

Meio Ambiente

Adsorção do herbicida glifosato por argila bentonita utilizando um sistema em batelada

Adsorption of glyphosate herbicide by bentonite clay using a batch system

Cinthia Sany França Xavier¹ , Fernando Fernandes Vieira¹ 

¹ Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, Brasil

RESUMO

Embora a função dos herbicidas seja direcionada, eles podem ocasionar a contaminação dos solos e mananciais, culminando na degradação ambiental com prejuízos à saúde e alterações significativas nos ecossistemas. Diante disso, essa pesquisa avalia a remoção do herbicida glifosato em solução aquosa pelos processos de adsorção em batelada utilizando argila bentonita *in natura* e calcinada. A argila foi lavada, seca e moída manualmente, parte dela foi calcinada a 500°C, e por fim ambas foram peneiradas em MESH 100. Foram avaliadas a influência do pH inicial da solução, da relação massa do adsorvente/volume da solução, do tempo de contato e da concentração do adsorbato, bem como a cinética e o equilíbrio de adsorção através de isotermas. As argilas *in natura* e calcinada apresentaram o pH do ponto de carga zero (pH_{PCZ}) de 6,77 e 4,12, respectivamente. A avaliação do processo de adsorção em diferentes pHs indicou que o mais favorável foi o pH 4 para os materiais *in natura* e 6 para a argila calcinada. Os experimentos em batelada mostraram que a massa não teve influência significativa sobre a remoção de glifosato utilizando a argila *in natura* com relação a variável resposta %rem. O modelo de pseudossegunda ordem foi o que melhor representou a cinética de adsorção do herbicida. A adsorção do glifosato foi melhor representada pela isoterma de Langmuir.

Palavras-chave: Cinética de adsorção; Isotermas de adsorção; Bentonita natural e calcinada

ABSTRACT

Although herbicides are designed for targeted action, they can lead to soil and water contamination, resulting in environmental degradation, health risks, and significant changes in ecosystems. In this context, this study evaluates the removal of glyphosate herbicide from aqueous solution through batch adsorption processes using raw (*in natura*) and calcined bentonite clay. The clay was washed, dried, and manually ground; part of it was calcined at 500 °C, and finally, both samples were sieved to MESH 100. The influence of the initial pH of the solution, the adsorbent mass-to-solution volume ratio, contact time, and adsorbate concentration were evaluated, as well as the adsorption kinetics and equilibrium through

isotherm models. The raw and calcined clays presented a point of zero charge (pHPZC) of 6.77 and 4.12, respectively. The evaluation of the adsorption process at different pH values indicated that the most favorable pH was 4 for the raw material and 6 for the calcined clay. Batch experiments showed that the adsorbent mass did not have a significant influence on glyphosate removal using raw clay, considering the %rem response variable. The pseudo-second-order model best represented the adsorption kinetics of the herbicide, while glyphosate adsorption was best described by the Langmuir isotherm.

Keywords: Adsorption kinetics; Adsorption isotherms; Natural and calcined bentonite

1 INTRODUÇÃO

A utilização em larga escala de agrotóxicos na agricultura brasileira teve início na década de 1960, com a implantação do Programa Nacional de Defensivos Agrícolas (PNDA), que vinculava o uso dessas substâncias à concessão de créditos agrícolas, sendo o Estado um dos principais incentivadores dessa prática (Jobim *et al.*, 2010; Lopes; Albuquerque, 2018).

Segundo Lopes e Albuquerque (2018), estudos apontam que a rápida dissipação dos agrotóxicos nos solos e nas águas, assim como seu poder de escoamento, devem ser considerados na discussão sobre o impacto desses produtos no meio ambiente, uma vez que podem contaminar recursos hídricos, interferindo nos organismos aquáticos.

Essas substâncias são amplamente utilizadas para combater e prevenir pragas agrícolas. Com o auxílio de herbicidas, pesticidas, inseticidas e afins, os produtores evitam a ação danosa de organismos nocivos às plantações e à flora nativa, propiciando uma colheita mais rápida e maior produtividade (Frota; Siqueira, 2021).

Embora os agrotóxicos desempenhem um papel relevante na produção de alimentos em larga escala, o impacto ambiental causado por essas substâncias tem sido amplamente relatado. Diversos pesquisadores verificaram que várias classes de agrotóxicos podem causar danos ao sistema reprodutor e atuam como precursores de câncer (Melo; Naval, 2023; Friedrich *et al.*, 2021).

Nesse sentido, O interesse em estudar a remoção de agrotóxicos em águas contaminadas utilizando argila bentonita deve-se à sua persistência em meio

aquático e aos efeitos adversos causados aos organismos aquáticos e seres humanos. Além disso, a reutilização do material adsorvente pode proporcionar uma redução expressiva nos custos operacionais, considerando que a adsorção é um processo de baixa energia e o material utilizado apresenta estabilidade.

Nessa perspectiva, essa problemática motivou avaliar a remoção do herbicida glifosato em efluentes simulados, pela técnica da adsorção em batelada por meio de estudos da influência do pH inicial da solução, da massa do adsorvente, da concentração do glifosato e do tempo de contato, utilizando a argila bentonita chocolate *in natura* e após tratamento térmico, uma vez que essa possui características relevantes para utilização em escala industrial, como alta capacidade de troca iônica, de sorção e baixo custo de aquisição, bem como alta disponibilidade no Brasil (Amorim *et. al*, 2006; Moraes *et. al*, 2020).

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para os ensaios, foi utilizado o produto comercial Roundup® Original DI, fabricado pela Monsanto, que contém o sal de Di-amônio de N-(fosfonometil) glicina (445 g.L⁻¹) e o equivalente ácido de N-(fosfonometil) glicina (370 g.L⁻¹) como reagente. O herbicida glifosato, por não apresentar grupos cromóforos em sua molécula, dificulta sua detecção e quantificação. Nesse contexto, métodos espectrofotométricos surgem como uma alternativa viável aos métodos cromatográficos convencionais.

O método utilizado neste estudo baseia-se em reagentes que formam compostos capazes de emitir radiação eletromagnética, que pode ser absorvida nas regiões ultravioleta (UV) e visível (UV-VIS) do espectro eletromagnético. A metodologia proposta por Bhaskara e Nagaraja (2006) consiste na reação do glifosato com ninhidrina (2,2-diidroxi-hidrindeno-1,3-diona) como reagente cromogênico, utilizando o molibdato de sódio como catalisador. Essa reação resulta na formação do produto roxo de *Ruhemann*.

O processo de preparação do material adsorvente envolveu a utilização de argila chocolate *in natura*, que foi lavada com água destilada para remoção de impurezas. Em seguida, o material foi secado em estufa (modelo SSD, SolidSteel) a $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, com o objetivo de eliminar a umidade natural presente nas argilas.

De acordo com Araujo *et al.* (2013), os picos endotérmicos de desidroxilação das argilas ocorrem em torno de 480°C , resultando em modificações estruturais devido à perda de grupos hidroxila. Deste modo, uma fração da amostra *in natura* foi submetida a um processo de ativação térmica (calcinação) em forno mufla (modelo EDG 1800 3P-S), onde permaneceu a 500°C por 24 horas para aumentar sua estabilidade estrutural e, conseqüentemente, melhorar sua eficiência no processo de adsorção.

Após a secagem e calcinação, as amostras *in natura* e calcinadas foram moídas manualmente com um almofariz. As partículas resultantes foram então classificadas em peneira ABNT nº 100, garantindo que apenas aquelas com diâmetro inferior a 0,149 mm fossem utilizadas nos testes de caracterização e nos experimentos em batelada, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Argilas bentonitas após processo de moagem: (a) *in natura*; (b) calcinada



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

A determinação do Ponto de Carga Zero da argila *in natura* e calcinada foi realizada segundo a metodologia descrita por Freitas *et al.* (2015), conforme as seguintes etapas:

1ª Etapa: Foram adicionados 25 mL de solução de cloreto de potássio (KCl) 0,1 mol.L⁻¹ em uma série de frascos Erlenmeyer, ajustados para diferentes valores de pH inicial (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11) utilizando ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH) na concentração de 0,1 mol.L⁻¹.

2ª Etapa: Em seguida, 0,25 g de material adsorvente foi adicionado a cada Erlenmeyer. Os frascos foram agitados em uma mesa agitadora modelo Orbital de Bancada (marca Novatecnica®) durante 24 horas a uma rotação de 120 rpm.

3ª Etapa: Após esse período, o pH final foi medido utilizando um medidor de pH modelo TEC-3MP (marca Tecnal). A diferença entre o pH inicial e final da solução ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{final}} - \text{pH}_{\text{inicial}}$) foi calculada e plotada em um gráfico de ΔpH em função do $\text{pH}_{\text{inicial}}$. O valor de pH em que ΔpH for igual a zero corresponde ao Ponto de Carga Zero (pH_{pcz}).

Para os testes de remoção do glifosato, foi preparada uma solução estoque com concentração de 500 mg.L⁻¹ do herbicida em água destilada. A partir dessa solução, foram preparadas as soluções de trabalho por diluição.

Uma curva de calibração foi elaborada a partir da solução estoque de glifosato, seguindo a metodologia proposta por Tzaskos *et al.* (2012). Alíquotas variando de 40 a 200 μL foram transferidas para tubos de ensaio, aos quais foram adicionados 0,5 mL de ninhidrina a 5% e 0,5 mL de molibdato de sódio a 5%. Os tubos foram lacrados e mantidos em banho-maria a $92^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por cerca de 12 minutos para promover a formação da coloração roxa característica.

