

USO DO GLIFOSATO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS EM PROPRIEDADES RURAIS DO POVOADO IGUAÍBA, BRASIL

USE OF GLYPHOSATE AND ENVIRONMENTAL IMPACTS ON RURAL PROPERTIES IN THE VILLAGE OF IGUAÍBA, BRAZIL

EL USO DEL GLIFOSATO Y SUS IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES EN LAS EXPLOTACIONES AGRÍCOLAS DE LA LOCALIDAD DE IGUAÍBA, BRASIL

Paulo Henrique Azevedo Lima¹

Verônica Duarte da Silva²

Augusto Hipólito Chagas Freato³

Fernando Pinheiro Costa Junior⁴

Agesilau Coelho de Carvalho⁵

Luís Henrique Silva Oliveira⁶

Aldineyde Barros Fecury⁷

Maria Raimunda Chagas Silva⁸

RESUMO: Este artigo buscou avaliar os impactos do uso de agrotóxicos no solo agrícola do povoado Iguaíba, em Paço do Lumiar, Maranhão, com ênfase no comportamento e na adsorção do glifosato. O trabalho identifica os produtos utilizados pelos agricultores e analisa as características físico-químicas do solo, considerando aspectos como granulometria, matéria orgânica, carbono orgânico, pH, umidade e nutrientes, além da capacidade de retenção do herbicida. Os resultados demonstraram predominância de solos argilosos, com elevados teores de matéria orgânica e acidez moderada, enquanto os nutrientes apresentaram variações associadas ao manejo agrícola e às condições sazonais. Os baixos coeficientes de adsorção do glifosato indicaram reduzida retenção na fase sólida e maior disponibilidade na solução do solo, sugerindo potencial de lixiviação e contaminação ambiental. Conclui-se que o uso recorrente do glifosato pode favorecer sua mobilidade no solo, enquanto as características físico-químicas influenciam sua disponibilidade e comportamento no ambiente.

Palavras-chave: Adsorção. Propriedades físico-químicas. Herbicidas.

¹Mestre em Meio Ambiente, Universidade CEUMA.

²Doutoranda em Meio Ambiente, Universidade CEUMA.

³Discente de Medicina, Universidade CEUMA.

⁴Discente de Medicina, Universidade CEUMA.

⁵Discente de Medicina, Universidade CEUMA.

⁶Graduação em Administração, UNIEURO.

⁷Mestra em Gestão de Programas e Serviços de Saúde.

⁸Orientadora. Professora da Universidade Ceuma. Doutora e Mestre em Química Analítica (USP).

ABSTRACT: This article aimed to evaluate the impacts of pesticide use on agricultural soil in the village of Iguaíba, Paço do Lumiar, Maranhão, focusing on the behavior and adsorption of glyphosate. The work identifies the products used by farmers and analyzes the soil's physicochemical characteristics-considering factors such as particle size, organic matter, organic carbon, pH, moisture, and nutrients as well as the soil's herbicide retention capacity. The results showed a predominance of clayey soils with high organic matter content and moderate acidity, while nutrient levels varied according to agricultural management and seasonal conditions. Low glyphosate adsorption coefficients indicated limited retention in the solid phase and greater availability in the soil solution, suggesting a potential for leaching and environmental contamination. The study concludes that the recurring use of glyphosate may facilitate its mobility within the soil, while physicochemical characteristics influence its availability and behavior in the environment.

Keywords: Adsorption. Physicochemical properties. Herbicides.

RESUMEN: Este artículo tuvo como objetivo evaluar los impactos del uso de plaguicidas en el suelo agrícola de la aldea de Iguaíba, en Paço do Lumiar, Maranhão, con énfasis en el comportamiento y la adsorción del glifosato. El estudio identifica los productos utilizados por los agricultores y analiza las características físicoquímicas del suelo, considerando aspectos como la distribución del tamaño de partícula, la materia orgánica, el carbono orgánico, el pH, la humedad y los nutrientes, así como la capacidad de retención del herbicida. Los resultados mostraron un predominio de suelos arcillosos, con altos niveles de materia orgánica y acidez moderada, mientras que los nutrientes presentaron variaciones asociadas con el manejo agrícola y las condiciones estacionales. Los bajos coeficientes de adsorción del glifosato indicaron una menor retención en la fase sólida y una mayor disponibilidad en la solución del suelo, lo que sugiere un potencial de lixiviación y contaminación ambiental. Se concluye que el uso recurrente de glifosato puede favorecer su movilidad en el suelo, mientras que las características físicoquímicas influyen en su disponibilidad y comportamiento en el ambiente.

