adsorção do 2,4-D em carvão proveniente de resíduo de madeira modificado com quitosana (R^2=0,999), sendo o $q_{máx}$ estimado pelo modelo de 165,8 mg g^{-1}. De forma análoga, Selvaraj et al. (2024) relataram que o modelo de Langmuir apresentou o melhor ajuste (R^2=0,998) para adsorção do herbicida a 30°C com carvão produzido a partir das vagens do arbusto-de-vela (*Senna alata*), adsorvendo até 252,35 mg g^{-1}. Além disso, Quach An e Hong-Hai (2020), também observaram comportamento semelhante, com R^2=0,999, sendo consistente com o comportamento descrito pelo modelo de Langmuir em diferentes sistemas. Vale ressaltar que, embora os estudos citados apresentem elevadas capacidades de adsorção, estes foram conduzidos com soluções padrão do herbicida, enquanto o presente trabalho avaliou a remoção de 2,4-D em formulação comercial, que contem outros componentes.

5. Conclusão

O presente estudo demonstra o potencial do carvão ativado como um adsorvente de alto desempenho para a remoção do herbicida 2,4-D em meio aquoso. A caracterização por FTIR permitiu identificar grupos funcionais relevantes, como –OH, C=O, C–H e C–C que favorecem a interação entre o adsorvato e o adsorvente, contribuindo para a eficiência do processo. A análise cinética indicou que o processo segue o modelo de pseudo-segunda ordem, caracterizando um

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

sistema com fortes interações e que ocorre de maneira mais lenta. Já o estudo de equilíbrio revelou melhor ajuste ao modelo de Langmuir, com uma capacidade de adsorção de 114,82 mg g^{-1} predita pelo modelo. De modo geral, os resultados confirmam a aplicabilidade do carvão ativado como alternativa viável e eficaz na remoção do herbicida, reforçando sua relevância no tratamento de efluentes contaminados por pesticidas. Recomenda-se que pesquisas futuras avaliem o desempenho do carvão em condições operacionais diferenciadas, como em colunas ou sistemas contínuos, a fim de aproximar o processo das condições reais de aplicação industrial e ambiental. Além disso, é importante considerar limitações do presente estudo, como a ausência de caracterizações mais aprofundadas do adsorvente e a necessidade de avaliações em sistemas mais complexos, de modo a ampliar a compreensão do comportamento do material e sua aplicabilidade em escala real.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001

Referências

Adam, O. E.-A. A.; Al-Shammari, A. S. Preparation and characterization of activated carbon from Balanites aegyptiaca seed shell for the removal of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, v. 315, p. 314–326, 2023.

Barbosa, M. C.; Zuniga, A. D. G. Análise do ponto de carga zero e espectroscopia de infravermelho de um carvão ativado proveniente de bagaço de malte. *Research, Society and Development*, v. 13, n. 8, e13113846706, 2024.

Bhattarai, D. P.; Aryal, S.; Shrestha, K. R.; Mishra, P. K.; Shrestha, T.; Homagai, P. L.; Oli, H. B.; Shrestha, R. L. Study of the electrochemical performance of *Zanthoxylum armatum* seed-derived potassium hydroxide-assisted activated carbon as a negatrode material for supercapacitor applications. *Materials Advances*, v. 6, p. 1635–1646, 2025.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

BRASIL. Portaria GM/MS N° 888/2021, de 4 de maio de 2021. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Ministério da Saúde, Brasília, DF, 7 mai. 2021, Seção 1, n. 85, p. 127.

Divya, M. P.; Krishnamoorthi, S.; Ravi, R.; Jenner, V. G.; Baranidharan, K.; Raveendran, M.; Hemalatha, P. Preparation and characterization of activated carbon from commercially important bamboo species in north eastern India. *Advances in Bamboo Science*, v. 11, 100148, 2025.

Do Nascimento, K. K. R.; Vieira, F. F.; Xavier, C. S. F.; Almeida, M. M.; Oliveira, I. V. C.; Bandeira, A. de A. S.; Neta, O. P. L. Remoção de glifosato em carvão ativado: planejamento fatorial para otimização de parâmetros. *Contribuciones a Las Ciencias* Sociales, v. 16, n. 12, p. 32050–32064, 2023.

Fischer, H. C. V.; Lima, L. S.; Felsner, M. L.; Quinaia, S. P. Estudo da capacidade de adsorção de carvões ativados comerciais *versus* tempo de armazenamento. *Ciencia Florestal*, v. 29, n. 3, p. 1090–1099, 2019.

France, H. E.; Strong, O. L. K.; Roy, T. M.; Vreugdenhil, A. J. Versatile waste wood-chitosan composites for 2,4-D and paraquat adsorption: Isotherm modelling and thermodynamic evaluation. *Chemosphere*, v. 370, 144008, 2025.

FREUNDLICH, H. Kolloidfiillung und Adsorption. Zeitschrift für Angewandte Chemie, v. 20, n. 18, p. 749–750, 1907.

Gurav, R.; Mandal, S.; Smith, L. M.; Shi, S. Q.; Hwang, S. The potential of self-activated carbon for adsorptive removal of toxic phenoxyacetic acid herbicide from water. *Chemosphere*, v. 339, 139715, 2023.

Kodali, J.; Arunraj, B.; Sathvika, T.; Krishna Kumar, A. S.; Nagarathnam, R. Prospective application of diethylaminoethyl cellulose (DEAE-cellulose) with a high adsorption capacity toward the detoxification of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) from water. *RSC Advances*, v. 11, p. 22640–22651, 2021.