Após o aquecimento, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente, transferidas quantitativamente para frascos volumétricos de 5 mL e o volume foi completado com água destilada. A absorbância foi medida em um espectrofotômetro UV-Vis, com um comprimento de onda máximo de 570 nm. A partir desses dados, foi construída uma curva de calibração com a absorbância em função da concentração de glifosato, na faixa de 4 a 20 mg.L⁻¹.

2.1 Adsorção em batelada

Foram realizados testes para avaliar o pH do meio e a remoção do glifosato em sistema de batelada, seguindo a metodologia proposta por Mayakaduwa *et al.* (2016). Para isso, foram adicionados 0,25 g de argila a uma série de frascos Erlenmeyer contendo uma solução de glifosato com concentração inicial de 10 mg.L⁻¹.

Em seguida, o pH da solução foi ajustado para cinco diferentes valores (2, 4, 6, 8 e 10) utilizando soluções de ácido clorídrico 0,1M ou NaOH 0,1M. As soluções foram mantidas sob agitação constante de 140 rpm por 3 horas à temperatura ambiente, em uma mesa agitadora (modelo NT 145, Novatécnica).

Após o período de agitação, as amostras foram centrifugadas (modelo Maxim Lab CT - 4000), e a quantificação da remoção do glifosato foi realizada utilizando espectrofotometria UV-visível, conforme a metodologia descrita por Tzaskos *et al.* (2012). Nesse procedimento, foram misturados 4 mL da amostra com 0,5 mL de ninhidrina a 5% e 0,5 mL de molibdato de sódio a 5%. A mistura foi mantida em banho-maria por 12 minutos a 92°C ± 3°C para permitir a formação do produto roxo de Ruhemann, que apresenta máxima absorção em 570 nm. As leituras foram realizadas em um espectrofotômetro UV-Vis (modelo GTA-96, Global Analyzer). O pH em que a argila apresentou maior capacidade de adsorção do glifosato foi selecionado para os ensaios subsequentes de adsorção.

Para avaliar os fatores que influenciam o processo de adsorção, foram realizados ensaios de batelada com base em um planejamento fatorial completo 2³. O objetivo foi estudar a influência das variáveis no processo de adsorção utilizando argila chocolate *in natura* e após tratamento térmico.

Foram analisadas as variáveis independentes: a massa do adsorvente, a concentração do adsorvato (glifosato) e o tempo de contato entre o adsorvente e o adsorvato. Cada fator foi codificado em três níveis: mínimo (-1), ponto central (0) e máximo (+1), conforme especificado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores das variáveis independentes

Fatores	Níveis		
	-1	Ponto central (0)	+1
Massa (g)	0,1	0,2	0,3
Concentração (mg.L ⁻¹)	10	15	20
Tempo (min)	30	60	90

Fonte: Organização dos autores

Com base nas condições experimentais previamente definidas, os experimentos de adsorção foram realizados em frascos Erlenmeyer de 125 mL, contendo a massa de adsorvente e 25 mL da solução contaminada. Os ensaios foram mantidos sob agitação constante de 140 rpm em uma mesa agitadora orbital de bancada (modelo NT 145, Novatécnica), a temperatura ambiente. Após o tempo de contato determinado, as amostras foram separadas por centrifugação (modelo Maxim Lab CT – 4000) a 2500 rpm por 15 minutos, com o objetivo de sedimentar todo o sólido em suspensão.

Em seguida, a concentração de glifosato nas soluções foi determinada conforme a metodologia proposta por Tzaskos *et al.* (2012). A eficiência de adsorção do adsorvente foi avaliada com base na quantidade de glifosato adsorvido por massa de adsorvente (qt) e na redução da concentração do glifosato (%red). Essas duas variáveis foram as respostas dos experimentos.

Os resultados obtidos no planejamento experimental foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), com o objetivo de identificar os fatores que influenciaram significativamente a remoção do glifosato da solução, utilizando as argilas bentonitas. O nível de confiança adotado foi de 95% ($\alpha = 0,05$).

A influência das variáveis independentes foi avaliada por meio de análise estatística, utilizando o software STATISTICA, fornecido pelo Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA/UEPB).

A quantidade de material adsorvido pela argila foi calculada utilizando a equação 1, enquanto o percentual de remoção foi determinado pela equação 2.

$$qt = \frac{V \cdot (C_o - C_t)}{m} \quad (1)$$

$$\%Red = \frac{C_o - C_t}{C_o} \cdot 100\% \quad (2)$$

Onde, q_t representa a quantidade de herbicida adsorvido pela argila (mg.g^{-1}); C_o é a concentração inicial do herbicida (g.L^{-1}); C_t é a concentração do herbicida em um instante de tempo t (g.L^{-1}); m a massa do adsorvente em base seca (g); V o volume da solução do herbicida (L) e %red a porcentagem de redução da concentração do glifosato (%)

2.1.1 Cinética de adsorção

Os ensaios de cinética foram realizados utilizando as condições que apresentaram melhores respostas para o q_t no planejamento experimental, a fim de se obter as curvas cinéticas, variando apenas o tempo de contato.

Para a argila *in natura* os ensaios foram realizados em *erlenmeyers* contendo 25mL da solução do herbicida, na concentração de 10mg.L^{-1} com pH 4 e 0,1 g de massa do adsorvente. De forma similar, para a argila calcinada foram utilizadas a concentração de glifosato de 10mg.L^{-1} e 0,1 g de massa do adsorvente, no entanto, o pH utilizado para este material foi 6.

As amostras permaneceram sob agitação de 140rpm pelo período de até 120 minutos, em que as amostras líquidas eram retiradas da mesa agitadora em intervalos de 5 minutos. O material sobrenadante foi centrifugado sob uma velocidade de rotação de 2500rpm durante 15 minuto para a sedimentação dos sólidos em suspensão. Por fim, foi realizada a concentração remanescente de cada amostra por meio de leitura de absorbância em espectrofotômetro UV-visível.

Para representar a cinética de adsorção dos ensaios experimentais, os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos de pseudoprimeira ordem, pseudossegunda ordem e equação de Elovich. Os parâmetros dos modelos foram estimados com auxílio do *software* STATISTICA 12.

2.1.2 Isotermas de adsorção

Assim como na cinética, o estudo do equilíbrio foi realizado utilizando a melhor resposta obtida no planejamento experimental com diferentes concentrações do glifosato, estes foram colocados sob agitação a 140rpm por três horas, ao final de cada ensaio, o material sobrenadante foi centrifugado, sob as mesmas condições das análises cinéticas, para a sedimentação dos sólidos em suspensão.

Em seguida, a concentração de equilíbrio foi determinada a partir da leitura de absorbância. A quantidade do herbicida adsorvido por massa de adsorvente no equilíbrio foi calculada utilizando a equação 3 e os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich e Sips.

$$q_e = \frac{V \cdot (C_o - C_e)}{m} \quad (3)$$

Onde,

q_e é a quantidade de herbicida removido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg.g^{-1});

C_e é a concentração do herbicida no equilíbrio (mg. L^{-1})

3 RESULTADOS

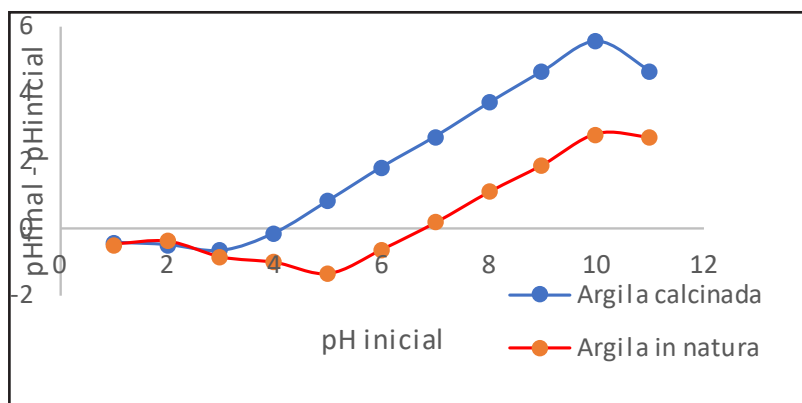
3.1 Ponto de Carga Zero (PCZ)

O cálculo do PCZ foi realizado utilizando os valores de $\text{pH}_{\text{inicial}}$ e pH_{final} , onde foram produzidos os gráficos de $\text{pH}_{\text{inicial}}$ em função de $\text{pH}_{\text{final}} - \text{pH}_{\text{inicial}}$ para cada amostra, como apresentado na figura 2. O valor obtido para o pH_{PCZ} da argila chocolate *in natura* foi igual a 6,77, enquanto a argila após tratamento térmico apresentou um pH_{PCZ} igual a 4,12.

Observa-se que o tratamento térmico realizado na argila *in natura* resultou em uma superfície mais ácida. Essa diferença pode ser explicada pela maior presença de

grupos hidroxila nas argilas naturais, enquanto a argila calcinada sofre desidroxilação durante o processo de calcinação (Araujo *et al.*, 2013). A presença desses grupos ácidos confere um caráter mais hidrofílico à argila, o que facilita a interação com adsorvatos dissolvidos na solução.

Figura 2 – Dados experimentais do pH_{PCZ} para as argilas *in natura* e calcinada



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Quando as argilas entram em contato com soluções líquidas, o comportamento da superfície depende do pH da solução em relação ao pH_{PCZ} . Em soluções com pH inferior ao pH_{PCZ} , a superfície da argila fica carregada positivamente, enquanto em soluções com pH superior ao pH_{PCZ} , a superfície é carregada negativamente, favorecendo a adsorção de cátions (Marin *et al.*, 2014).