Palabras clave: Adsorción. Propiedades físicoquímicas. Herbicidas.

INTRODUÇÃO

O Brasil, um dos maiores produtores de alimentos do mundo, também lidera o consumo de agrotóxicos, inicialmente impulsionado pelo agronegócio de exportação e, atualmente, também por pequenos produtores que visam aumentar a produtividade, gerando impactos ambientais significativos. O uso de agrotóxicos remonta à década de 1950, com a Revolução Verde nos EUA, sendo adotado no Brasil nos anos 1960 com o Programa Nacional de Defensivos Agrícolas. A Lei nº 7.802/1989 define agrotóxicos como substâncias destinadas a proteger culturas e ambientes contra organismos nocivos (Vieira et al., 2025).

Os tipos de agrotóxicos se apresentam de acordo com a natureza da praga que será combatida e ao grupo químico à qual pertence, bem como aos danos relacionados ao meio ambiente e à saúde humana, sendo assim classificados como inseticidas (combatem insetos),

fungicidas (combatem fungos), herbicidas (combatem plantas invasoras ou indesejadas), desfoliantes (combatem folhas indesejadas), fumigantes (combatem bactérias no solo), nematicidas (eliminam nematóides), acaricidas (combatem ácaros), rodenticidas (combatem ratos e roedores), moluscicidas (combatem moluscos), formicidas (combatem formigas), reguladores e inibidores de crescimento. Esses produtos são classificados segundo a praga-alvo e o grupo químico, com destaque para herbicidas (48%), fungicidas (22%) e inseticidas (2%). O IBAMA os categoriza em quatro classes de risco, de altamente perigosos (classe I) a pouco perigosos - classe IV (NARA FSP/USP, 2020; Gomes et al., 2020).

No Maranhão, o uso de agrotóxicos acompanha a tendência nacional, especialmente nas regiões metropolitanas, como Paço do Lumiar, onde a produção de hortaliças e frutíferas em pequena escala tem crescido. Dados do IBGE (2019a; 2019b) mostram que o município possui 919 estabelecimentos agropecuários, sendo que 217 utilizam agrotóxicos, em sua maioria sem assistência técnica. O uso inadequado desses produtos contribui para a degradação ambiental, como a contaminação do solo e da água, assoreamento de rios e perda de biodiversidade (Barroso et al., 2025).

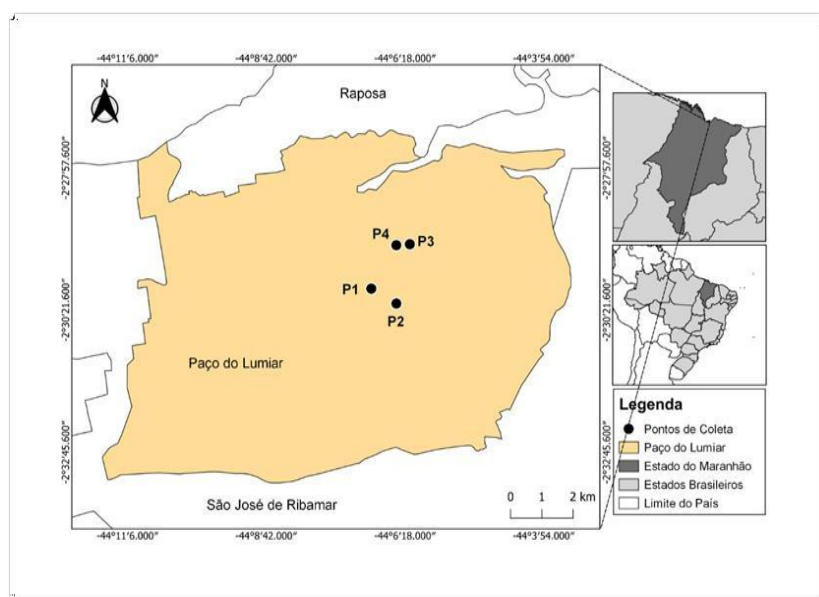
Esse trabalho teve como objetivo realizar um estudo de identificar quais os tipos de agrotóxicos utilizados pelos produtores rurais do povoado do Iguaíba, município de Paço do Lumiar, Maranhão e os impactos causados no meio ambiente, investigar possíveis contaminações físico-químicas por agrotóxicos no solo das propriedades rurais estudadas fazendo a análise estatística da composição físico-química dos solos impactados.

MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

O município de Paço do Lumiar tem grande importância na produção rural da região metropolitana de São Luís - MA, contemplando uma população estimada em 145.643 habitantes (IBGE, 2024). Nesse município, é grande o número de área de produção agrícola (polos). São 17 polos existentes (mais 02 não informados) e 192 produtores cadastrados na Semapa. Entre esses, está o polo de Iguaíba, área onde foi realizada a pesquisa, que desponta como principal área produtora, destacando-se a prática da horticultura. O ponto de coletas das amostras de solo se apresenta no mapa pelas coordenadas 02° 30' 00"S e 44° 06' 53"W; 02° 49' 15"S e 44° 06' 12"W; 02° 29' 15"S e 44° 06' 13"W e 02° 29' 16"S e 44° 06' 27"W, como indicados na Figura 1.

Figura 1 - Mapa de localização da área das propriedades de coleta de solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

COLETA DAS AMOSTRAS DO SOLO

Inicialmente, foi identificada a área do estudo com produção significativa de cada uma das leiras do cultivo de quiabo, feijão, vinagreira, acerola, mamão e graviola. As coletas das amostras foram demarcadas pelas coordenadas geográficas do ponto de amostragem do solo, utilizando o GPS Garmin marca Striker. As amostras de solo de 04 (quatro) propriedades nomeadas (P1, P2, P3 e P4), onde os pontos (P1) tem coordenadas 02° 30' 00"S e 44° 06' 53"W; (P2), coordenadas 02° 49' 15"S e 44° 06' 12"W; (P3), coordenadas 02° 29' 15"S e 44° 06' 13"W; e (P4), coordenadas 02° 29' 16"S e 44° 06' 27"W, sendo as coordenadas obtidas nos meses de abril e agosto de 2021. Foram coletadas 03 (três) amostras de solo de cada área, sendo coletadas, sistematicamente, com um trado de inox, introduzido até 20 cm de profundidade e com distância de 20 (vinte) metros entre si. A partir das amostras coletadas, o material foi homogeneizado dentro de um recipiente do tipo balde higienizado, em porção de aproximadamente 500g e cada amostra foi colocada em um saco plástico, separadamente e armazenada em um isopor para serem transportadas para o Laboratório de Ciências Ambientais da Universidade CEUMA (LACAM) para fins de suas análises físico-químicas.

DETERMINAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO

A análise granulométrica tem como objetivo determinar a distribuição do tamanho das partículas minerais do solo, que podem incluir grãos individuais, fragmentos de rochas não alteradas ou parcialmente alteradas, concreções, nódulos e materiais cimentados, definidos pelo Vocabulário de Ciência do Solo como materiais que só se desagregam com alta energia. O processo consiste em romper os agregados do solo e separar as partículas por meio de energia mecânica e química, formando uma suspensão estabilizada para posterior quantificação das frações. A textura ou granulometria representa as proporções de argila, silte e areia. A fração argila, de natureza coloidal e com grande superfície específica, apresenta alta capacidade de retenção de cátions e fósforo, sendo responsável pela capacidade de troca de cátions (CTC) devido às suas cargas elétricas negativas. O método de pipetagem foi utilizado para determinar a classificação textural das amostras. Para isso, 50 gramas de solo foram secas por 24 horas em estufa a 70 °C, adicionando-se em seguida 0,67 gramas de oxalato de sódio ($C_2Na_2O_4$) como defloculante. Após 24 horas, as amostras foram peneiradas em malha de 0,062 mm e completadas com água até 1000 ml em proveta. A solução repousou por mais 24 horas e, então, foram pipetados 20 ml de cada amostra em quatro tempos diferentes: 3 minutos e 52 segundos, 14 minutos, 1 hora e 4 horas (EMBRAPA, 2017; Silva et al., 2025).