Kuśmierek, K.; Dąbek, L.; Świątkowski, A. The influence of the shape and grain size of commercial activated carbons on their sorption efficiency towards organic water pollutants. *Desalination and Water Treatment*, v. 321, 100996, 2025.

LANGMUIR, I. The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum. Journal of the American Chemical Society, v. 40, n. 9, p. 1361–1403, 1918.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

Li, X.; Huang, Y.; Liang, X.; Huang, L.; Wei, L.; Zheng, X.; Albert, H. A.; Huang, Q.; Liu, Z.; Li, Z. Characterization of biochars from woody agricultural wastes and sorption behavior comparison of cadmium and atrazine. *Biochar*, v. 4, n. 27, 2022.

Mafra, E. R. M. L.; Protásio, T. P.; Pedroza, M. M.; Barbosa, D. B.; Viana, M. F.; Souza, T. M.; Bufalino, L. Comparative analysis of seed biomass from Amazonian fruits for activated carbon production. *Journal of Environmental Science and Health*, v. 57, n. 11, p. 1106-1117, 2022.

Quach An, B.; Hong-Hai, N. (2020). Investigation the isotherm and kinetics of adsorption mechanism of herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) on corn cob biochar. *Bioresource Technology Reports*, *11*(100520), 100520. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100520

Rashda; Aryee, A. A.; Kailu, D.; Kiran, S.; Li, Z.; Han, R. Adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and 4-chlorophenol using bio-based activated carbon: Thermodynamics, kinetics and cytotoxicity evaluation. *Environmental Functional Materials*, v. 3, p. 46–58. 2024.

Regalbuto, J. R.; Robles, J. The engineering of Pt/Carbon Catalyst Preparation. University of Illinois at Chicago. 2004.

Reza, M.; Ridho, M. Z.; Wahyuni, F. M.; Haryati, T.; Piluharto, B.; Rahmawati, I. Further insight into the adsorption mechanism of lead(ii) ion on anionic surfactant-modified activated carbon. *Next Materials*, v. 9, 101061, 2025.

Saadi, A. S.; Bousba, S., Riah, A.; Belghit, M.; Belkhalfa, B.; Barour, H. Efficient synthesis of magnetic activated carbon from oak pericarp for enhanced dye adsorption: A one-step approach. *Desalination and Water Treatment*, v. 319, 100420, 2024.

Sobral, I. S. *Produção e aplicação de carvão ativado e carvão ativado funcionalizado do Cocos nucifera associado a Pseudomonas aeruginosa em diferentes tratamentos de águas residuais*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Federal da Bahia, 2024.

Samanth, A.; Chandrasekar, R.; Vinayagam, R.; Selvaraj, R. Density functional theory insights into the adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid by mesoporous biochar. *South African Journal of Chemical Engineering*, v. 54, p. 20–28, 2025.

Selvaraj, R.; Iyer, R. V.; Murugesan, G.; Goveas, L. C.; Varadavenkatesan, T.; Samanth, A.; Vinayagam, R. Modeling 2,4-dichlorophenoxyacetic acid adsorption on candle bush pod-derived activated

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/01/2026 - **Accepted:** 02/04/2026
Vol: 13.05
DOI: 10.66104/qfmhys90
Pages: 1-26

carbon: Insights from advanced statistical physics models. *Journal of Water Process Engineering*, v. 66, 106027, 2024.

Shewatatek, S.; Gonfa, G.; Hailegiorgis, S. M.; Tessema, B. Response surface optimization of chromium (IV) removal with teff straw-based activated carbon. *Results in Chemistry*, v. 15, 102168, 2025.

SKOOG, Douglas A.; HOLLER, F. James; CROUCH, Stanley R. *Fundamentos de química analítica*. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

SIPS, R. On the structure of a catalyst surface. The Journal of Chemical Physics, v. 16, n. 5, p. 490–495, 1948.

Terzyk, A. P. The influence of activated carbon surface chemical composition on the adsorption of acetaminophen (paracetamol) in vitro. *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 177, p. 23–45. 2001.

Vinayagam, R.; Nagendran, V.; Goveas, L. C.; Narasimhan, M. K.; Varadavenkatesan, T.; Samanth, A.; Selvaraj, R. Machine learning, conventional and statistical physics modeling of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) herbicide removal using biochar prepared from Vateria indica fruit biomass. *Chemosphere*, v. 350, 141130, 2024.

Vinayagam, R.; Jogi, S.; Murugesan, G.; Goveas, L. C.; Varadavenkatesan, T.; Samanth, A.; Selvaraj, R. Mesoporous carbon from Vateria indica fruit for efficient 2,4-D herbicide removal: Mechanistic insights from double-layer statistical physics modelling and regeneration studies. *Diamond and Related Materials*, v. 154, 112149, 2025.

Wang, T.; Jiang, M.; Yu, X.; Niu, N.; Chen, L. Application of lignin adsorbent in wastewater Treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, v. 302, 122116, 2022.

Zaaboul, F.; Kaichouh, G.; Haoufazane, C.; Abuelizz, H. A.; Karrouchi, K.; Zarrouk, A.; El Hourch, A. Adsorption of reactive blue day 49 from aqueous solution on commercial activated carbon and polyaniline electrochemically deposited on carbon felt: Kinetic modeling and equilibrium isotherm analysis. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 19, 100713, 2024.

Zanella, O. *Sorção de nitrato em carvão ativado tratado com CaCl2: estudo de ciclos de sorção/regeneração.* Dissertação (Mestrado em Engenharia uímica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.