Mahmoud (2022) avaliou o efeito da bentonita na remoção direta do corante amarelo 50 e encontrou que o valor de pH_{PCZ} da bentonita era de aproximadamente 7,85. De maneira similar, Naghizadeh *et al.* (2017) determinaram o pH_{PCZ} da bentonita natural e encontraram um valor de 7,4. Esses resultados são consistentes com o estudo de Nwosu *et al.* (2018), que compararam as argilas bentonita e caulim, encontrando um valor de pH_{PCZ} de 7,8 para a bentonita sem modificações.

Em um estudo comparativo entre a bentonita bruta e a bentonita calcinada a 500°C, Ouakouak *et al.* (2020) observaram que a argila calcinada, após dispersão em solução de CaCl_2 , apresentou um pH_{PCZ} de 7,04, enquanto a bentonita bruta

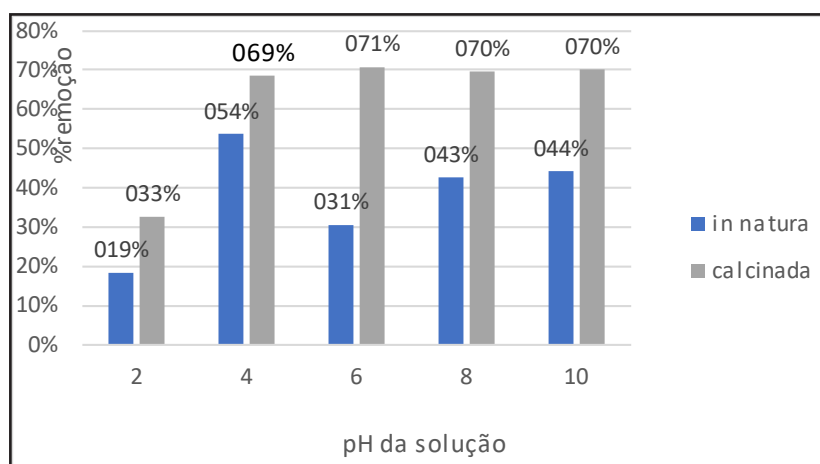
apresentou um pHPCZ de 7,38, evidenciando a alteração nas propriedades da argila após o processo de calcinação.

3.2 Ensaios de adsorção em batelada

Os ensaios de adsorção em batelada foram conduzidos utilizando a argila bentonita *in natura* e a argila calcinada, com o objetivo de avaliar a influência do pH do meio, da concentração do herbicida, da massa do adsorvente e do tempo de contato entre o adsorvente e o adsorvato. Além disso, foram investigadas a cinética e o equilíbrio de adsorção das argilas, por meio da construção das isotermas de adsorção.

O pH do meio exerce uma influência significativa no processo de adsorção, pois, além de determinar a carga superficial do adsorvente, também regula a distribuição das espécies químicas do adsorvato. Sabendo da importância do pH na carga superficial do material adsorvente e na molécula de glifosato, foi necessário determinar um valor de pH específico que proporcionasse a melhor remoção do herbicida. Os resultados obtidos para essa análise estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Porcentagem de remoção do glifosato em diferentes condições de pH



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

O glifosato é um aminoácido fosfonado e possui a capacidade de apresentar cargas positivas e negativas. Na maioria dos casos, o glifosato exibe uma carga

negativa, no entanto, ele pode ser descarregado ou apresentar carga positiva em pH abaixo de 2,29.

O número de cargas negativas do glifosato aumenta com o pH (Yamaguchi *et al.*, 2016). Além disso, segundo estudos de Amarante Junior *et al.* (2002), o mesmo se apresenta totalmente dissociado acima de pH 11, onde é totalmente dissociado, dessa forma ele permite a variedade de pH em que se pode trabalhar.

Como observado na Figura 3, o valor de pH que apresentou maior remoção do glifosato para os materiais *in natura* (53,73%) foi o pH 4, já para a argila calcinada foi o pH igual a 6 apresentando uma porcentagem de remoção de aproximadamente 71%. Dessa forma, foi considerado o pH 4 para os ensaios posteriores de adsorção utilizando as argilas *in natura* e o pH de 6 para a argila calcinada.

Marcelino *et al.* (2021) utilizaram o sabugo de milho para remoção de formulação comercial de glifosato em fase aquosa pela técnica de adsorção e obtiveram um pH_{pCZ} para o biocarvão de sabugo de milho ativado com ácido fosfórico igual a 8 e concluíram que a remoção, assim como a quantidade de glifosato adsorvido pelo adsorvente em estudo, apresentaram comportamentos semelhantes, marcados por baixo desempenho em pH extremamente ácido, tendo observado que a adsorção máxima de glifosato ocorreu em pH 7, no qual o glifosato apresenta três dissociações (alta densidade de cargas negativas), e que neste valor a superfície do adsorvente se apresenta positivamente carregada ($pH < pH_{pCZ}$), acredita-se que a adsorção do glifosato sobre a superfície do bioadsorvente tenha ocorrido por meio de interações eletrostáticas.

Herath, Poh e Ng (2019) analisaram o desempenho de um biocarvão oriundo de resíduos de madeira em diferentes níveis de pH e verificaram que o biocarvão apresentou um bom desempenho em níveis de pH mais baixo (pH 5).

3.2.1 Análise do planejamento experimental

O planejamento fatorial 2^3 completo teve como variáveis resposta a quantidade de glifosato adsorvido por massa de adsorvente utilizada (qt) e a redução da

concentração do glifosato (%rem). A Tabela 2 apresenta o planejamento fatorial para as argilas *in natura* e calcinada, além da média dos dados obtidos (qt e %rem).

Os resultados mostram que a máxima remoção de glifosato para o adsorvente *in natura* atingiu aproximadamente 57% de eficiência, conforme observado no experimento 6. O tratamento térmico realizado na argila *in natura* resultou em um aumento significativo tanto na quantidade de glifosato removido quanto na porcentagem de remoção do herbicida em todos os experimentos do planejamento. A argila calcinada atingiu uma remoção máxima de 85,62% de eficiência.

Tabela 2 – Planejamento fatorial 2^3 com as variáveis resposta

Experimento	Argila <i>in natura</i>		Argila calcinada	
	qt (mg.g ⁻¹)	rem(%)	qt (mg.g ⁻¹)	rem (%)
1	12,85	51,41	17,35	69,39
2	3,74	44,84	6,97	83,61
3	9,65	19,30	19,31	38,62
4	3,31	19,84	10,39	62,32
5	14,08	56,31	21,37	85,48
6	4,76	57,08	7,13	85,62
7	12,20	24,40	20,57	41,14
8	5,60	33,60	12,07	72,40
9	8,24	43,92	13,64	72,75
10	8,88	47,36	13,89	74,08
11	8,84	47,14	13,82	73,70

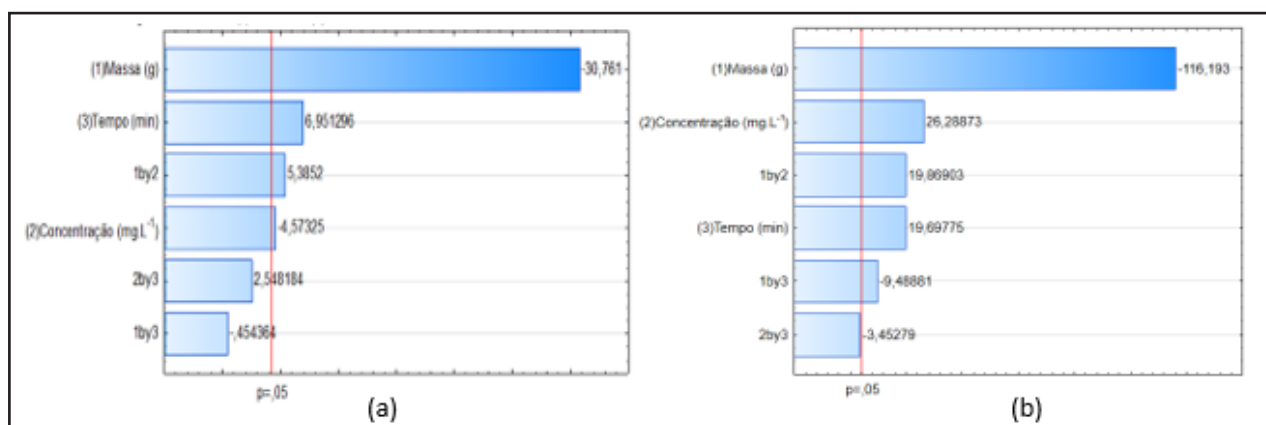
Fonte: Organização dos autores

O experimento 5 apresentou as maiores respostas em relação a q_t para o material *in natura* e calcinado, 14,08 e 21,37 mg.g⁻¹, respectivamente. Ambos os experimentos apresentaram os mesmos valores para massa (0,10g), concentração (10mg.L⁻¹) e tempo (90min).