5

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA E CARBONO ORGÂNICO

A determinação do teor de matéria nas amostras de solo foi realizada através do método da calcinação com utilização da mufla. Inicialmente foi anotado o peso dos cadinhos de porcelana sem material e depois foram adicionadas 4 gramas de amostra de solo em cada um deles, após esse procedimento os cadinhos foram levados para a mufla a 600° por duas horas, após foram pesados novamente e os novos pesos foram anotados para a realização dos cálculos de matéria orgânica (Silva et al., 2025).

Para a determinação do carbono foi feita a secagem prévia das amostras em estufa a 105°C, por um período de 24 horas. Após esse período, as amostras foram peneiradas em uma peneira de 2 mm para em seguida serem pesadas 4g de cada amostra, sendo submetidas a calcinação por 5 horas, a uma temperatura de 300°C. Após a calcinação foram pesadas as amostras. Sendo que o teor de carbono orgânico foi determinado em razão da perda da massa do resíduo incinerado (Silva et al., 2025).

DETERMINAÇÃO DO PH

O pH do solo é uma determinação da concentração de íons H^+ na solução do solo, que tem influência na disponibilidade de nutrientes. Medição do potencial hidrogeniônico por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo: líquido (água, KCl ou) $CaCl_2$, na proporção 1:2,5. Para o procedimento de determinação do pH do solo em cloreto de cálcio ($CaCl_2$), foram pesados 10 gramas de cada amostra de solo que foram posteriormente adicionadas a 50ml de $CaCl_2$. Foi anotado os valores de pH no tempo inicial, após isso as amostras permaneceram em repouso por mais 1 hora e depois desse intervalo foram feitas novas medições potencio métricas. Foram feitas para as amostras, análises de pH em intervalos de 15, 30, 45 e 1 hora, das quais foi feita uma média para comparação (EMBRAPA, 2017).

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Para determinação do teor de umidade do solo coletado, foi pesado 20g do solo úmido e colocado para secar em estufa de ar forçado ajustada para $105^{\circ}C$. Após 3 dias foi realizada a pesagem do solo seco. Foi pesado 20g de amostra de solo em Erlenmeyer de 250 Ml previamente tarado e adicionado 60 mL de solução de KCl 1 mol L^{-1} . Agitado por 30 minutos em agitador horizontal circular (200 rpm) e depois deixado em repouso por 15 minutos e, em seguida, filtrado. Em geral, os filtros rápidos são suficientes. Solos argilosos, ricos em óxidos de ferro, podem requerer filtragem lenta para obter um extrato suficientemente claro. A utilização de centrifugação em vez da filtragem é um recurso para se conseguir extratos incolores em um tempo curto. Feita a Pipetagem em 25 mL dos extratos, foram transferidos para frascos limpos e em seguida feita à determinação das formas minerais de N, no mesmo dia. Se necessário, os frascos contendo os extratos podem ser armazenados em geladeira para análise no dia seguinte. Reservar parte da solução de KCl 1 mol L^{-1} para preparação do branco (EMBRAPA, 2017).

DETERMINAÇÃO DOS NUTRIENTES DO SOLO

Para a determinação do Nitrito (NO_2^-) foi pesado 1g do solo com 10mL de água deionizada e adicionou 5 mL do reagente A, sendo tampado o frasco e agitado por 5 segundos. Em seguida foi adicionado uma espátula com reagente C e homogeneizado por 1 min. Após todos estes procedimentos foi deixado em repouso por 9 min e feita a leitura no espectrofotômetro marca Hanna instrumets HI83200 Multiparameter Photometer. Os

mesmos procedimentos para determinação do Nitrato (NO_3^-), adicionados somente os reagentes B. Para a determinação de Cálcio e Magnésio foram adicionadas a 5 gotas da 163 solução contendo Hidróxido de Sódio 0, 1N e Ácido Etilenodiamino Tetra-acético 164 (EDTA), em 5 mL de cada amostra, em seguida adicionou-se 0,5 grama do indicador 165 de Morexida, na amostra de Cálcio e 1g do Negro de Ericromo na amostra de 166 Magnésio, ambas as soluções foram homogeneizadas e mantidas em repouso por 5,167 minutos. O procedimento para determinação do Fósforo Total (P), foi adicionado na amostra de solo, 10 ml do reagente A e ácido de solução sulfúrica, deixando em repouso em local escuro até o aparecimento da cor azul e assim feita a leitura no espectrofotômetro marca Hanna instrumets HI83200 Multiparameter Photometer (Silva et al., 2025).

DETERMINAÇÃO DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO DO GLIFOSATO NO SOLO

As soluções padrões do herbicida glifosato foram analisadas diretamente sem nenhum pré-tratamento no espectrofotômetro para verificação dos parâmetros analíticos. A faixa de concentração de trabalho utilizada neste estudo, foi de 0,5 a 4,0 g.mL⁻¹. Foi feita a curva padrão do glifosato nas concentrações 0,5 a 4,0 g.mL⁻¹, feita a leitura no espectrofotometria UV-vis no comprimento de onda, $\lambda = 293$ nm. Para análise no espectrofotômetro, foram utilizados 1 mL da amostra em uma cubeta de quartzo sinalizada, em caminho óptico de 10 nm. A cada troca da solução a ser analisada, foram realizadas lavagens da cubeta com água ultrapura. Para avaliar a sorção do glifosato no solo, foram preparadas soluções de trabalho a partir da solução-estoque nas concentrações de 0,5; 1,15; 2,0; 2,5, 3,0 e 4,0 g.mL⁻¹ do herbicida glifosato em CaCl_2 0,01 molL⁻¹ com pH de 5,63. Adicionaram-se 20,00 mL dessas soluções em tubos de polipropileno contendo 2,0 g de solo. Em seguida, esses tubos foram colocados sob agitação à temperatura de $27 \pm 2^\circ\text{C}$ pelo tempo de equilíbrio. Após agitação, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 5 minutos. O sobrenadante foi retirado e filtrado em filtro Milipore de 0,45 μm , para posterior análise espectrofotometria UV-vis, no comprimento de onda $\lambda = 293$ nm. O procedimento de adsorção foi repetido por 3 vezes consecutivas (24 h), sendo todos os experimentos conduzido. Calculou-se, a quantidade de herbicida glifosato sorvido ao solo (C_s) em mgL⁻¹, por diferença entre a quantidade de solução-padrão inicialmente adicionada ao solo (C_p) em $\mu\text{g. mL}^{-1}$ e a quantidade encontrada na solução de equilíbrio (C_e) em mg L⁻¹. De posse dos valores de C_e e de C_s , fez-se uso da equação de Freundlich ($C_s = K_f C_e^{1/n}$) para obtenção dos coeficientes de adsorção, em que K_f e $1/n$ são

constantes empíricas que representam a capacidade e intensidade desorção, respectivamente. Os isotermas de Freundlich são utilizadas nesse tipo de ensaio para interpretação do processo sortivo. A quantificação do glifosato foi realizada pela técnica de espectrofotometria UV-vis no Laboratório de Ciências do Ambiente (LACAM) da Universidade Ceuma. O equipamento utilizado foi espectrofotometria da marca SPECTROQUANT PROVE 600 (1).

ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise foi realizada usando o software Origin Pro 8.0 e Minitab 17.0.1. Técnicas de análise multivariada também foram usadas como uma ferramenta adicional, especificamente Análise de Componentes Principais (ACP). Foram incluídos em uma análise estatística de Cluster e na Análise dos Componentes Principais (ACP) a fim de verificar a associação entre estas variáveis das amostras dos solos, assim como as influências das distintas propriedades e períodos pesquisados. As variáveis foram referentes às caracterizações físico-químicas das amostras de solo (areia, silte argila, matéria e carbono orgânica, umidade, pH, nitrito, nitrato, fósforo total, magnésio e cálcio) (Silva et al., 2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS

Os resultados da granulometria, cujas variações foram encontradas nos quatro pontos de coleta, com determinação da média e desvio padrão da proporção de partículas de dimensões distintas componentes do solo areia, silte, argila, matéria orgânica, umidade e carbono orgânico, cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), pH, nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e fósforo total (PT) influencia na drenabilidade, na permeabilidade e na aeração de um solo, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Avaliação dos parâmetros físico-químicos do solo. Valores em média $\pm$ desvio padrão ($n = 6$). Médias seguidas pelas mesmas letras na linha (a e b), não diferem estatisticamente entre si, pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Matéria Orgânica (M.O), Carbono Orgânico (C.O).