Por meio dos gráficos de Pareto, indicados nas figuras 4 e 5, são apresentadas as influências das variáveis independentes (massa do adsorvente, concentração

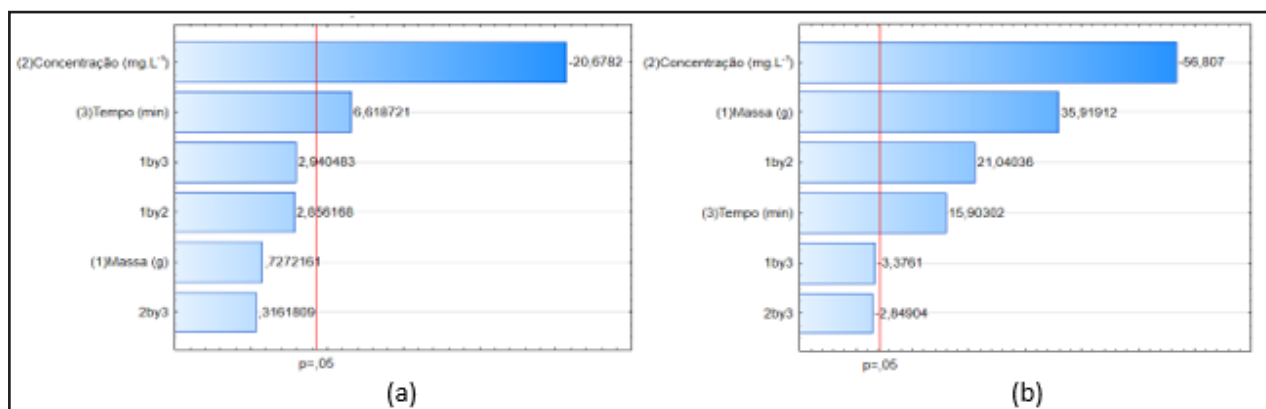
do glifosato e tempo de contato) nas variáveis respostas quantidade de glifosato adsorvido (q_t) e porcentagem de remoção do glifosato (%rem), respectivamente, para os materiais *in natura* e após tratamento térmico.

Figura 4 – Diagrama de Pareto resultante do planejamento fatorial tendo como variável resposta q_t para os materiais: (a) *in natura*, (b) com tratamento térmico



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Figura 5 – Diagrama de Pareto resultante do planejamento fatorial tendo como variável resposta %rem para os materiais: (a) *in natura*, (b) com tratamento térmico



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

No diagrama de Pareto as barras que cruzam a linha de referência para $p = 0,05$ são estatisticamente significativas ao modelo ao intervalo de confiança de 95%. Dessa forma, analisando a Figura 4(a) é possível verificar que as variáveis independentes

massa do adsorvente, tempo de contato entre o adsorvente e o adsorbato, a concentração do glifosato e a interação entre ele e a massa foram estatisticamente significativas ao intervalo de confiança de 95% para a variável resposta q_t dentro do domínio experimental para o material *in natura*.

Com relação ao material após tratamento térmico verifica-se que todas as variáveis independentes foram estatisticamente significativas ao intervalo de confiança de 95% para a variável resposta q_t , exceto a interação entre a concentração e o tempo de contato, assim como pode ser verificado na Figura 4 (b).

Em ambos os casos a massa apresentou efeito negativo e o tempo de contato efeito positivo, indicando que a capacidade de adsorção é favorecida com o aumento do tempo de contato ou com a diminuição da massa do adsorvente, pois quanto maior a dosagem do adsorvente maior a presença de sítios ativos resultando em uma distribuição das moléculas a serem adsorvidas, resultando em capacidades de adsorção menores.

Marcelino *et al.* (2021) obtiveram resultados semelhantes uma vez que ao analisarem o efeito da massa de adsorvente concluíram que menores valores de massa apresentaram os melhores resultados para q_t .

O aumento da eficiência de remoção de glifosato em relação à massa de adsorvente utilizada acontece em razão do aumento da área de superfície disponível para adsorção; contudo, após determinada massa de adsorvente, o acréscimo não promoverá o aumento da adsorção, em razão da interferência entre os locais de ligação do adsorvente (Kumar *et al.*, 2014), o que pode justificar a diminuição na remoção em massas superiores a 0,5 g.

Além disso, a argila *in natura* apresentou efeito negativo para a variável concentração, à medida que há a diminuição dessa variável ocorrerá uma maior quantidade de glifosato adsorvido. Dessa forma, em concentrações mais elevadas, a competição para os sítios ativos da superfície será elevada, consequentemente, menores quantidades de adsorção serão obtidas.

Contudo, a argila após tratamento térmico apresentou efeito positivo, indicando nesse caso, que quanto maior a concentração do glifosato mais eficiente será a capacidade de adsorção devido a maior quantidade de moléculas de glifosato presente no meio fluido, gerando uma maior força motriz no processo fazendo com que a argila adsorva mais moléculas de glifosato.

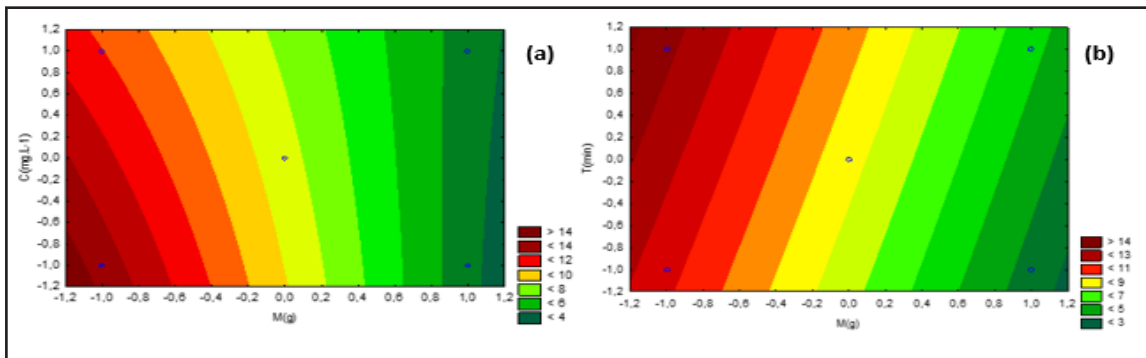
A concentração do adsorvato na superfície do adsorvente tem relação direta com a estrutura morfológica e o tamanho desta. Durante a calcinação das argilas, ocorre a evaporação da água e a distância entre as partículas diminui, provocando uma retração e redução da porosidade com a aproximação das partículas, o que pode explicar o fato da variável concentração ter apresentado um comportamento distinto entre os adsorventes utilizados.

Tratando-se da variável resposta porcentagem de remoção do glifosato é possível verificar que para a argila *in natura* apenas a concentração e o tempo de contato foram estatisticamente significativos ao intervalo de confiança de 95%, Figura 5(a). Já a argila após calcinação as variáveis concentração, massa do adsorvente, tempo de contato e a interação entre a massa e a concentração foram significativas, Figura 5(b).

Os gráficos das curvas de contorno apresentadas nas Figuras 6 e 7 possibilitam a verificação da influência das variáveis massa-concentração e massa-tempo nas variáveis respostas q_t e %rem.

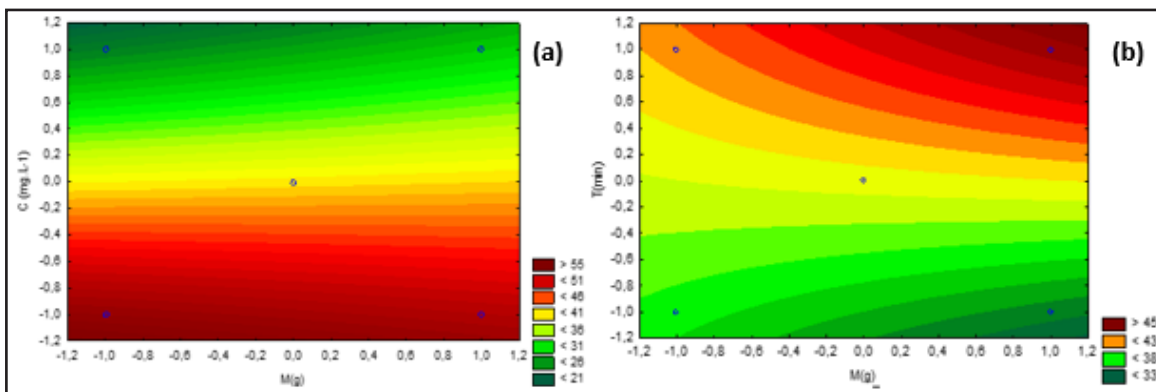
As curvas de contorno demonstram que para a obtenção de melhores resultados para o q_t , com relação ao planejamento realizado com a argila *in natura*, faz-se necessário menores valores de massa de adsorvente e de concentração do glifosato, bem como maiores valores para o tempo de contato, confirmando assim os resultados obtidos no diagrama de Pareto apresentado na Figura 4.

Figura 6 – Gráficos de contorno para a variável resposta q_t da argila *in natura*, analisando as interações entre as variáveis independentes: (a) massa e concentração; (b) massa e tempo



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Figura 7 – Gráficos de contorno para a variável resposta %rem da argila *in natura*, analisando as interações entre as variáveis independentes: (a) massa e concentração; (b) massa e tempo



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Onde:

M representa a massa (g);

T o tempo de contato (min);

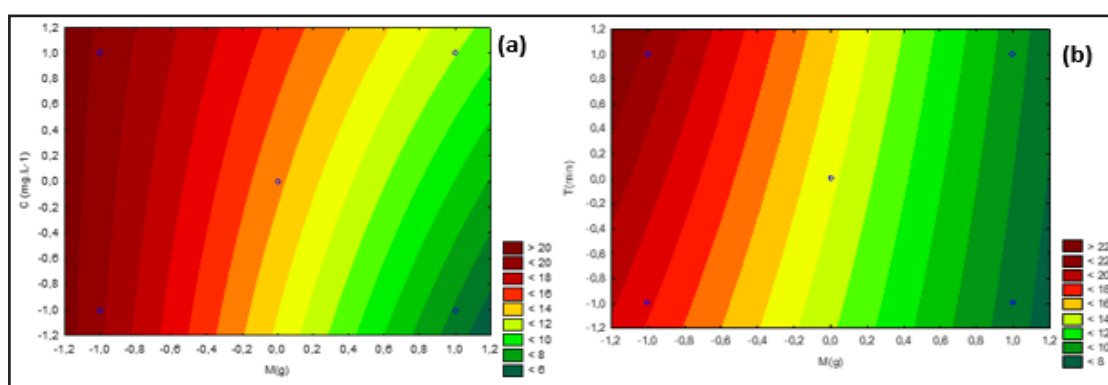
C a concentração do adsorbato (mg.L^{-1})

De forma similar, os gráficos das curvas de contorno tendo como variável resposta a porcentagem de remoção do glifosato, Figuras 7(a) e 7(b), indicam que menores valores para a concentração de glifosato e maiores valores para o tempo de

contato resultarão em melhores porcentagens de remoção do herbicida, além disso, em concordância com os gráficos de pareto da Figura 5(a), a massa do adsorvente não apresentou influência significativa para a variável resposta %rem.