Parâmetros	Julho	Agosto
pH	$5,63 \pm 0,27^a$	$5,56 \pm 0,28^a$
Nitrato (mg L^{-1})	$8,00 \pm 2,35^a$	$2,81 \pm 0,42^b$
Nitrito (mg L^{-1})	$0,44 \pm 0,41^a$	$0,04 \pm 0,01^b$
Fósforo (mg L^{-1})	$4,49 \pm 2,61^a$	$0,86 \pm 0,61^b$
Magnésio (mg L^{-1})	$10,67 \pm 4,67^a$	$4,67 \pm 0,57^b$

Cálcio (mg L ⁻¹)	14,94±6,04 ^a	2,48±0,86 ^b
Areia (%)	37,64±4,06 ^a	34,32±2,17 ^b
Silte (%)	33,05±7,38 ^a	31,20±2,78 ^a
Argila (%)	36,13±4,47 ^a	34,12±0,98 ^a
M.O (%)	10,88±1,64 ^a	10,21±2,90 ^a
Umidade (%)	50,26±13,19 ^a	9,00±1,04 ^b
C.O (%)	8,83±1,74 ^a	36,03±2,21 ^b

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise granulométrica das amostras de solo coletadas em abril e agosto revelou variações nas frações areia, silte e argila, com predominância da fração argilosa e classificação do solo como textura média a fina, siltosa a argilosa, segundo o SiBCS (EMBRAPA, 2017). Os teores de matéria orgânica (M.O) variaram entre 10,21% e 10,88%, caracterizando solos orgânicos (Castro et al., 2020), possivelmente devido ao uso de adubos orgânicos nas leiras. A matéria orgânica elevada contribui para a disponibilidade de micronutrientes e a atividade da fauna edáfica e, segundo Viana *et al.* (2022), pode estar associada à atividade biológica em ambientes saturados por água. A combinação entre argila predominante e altos teores de M.O sugere adição de esterco, resíduos vegetais e possível presença de glifosato. A umidade do solo variou de forma significativa entre abril (50,26%) e agosto (9,00%), influenciada por fatores climáticos, apresentando comportamento semelhante ao descrito por Silva et al. (2020), que identificaram 6,75% de umidade em agosto. Apesar das oscilações, os coeficientes de variação indicaram umidade considerada mediana para solos agrícolas.

Os valores de carbono orgânico (C.O) oscilaram entre 8,83% (abril) e 36,03% (agosto), revelando maior estabilidade da matéria orgânica durante o período seco. Duarte *et al.*, (2021) também encontraram altos valores de C.O (10,63% a 16,62%) na região, associados à formação de complexos organominerais em solos com sedimentos areno-siltosos e argilosos, possivelmente impulsionados pelo uso de cama de frango e resíduos vegetais. O menor teor em abril pode ser explicado por menor decomposição na camada superficial argilosa, dificultando a formação de complexos organominerais.

Os valores de pH do solo, entre 5,63 (abril) e 5,56 (agosto), indicam acidez moderada, o que pode favorecer a adsorção do glifosato, reduzindo sua biodisponibilidade para os microrganismos heterotróficos. O ideal para solos agrícolas é um pH entre 6,0 e 7,0. Duarte *et al.*, (2021) identificaram pH ainda mais ácido na mesma região (3,76 a 4,33), atribuindo essa

acidez à natureza arenosa e pobre em nutrientes dos solos locais. Assim, mesmo com variações, os valores encontrados neste estudo estão dentro dos limites aceitáveis (EMBRAPA, 2017).