Com relação aos resultados da argila após o processo de tratamento térmico, os gráficos de contorno, figuras 8(a) e 8(b), indicam que a diminuição da massa e o aumento da concentração ou do tempo de contato resultarão em melhores resultados para a quantidade de glifosato adsorvido (q_t), assim como pode ser verificado nos experimentos 3, 5 e 7, que apresentaram os melhores resultados para o q_t .

Figura 8 – Gráficos de contorno para a variável resposta q_t da argila calcinada, analisando as interações entre as variáveis independentes: (a) massa e concentração; (b) massa e tempo



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros da análise de variância (ANOVA) para os ajustes do modelo do material *in natura* e calcinado tendo como variáveis dependentes a quantidade de glifosato adsorvido e o percentual de remoção de glifosato, respectivamente, podendo verificar se o modelo proposto é significativo, preditivo ou se apresenta falta de ajuste.

Tabela 3 – ANOVA e coeficiente de determinação do planejamento experimental fatorial para a argila *in natura* e calcinada tendo como variável dependente o qt e a %rem

		Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Fcal/Ftab	R ²
Argila natural	qt	Regressão	136,7170	6	136,7170	77,32	0,990
		Resíduo	0,5738	4	0,2869		
		Total	137,2908	10	-		
	%rem	Regressão	1808,4390	6	1808,4390	4,19	0,820
		Resíduo	140,1200	4	70,0610		
		Total	1948,5590	10	-		
Argila calcinada	qt	Regressão	246,7276	6	246,7276	25,58	0,969
		Resíduo	3,1300	4	1,5650		
		Total	249,8576	10	-		
	%rem	Regressão	2435,5892	6	5232,3410	5,57	0,861
		Resíduo	142,9183	4	152,5150		
		Total	2578,5070	10	-		

Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Os dados apresentaram boa correlação para as duas argilas na adsorção do glifosato, uma vez que para as variáveis resposta qt e %rem os valores dos coeficientes de determinação (R²) indicam que 99% e 82% dos dados de adsorção utilizando a argila *in natura* se ajustaram bem ao modelo considerado, já com relação a argila após calcinação 96,9% e 86,1% dos dados apresentaram bons ajustes.

Segundo Neto *et al.* (2001), um modelo pode ser considerado estatisticamente significativo se Fcalculado > Ftabelado e preditivo se essa relação for superior a 10. Comparando os valores de Fcalculado e Ftabelado verifica-se que os modelos para resposta q_t são estatisticamente significativos e preditivos, uma vez que a razão entre o Fcalculado e o Ftabelado para regressão está acima de 10, em ambos os casos, ao nível de confiança de 95%. Já para a variável resposta %rem os modelos podem ser considerados como estatisticamente significativo, visto que o teste F foi superior a 1.

3.2.3 Cinética de adsorção

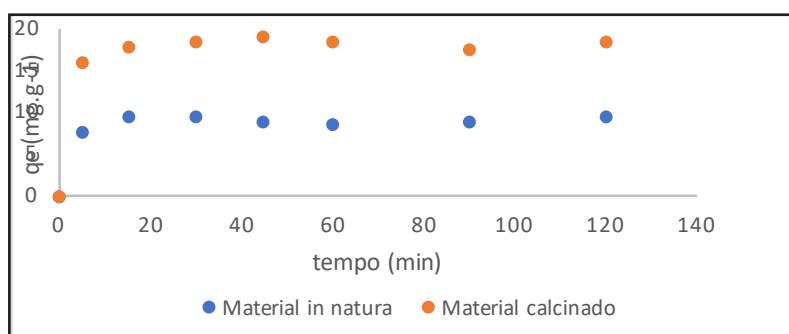
O estudo da cinética de adsorção revela a influência do tempo de contato sobre a quantidade de corante adsorvido pelo material adsorvente. Dessa forma,

uma vez determinada as melhores condições de trabalho a partir do planejamento experimental fatorial, realizou-se o estudo cinético visando investigar os mecanismos que controlam a cinética de adsorção.

Nesse trabalho foram selecionados os modelos de pseudoprimeira ordem, pseudossegunda ordem e a equação de Elovich para modelagem dos dados experimentais. A seguir, é realizado a discussão dos resultados da cinética de adsorção.

De acordo com a Figura 9 é possível observar que tanto o adsorvente *in natura* quanto o calcinado apresentaram uma maior quantidade de herbicida adsorvido com o aumento do tempo de contato apresentando-se mais rápido no início do processo e mais lento com a aproximação do equilíbrio. Esse comportamento pode ser justificado pela diminuição dos sítios ativos disponíveis na superfície do material adsorvente no decorrer do tempo.

Figura 9 – Gráfico da quantidade de herbicida adsorvido no tempo para o material *in natura* e calcinado



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

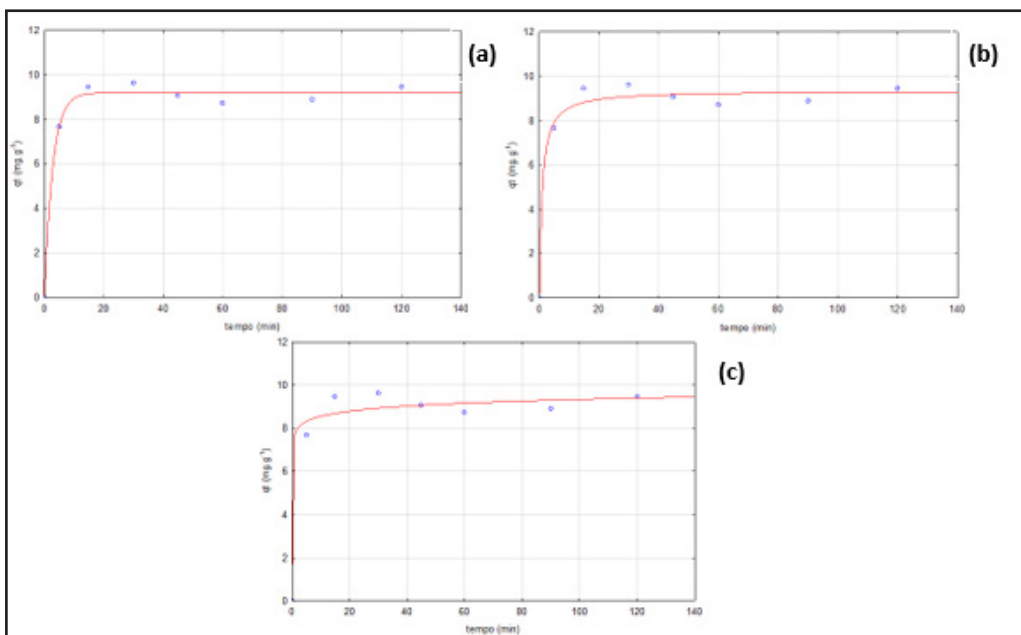
Verifica-se que o equilíbrio de adsorção foi atingido em aproximadamente 30 min de ensaio, considerado relativamente rápido quando comparado com outros resultados apresentados na literatura (Sen; Datta; Mondal, 2019, Yamaguchi; Rubio; Bergamasco, 2019, Herath *et al.*, 2016).

Nas Figuras 10 e 11 estão representados os gráficos do tempo (t) contra a capacidade de adsorção (q_t) e as curvas ajustadas aos modelos cinéticos de

pseudoprimeira ordem, pseudosegunda ordem e equação de Elovich e aos dados experimentais obtidos para os materiais *in natura* e calcinado.

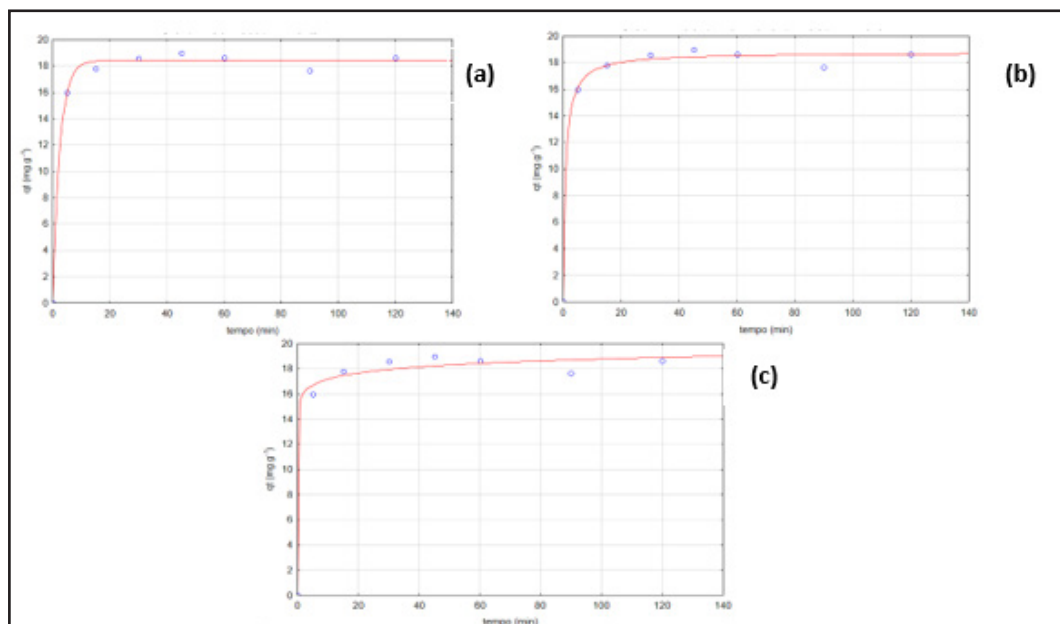
As Figuras 10 e 11 mostram que os modelos de pseudoprimeira ordem, pseudossegunda ordem e a equação de Elovich descrevem adequadamente o comportamento da curva da quantidade adsorvida. Observa-se que o equilíbrio de adsorção foi alcançado em aproximadamente 30 minutos de ensaio, o que é considerado relativamente rápido quando comparado a outros resultados encontrados na literatura (Sen; Datta; Mondal, 2019; Yamaguchi; Rubio; Bergamasco, 2019; Herath *et al.*, 2016).

Figura 10 – Quantidade adsorvida pelo tempo na adsorção do glifosato em argila bentonita *in natura* e ajuste dos modelos cinéticos: (a) pseudoprimeira ordem, (b) pseudossegunda ordem, (c) equação de Elovich



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Figura 11 – Quantidade adsorvida pelo tempo na adsorção do glifosato em argila bentonita calcinada e ajuste dos modelos cinéticos: (a) pseudoprimeira ordem, (b) pseudossegunda ordem, (c) Elovich



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

As análises de variância, os coeficientes de determinação e o teste F para os modelos cinéticos de pseudoprimeira ordem, pseudossegunda ordem e a equação de Elovich aplicados às argilas *in natura* e calcinada estão apresentados na Tabela 4. Os resultados indicam que todos os modelos apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,98, e a razão entre o valor calculado de F ($F_{\text{calculado}}$) e o valor tabelado de F (F_{tabelado}) foi maior que 10. Isso significa que, segundo o teste F, todos os modelos analisados são estatisticamente significativos e preditivos dentro de um intervalo de confiança de 95%.

Embora os valores de R^2 entre os modelos sejam muito próximos, o modelo de pseudossegunda ordem conseguiu reproduzir de maneira mais satisfatória o comportamento da curva da quantidade adsorvida ao longo do tempo. Além disso, apresentou um valor mais alto para o teste F, tanto para os dados experimentais do material *in natura* quanto para o calcinado.

Relatos na literatura sugerem que o modelo de pseudossegunda ordem é o mais adequado para descrever a cinética de adsorção do glifosato (Chen *et al.*, 2016; Besghaier *et al.*, 2022), indicando que o processo de adsorção envolve predominantemente mecanismos de quimissorção. Esse comportamento sugere que a adsorção é controlada principalmente por interações de superfície e que a adsorção do glifosato na argila bentonita ocorre em uma monocamada, com troca ou partilha de elétrons.

Tabela 4 – ANOVA da cinética de adsorção, utilizando argila *in natura* e calcinada para os modelos de pseudoprimeira ordem, pseudossegunda ordem e Equação de Elovich

		Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Fcal/Ftab	R ²
Argila natural	Pseudoprimeira ordem	Regressão	564,899	2	282,449	124,135	0,9922
		Resíduo	2,655	6	0,442		
		Total	567,554	8	-		
	Pseudossegunda ordem	Regressão	566,418	2	283,209	290,938	0,9956
		Resíduo	1,135	6	0,189		
		Total	567,554	8	-		
	Elovich	Regressão	565,738	2	282,869	181,725	0,9875
		Resíduo	1,816	6	0,302		
		Total	567,554	8	-		
Argila calcinada	Pseudoprimeira ordem	Regressão	2283,705	2	1141,853	981,238	0,9976
		Resíduo	1,358	6	0,226		
		Total	2285,063	8	-		
	Pseudossegunda ordem	Regressão	2283,730	2	1141,865	999,916	0,9977
		Resíduo	1,333	6	0,222		
		Total	2285,063	8	-		
	Elovich	Regressão	2282,220	2	1141,110	468,406	0,9951
		Resíduo	2,843	6	0,474		
		Total	2285,063	8	-		

Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Yamaguchi, Rubio e Bergamasco (2019) obtiveram resultados similares utilizando carvão ativado granular impregnado com 1% de ferro e 0,5% de manganês (m/m) para remoção de glifosato em soluções aquosas, em que se verificou que os dados experimentais cinéticos em batelada se ajustaram melhor ao modelo de pseudossegunda ordem.

De forma similar, Marcelino, Cuba e Teran (2021) realizaram o estudo da cinética de adsorção do biocarvão de sabugo de milho ativado com ácido fosfórico (BCA) para potencial remoção do herbicida glifosato em meio aquoso e verificaram que o modelo de pseudossegunda ordem se ajustou melhor aos dados.

Cuba *et al.* (2018) estudaram a adsorção de glifosato em biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar e verificaram que os dados experimentais de cinética se ajustaram melhor ao modelo de pseudossegunda ordem com uma constante de $0,8428 \text{ g mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ indicando que a quimiossorção pode ser a etapa que controla o processo.

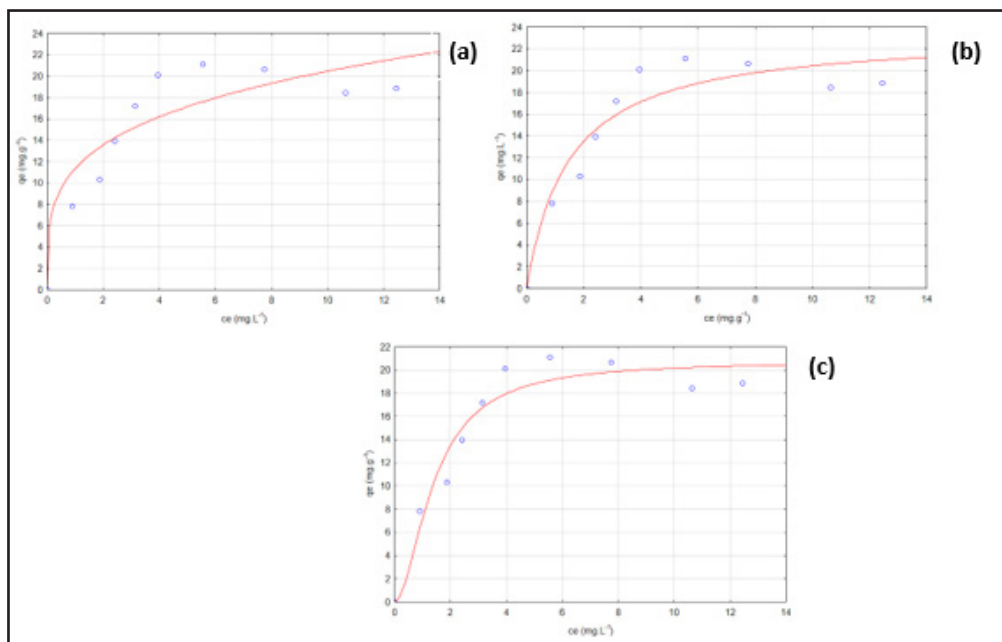
3.2.4 Isotermas de equilíbrio

O estudo isotérmico de adsorção é fundamental, uma vez que desempenha importante papel na determinação da capacidade máxima de adsorção. É a partir desse estudo que se busca um modelo adequado que possa reproduzir, em escala industrial, os resultados experimentais obtidos (Mnasri-Ghnimi; Frini-Srasra, 2019).

O estudo das isotermas de adsorção do glifosato em argila bentonita foi realizado através de experimentos variando a concentração inicial do herbicida. Os dados experimentais de equilíbrio de adsorção, foram ajustados aos modelos de Freundlich, Langmuir e Sips, conforme Figuras 12 e 13, a fim de verificar se as isotermas experimentais obtidas seguem o comportamento de alguns desses modelos, uma vez que fornecem informações úteis sobre a capacidade de acumulação de um adsorvente.

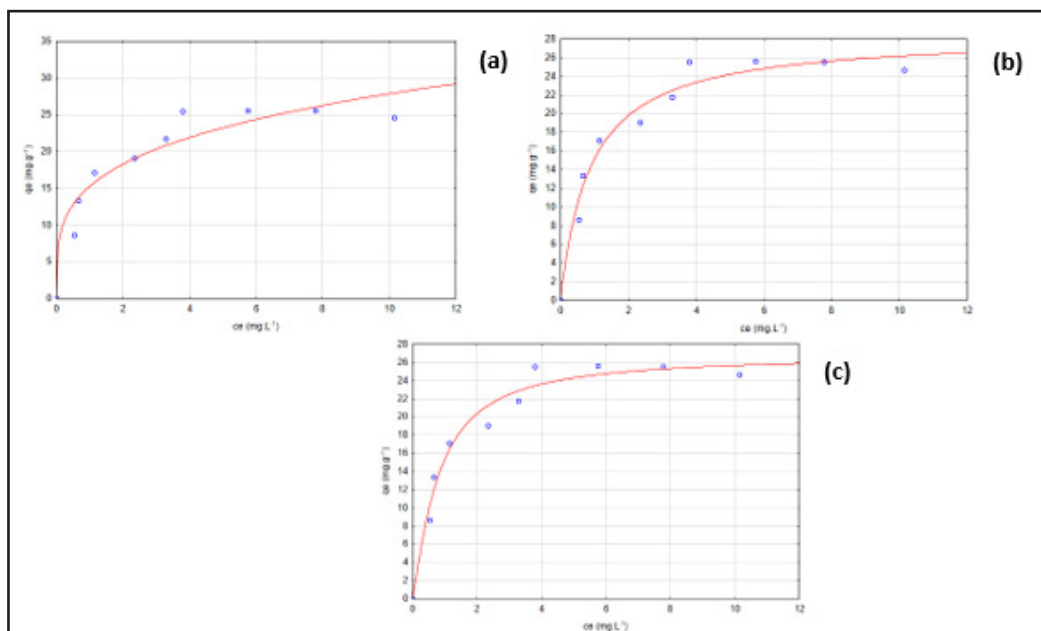
As isotermas de adsorção apresentaram bons ajustes tanto para a argila em sua forma natural quanto para a argila após o processo de calcinação. Observou-se que as isotermas seguem o padrão tipo L, com uma inclinação não linear e côncava em relação à abscissa, o que sugere uma diminuição na disponibilidade dos sítios de adsorção à medida que a concentração da solução aumenta.