A análise dos teores de nitrito e nitrato revelou, em abril, médias de 8,00 mg/L e 0,44 mg/L, respectivamente, e, em agosto, 2,81 mg/L e 0,04 mg/L. Duarte *et al.*, (2021) registraram valores médios de 0,60 mg/L para nitrito e 2,45 mg/L para nitrato, associando aumentos à aplicação de cama de frango e ao uso de fertilizantes. Assim, os altos valores de nitrato encontrados podem ser explicados pelo uso de adubos orgânicos e glifosato.

Os teores de fósforo total variaram de 4,49 mg/L (abril) a 0,86 mg/L (agosto), valores baixos, porém dentro dos limites da EMBRAPA (2017). Castro *et al.*, (2020) reportaram teores entre 0,7 mg/L e 6,5 mg/L, dependendo da estação. Silveira *et al.* (2023) demonstram que concentrações elevadas de glifosato no solo podem reduzir a disponibilidade de fósforo, uma vez que o herbicida compete por sítios de sorção nos colóides do solo. Essa interação ocorre porque tanto o glifosato quanto o fósforo apresentam alta afinidade por superfícies coloidais, o que favorece sua adsorção e limita a forma disponível desses nutrientes na solução do solo.

Os teores de cálcio variaram de 14,94 mg/L (abril) a 2,48 mg/L (agosto), o que sugere que o glifosato pode formar complexos ou ser fortemente sorvido por colóides e minerais do solo, reduzindo a concentração de Ca^{2+} disponível. Estudos recentes mostram que a matéria orgânica, os óxidos minerais e a fração coloidal do solo influenciam significativamente a sorção do glifosato e podem afetar a disponibilidade de cátions como o cálcio (Kovács *et al.*, 2024).

O magnésio variou de 10,67 mg L⁻¹ (abril) a 4,67 mg L⁻¹ (agosto). Estudos recentes indicam que a aplicação de glifosato pode alterar a disponibilidade de cátions solúveis no solo, mediante sorção ou complexação com os colóides do solo, como demonstrado para manganês (Taffarel *et al.*, 2021). Dessa forma, a diminuição observada de magnésio na solução pode refletir a interferência do herbicida sobre os sítios de troca iônica do solo.

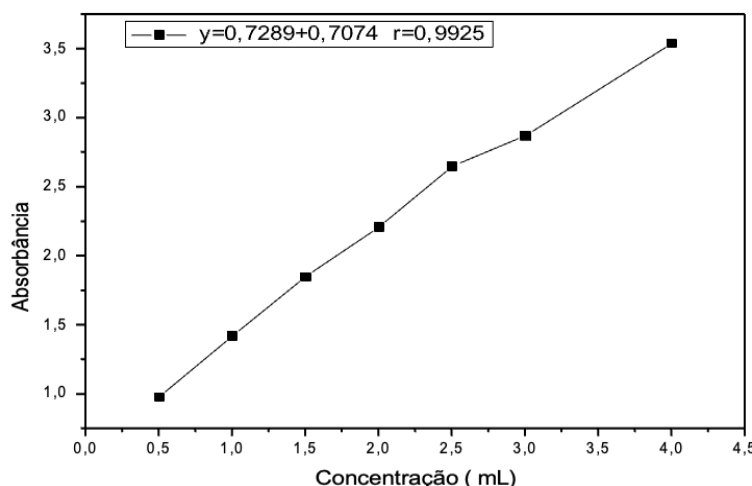
DETERMINAÇÃO DA ADSORÇÃO DO GLIFOSATO NO SOLO

CURVA PADRÃO DA ADSORÇÃO

A curva padrão obtida pela técnica de espectrofotometria UV-vis mostrou a absorvância na faixa de concentração de 0,5-4,0 g/mL do herbicida glifosato em soluções de CaCl_2 0,01 mol. L⁻¹ e está representada na respectivamente na Figura 5. Após a obtenção da curva analítica, conhecendo a equação da reta com $a = 0,7289$, $b = 0,7074$ e $R^2 = 0,9924$, foram realizados os

cálculos para obtenção da sorção dos isothermas.