Figura 12 – Ajuste das isotermas de (a) Freundlich, (b) Langmuir e (c) Sips aos dados experimentais com o adsorvente *in natura*



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Figura 13 – Ajuste das isotermas de (a) Freundlich, (b) Langmuir e (c) Sips aos dados experimentais com o adsorvente calcinado



Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Na Tabela 5, estão apresentados os resultados da análise de variância e os coeficientes de determinação (R^2) para os modelos ajustados aos dados obtidos com os adsorventes *in natura* e calcinado.

É possível observar que todas as isotermas apresentaram bons ajustes, com coeficientes de determinação superiores a 91% e valores de teste F acima de 10. Esses resultados indicam que os modelos são estatisticamente significativos e preditivos dentro do intervalo de confiança de 95%. Entre os modelos ajustados, os de Langmuir e Sips demonstraram maior representatividade, conforme evidenciado pela análise de variância (ANOVA).

Tabela 5 – ANOVA das isotermas de adsorção, utilizando o adsorvente *in natura* e calcinado para os modelos de Freundlich, Langmuir e Sips

		Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Fcal/Ftab	R^2
Argila natural	Freundlich	Regressão	2570,815	2	1285,408	34,3947	0,9182
		Resíduo	67,050	8	8,381		
		Total	2637,865	10	-		
	Langmuir	Regressão	2601,172	2	1300,586	63,5927	0,9561
		Resíduo	36,693	8	4,587		
		Total	2637,865	10	-		
	Sips	Regressão	2611,956	2	870,6519	52,7527	0,9692
		Resíduo	25,910	8	3,7014		
		Total	2637,865	10	-		
Argila calcinada	Freundlich	Regressão	3907,972	2	1953,986	70,3783	0,9618
		Resíduo	49,812	8	6,227		
		Total	3957,784	10	-		
	Langmuir	Regressão	3938,824	2	1969,412	186,3626	0,9856
		Resíduo	18,960	8	2,370		
		Total	3957,784	10	-		
	Sips	Regressão	3940,385	2	1313,462	118,5106	0,9868
		Resíduo	17,399	8	2,486		
		Total	3957,784	10	-		

Fonte: Acervo particular dos autores (2025)

Observa-se que o modelo de Freundlich foi o que menos representou os dados de equilíbrio. Isso se deve, possivelmente, ao fato de que a equação de Freundlich prevê um aumento contínuo da quantidade adsorvida, referente à ocorrência de adsorção

em múltiplas camadas de adsorvato na superfície do sólido. Como consequência, não há um limite da capacidade de adsorção Freundlich (1906).

A isoterma de Sips faz a combinação das isotermas de Langmuir e de Freundlich. Em baixas concentrações de adsorvato, o modelo se reduz efetivamente a uma isoterma de Freundlich, já em altas concentrações prevê uma capacidade de sorção em monocamada característica da isoterma de Langmuir.

Logo, pode-se afirmar, pelo teste F, que a equação mais adequada para descrever o comportamento da adsorção do glifosato em argila bentonita in natura e calcinada é a isoterma de Langmuir.

De acordo com o estudo realizado por Rissouli *et al* (2017) a adsorção de glifosato utilizando a quitina e a quitosana são melhor correlacionadas com o modelo Langmuir quando comparadas com a equação de Freundlich sob a faixa de concentração estudada, apresentando uma quantidade máxima de adsorção de 14,04 e 35,08 mg.g⁻¹, respectivamente.

Com relação aos resultados dos ensaios de isoterma Cuba *et al.* (2018) verificaram que o modelo de Langmuir melhor de ajustou aos dados experimentais cuja máxima capacidade de adsorção foi de 3,68 mg.g⁻¹. Além disso, obtiveram resultados de cerca de 30% de remoção nos primeiros dois minutos de tempo de contato e após 13 minutos esse valor alcançou aproximadamente 40%.

Embora esses valores estejam abaixo de outros observados na literatura ainda são muito significativos considerando que foi utilizado glifosato puro e quantidade em massa de biocarvão inferiores a outros estudos. T

Zavareh, Farrokhzad e Darvishi (2018) utilizaram zeólita para a remoção eficiente e seletiva de glifosato da água em condições de pH neutro. Os dados de equilíbrio de adsorção foram bem ajustados às formas não lineares das isotermas de Langmuir, Freundlich e Temkin, apresentando uma capacidade máxima de adsorção de 112,7 mg.g⁻¹ com base no modelo de Langmuir.

Jia *et al.* (2019) verificaram em seus estudos que os modelos de Freundlich e Langmuir se ajustaram bem aos dados de isoterma de equilíbrio para o Nano-CuFe₂O₄ modificado, indicando a presença de fisissorção e quimissorção. Além disso, a cinética de adsorção é bem descrita pelo modelo cinético de pseudossegunda ordem, que indica que a adsorção química pode dominar o processo de adsorção. A adsorção do glifosato utilizando Nano-CuFe₂O₄ modificado apresentou uma capacidade máxima de adsorção de 269,4 mg.g⁻¹ em 240 min, sob 600 mg.L⁻¹ de solução de glifosato a 298 K e pH 4, indicando um alto desempenho na remoção de glifosato aquoso.

Por fim, Ueda *et al.* (2016) realizaram o estudo da adsorção de glifosato em MnFe₂O₄ e verificaram que os dados se ajustaram bem a isoterma de Freundlich, sugerindo que a adsorção foi uma adsorção em multicamadas com interações eletrostáticas entre os adsorbatos. Por outro lado, a adsorção de glifosato por MnFe₂O₄ foi bem descrita pelo modelo cinético de pseudossegunda ordem, indicando que o processo de adsorção foi essencialmente dominado pela quimissorção, que ocorreu por meio de uma interação eletrostática, seguida de transferência eletrônica.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa analisou a remoção de glifosato em solução aquosa utilizando a argila bentonita chocolate em sua forma *in natura* e ativada termicamente. Foram realizadas a caracterização do PH_{PCZ} dos materiais, a análise da influência do pH inicial, da massa de adsorvente, da concentração do glifosato e do tempo de contato para os materiais *in natura*, após tratamento térmico e ativada com Na₂CO₃.

Com base nesses resultados foi possível verificar que a massa do adsorvente, o tempo de contato entre o adsorvente e o adsorbato, a concentração do glifosato e a interação entre ele e a massa foram estatisticamente significativas ao intervalo de confiança de 95% para a variável resposta q_t dentro do domínio experimental para o material *in natura*, já com relação a argila tratada termicamente todas as variáveis

independentes foram estatisticamente significativas ao intervalo de confiança de 95% para a variável resposta q_t , exceto a interação entre a concentração e o tempo de contato.

De acordo com a variável resposta %rem, foi possível verificar que para a argila *in natura* apenas a concentração e o tempo de contato foram estatisticamente significativos, já a argila após calcinação as variáveis concentração, massa do adsorvente, tempo de contato e a interação entre a massa e a concentração foram significativas ao intervalo de confiança de 95%.

As condições operacionais, dentre as utilizadas na pesquisa, que forneceram melhores resultados de q_t para a argila *in natura* foram pH igual a 4,00; tempo de contato igual a 90 minutos; massa igual a 0,30g e concentração do glifosato igual a 10mg.L⁻¹, já a argila após tratamento térmico apresentou as mesmas condições exceto o pH que foi igual a 6,00.

Com relação as condições que forneceram as melhores respostas para a %rem de glifosato, os resultados do planejamento experimental indicaram que as maiores massas e tempo de contato e menor concentração foram mais favoráveis ao processo de adsorção.

Verificou-se que o modelo de pseudossegunda ordem conseguiu reproduzir de maneira mais satisfatória o comportamento da curva da quantidade adsorvida pelo tempo, além de apresentar um maior valor para o teste F tanto para os dados experimentais do material *in natura* quanto para o calcinado. De forma similar, os modelos de Langmuir e Sips melhor representaram os dados das isotermas para os materiais analisados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

- AMARANTE JUNIOR, O. P.; SANTOS, T.C.R. Glifosato: propriedades, toxicidade, usos e legislação. **Química Nova**. Araraquara, v. 25, n.4, p. 589-593, julho/2002.
- AMORIM, L. V.; VIANA, J. D.; FARIAS, K. V.; BARBOSA, M. I. R.; FERREIRA, H. C. Estudo comparativo entre variedades de argilas bentoníticas de Boa Vista, Paraíba. **Matéria**, Rio Janeiro, v. 11, n. 1, p. 30-40, 2006.
- ARAUJO, A. L. P.; BERTAGNOLLI, C.; SILVA, G. C.; GIMENES, M. L.; BARROS, M. A. S. D. Zinc adsorption in bentonite clay: influence of pH and initial concentration. **Acta scientiarum**, Maringá, v. 35, n. 2, p. 325-332, junho/2013.
- BESGHAIER, S.; CECILIA, J. A.; CHOUIKHI, N. *et al.* Glyphosate adsorption onto porous clay heterostructure (PCH): kinetic and thermodynamic studies. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 39, p. 903-917, outubro/2022.
- BHASKARA, B.L.; NAGARAJA, P. Direct sensitive spectrophotometric determination of glyphosate by using ninhydrin as a chromogenic reagent in formulations and environmental water samples. *Helvetica Chimica Acta*, v. 89, n. 11, p. 2686- 2693, novembro/2006.
- CHEN, F.; ZHOU, C.; LI, G., *et al.* Thermodynamics and kinetics of glyphosate adsorption on resin D301. **Arabian Journal Chemistry**, v. 9, n. 2, p. 1665-1669, novembro/2016.
- CUBA, R.M.F.; GUIMARÃES, M.S.; TERÁN, F.J.C. Produção de biocarvão a partir de bagaço de cana-deaçúcar para remoção de glifosato (formulação comercial) em meio aquoso. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 1, Gramado-RS. Anais[...] ExpoGramado: Gramado-RS, 2018.
- DUTRA, L. S.; FERREIRA, A. P. Associação entre malformações congênitas e a utilização de agrotóxicos em monoculturas no Paraná, Brasil. **Saúde debate**, v. 41, n. spe2, p. 241-253, junho/2017.
- FREITAS, F. B. A. de; CÂMARA, M. Y. de Freitas; FREIRE, M. D. F. Determinação do PCZ de adsorventes naturais utilizados na remoção de contaminantes em soluções aquosas. In: 5º Encontro Regional de Química & 4º Encontro Nacional de Química. **Blucher Chemistry Proceedings**, v. 3, n. 1, 2015.
- FREUNDLICH, H. M. **Over the adsorption in solution**. *The Journal of Physical Chemistry*, v. 57, p. 385-470, 1906.
- FRIEDRICH, K.; SILVEIRA, G. R.; AMAZONAS, J. C.; GURGEL, A. M.; ALMEIDA, V. E. S.; SARPA, M. Situação regulatória internacional de agrotóxicos com uso autorizado no Brasil: potencial de danos sobre a saúde e impactos ambientais. **Cadernos de Saúde Pública**. v. 37, n. 4, maio/2021.
- FROTA, M. T. B. A.; SIQUEIRA, C. E. Agrotóxicos: os venenos ocultos na nossa mesa. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 37, n. 2, fevereiro/2021.

HERATH, G. A.; POH, L. S.; NG, W. J. Statistical optimization of glyphosate adsorption by biochar and activated carbon with response surface methodology. **Chemosphere**, v.227, p. 533-540, julho/2019.

HERATH, I.; KUMARATHILAKA, P.; AL-WABEL, M. I., *et al.* Mechanistic modeling of glyphosate interaction with rice husk derived engineered biochar. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 225, n.1, p. 280-288, maio/2016.

JIA, T.-T.; YANG, G.; MO, S.-J.; WANG, Z.-Y.; LI, B.-J.; MA, W., *et al.* Atomically precise gold-levonorgestrel nanocluster as a radiosensitizer for enhanced cancer therapy. **ACS Nano**, v. 13, n. 7, p. 8320–8328, junho/2019

JOBIM, P. F. C.; NUNES, L. N.; GIUGLIANI, R.; CRUZ, I. B. M. Existe uma associação entre mortalidade por câncer e uso de agrotóxicos? Uma contribuição ao debate. **Ciência Saúde Coletiva**, v. 15, n. 1, p. 277-288, janeiro/2010.

KUMAR, P. S.; SENTHAMARAI, C.; DURGADEVI, A. Adsorption kinetics, mechanism, isotherm, and thermodynamic analysis of copper ions onto the surface modified agricultural waste. **Environmental Progress Sustainable Energy**, v. 33, p. 28–37, abril/2014.

LOPES, C. V. A.; ALBUQUERQUE, G. S. C. de. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde debate**, v. 42, n. 117, p. 518-534, abril/2018.

MAHMOUD, A. S. Effect of nano bentonite on direct yellow 50 dye removal; Adsorption isotherm, kinetic analysis, and thermodynamic behavior. **Progress in Reaction Kinetics and Mechanism**, v. 47, abril/2022.

MARCELINO, N. V. A.; CUBA, R. M. F.; TERAN, F. J. C. Reaproveitamento de sabugo de milho para potencial remoção de formulação comercial de glifosato em fase aquosa pela técnica de adsorção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 4, p. 669–681, julho/2021.

MARIN, P.; BORBA, C.E.; MÓDENES, A.N., ESPINOZA-QUIÑONES, F.R., OLIVEIRA, S.P.D., KROUMOV, A.D. Determination of the mass transfer limiting step of dye adsorption onto commercial adsorbent by using mathematical models. **Environmental Technology**, v.35, n.18, p. 2356-2364, setembro/2014.

MAYAKADUWA, S. S.; KUMARATHILAKA, P.; HERATH, I.; AHMAD, M.; AL-WABEL, M.; OK, Y. S.; VITHANAGE, M. Equilibrium and kinetic mechanisms of woody biochar on aqueous glyphosate removal. **Chemosphere**, v. 144, p. 2516-2521, fevereiro/2016.

MELO, R. L. de; NAVAL, L. P. **Low-cost sorbent for removing glyphosate from aqueous solutions for non-potable reuse**. Revista Ambiente & Água, v. 18, 2023.

MNASRI-GHNIMI, S.; FRINI-SRASRA, N. Removal of heavy metals from aqueous solutions by adsorption using single and mixed pillared clays. **Elsevier – Applied Clay Science**, v. 179, outubro/2019.

MORAIS, I. C. G.; SILVA, I. A.; BURITI, B. M. A. B.; FERNANDES, J. V.; SILVA, D. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. S. Influence of the additivation process on cation exchange capacity and viscosity of bentonitic clay dispersions. **Cerâmica**, v. 66, n. 377, p. 81-87, jan-mar/2020.

NAGHIZADEH, A.; GHOLAMI, K.; MIRI, M. Bentonite and montmorillonite nanoparticles effectiveness in removal of fluoride from water solutions. **Journal of Water and Health**, v. 15, n. 4, maio/2017.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Unicamp, 2001.

NWOSU, F.O.; AJALA, O.J.; OWOYEMI, R.M. *et al.* Preparation and characterization of adsorbents derived from bentonite and kaolin clays. **Applied Water Science**, v. 8, n. 195, outubro/2018.

OUAKOUAK, A.; RIHANI, K.; YOUCEF, L.; HAMDY, N.; GUERGZI, S. Adsorption characteristics of Cu (II) onto CaCl₂ pretreated algerian bentonite. **Materials Research Express**, v. 7, n. 2, fevereiro/2020.

RISSOULI, L.; BENICHA, M.; CHAFIK, T., *et al.*, Decontamination of water polluted with pesticide using biopolymers: adsorption of glyphosate by chitin and chitosan, **Journal of Materials and Environmental Sciences**, v. 8, n. 12, p. 4544-4549, Agosto/ 2017.

SEN, K.; DATTA, J. K.; MONDAL, N. K. Glyphosate adsorption by Eucalyptus camaldulensis bark-mediated char and optimization through response surface modeling. **Applied Water Science**, v. 9, n. 162, setembro/2019.

TZASKOS, D. F.; MARCOVICZ, C.; DIAS, N. M. P.; ROSSO, N. D. Development of sampling for quantification of glyphosate in natural waters. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n. 4, p. 399–405, agosto/2012.

UEDA, N., BERGAMASCO, R., HAMOUDI, S. Magnetic MnFe₂O₄-graphene hybrid composite for efficient removal of glyphosate from water. **Chemical Engineering Journal**, v. 295, p. 391–402, julho/2016.

YAMAGUCHI, N. U.; RUBIO, A. J.; BERGAMASCO, R. Activated carbon loaded with manganese and iron for glyphosate adsorption: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies. **Revista Ambiente e Água**, v. 14, n. 6, novembro/2019.

ZAVAREH, S.; FARROKHZAD, Z.; DARVISHI, F. Modification of zeolite 4A for use as an adsorbent for glyphosate and as an antibacterial agent for water. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 155, n. 15, p. 1–8, julho/2018.

ZEVIANI, W. M.; MAYER, F. P. **Controle de Processos Industriais**. Apostila do Curso de Estatística, Universidade Federal do Paraná, versão atualizada, 2019.

Contribuição de autoria

1 – Cinthia Sany França Xavier

Doutorado em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba

<https://orcid.org/0000-0002-4840-2653> • cinthiasany@gmail.com

Contribuição: Conceituação; Metodologia; Software; Validação; Curadoria de dados; Análise Formal; Investigação; Recursos; Escrita – Primeira Redação; Visualização de dados (infográficos, fluxogramas, tabelas, gráficos); Administração do Projeto

2 – Fernando Fernandes Vieira

Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba

<https://orcid.org/0000-0002-1823-6236> • fernanvieira@gmail.com

Contribuição: Conceituação; Metodologia; Software; Validação; Curadoria de dados; Análise Formal; Investigação; Recursos; Escrita – Revisão e Edição; Visualização de dados (infográficos, fluxogramas, tabelas, gráficos); Supervisão; Administração do Projeto; Obtenção de Financiamento

Como citar este artigo

XAVIER, C. S. F.; VIEIRA, F. F. Adsorção do herbicida glifosato por argila bentonita utilizando um sistema em batelada. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 48, e91297, 2026. DOI: 10.5902/2179460X91297. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X91297>