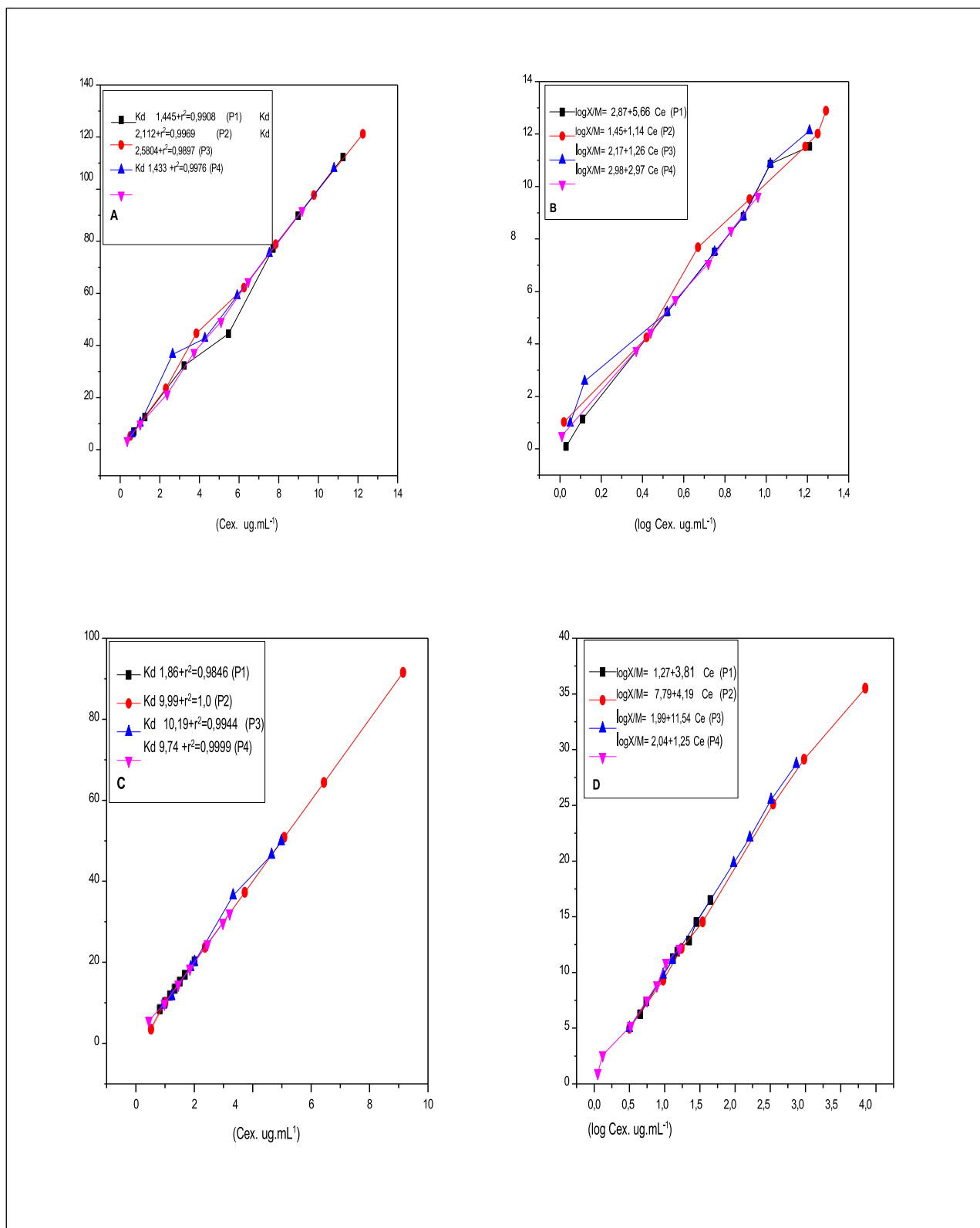
Figura 2 - Curva padrão linear do herbicida glifosato nas concentrações 0,5 a 4,0 g/mL.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Curva de adsorção do herbicida glifosato foi obtida utilizando quatro amostras de cada propriedade agrícola (P₁, P₂, P₃ e P₄). Pode-se observar que as concentrações, em solução e adsorvida no solo foram utilizadas para se construir a isoterma de adsorção do glifosato nos quatro pontos de coleta. A figura 5 mostra a curva analítica do glifosato, em solução CaCl₂, 0,01molL⁻¹ com faixa de concentração de 0,5 a 4,0 g/mL, para os quatro pontos de amostras de solo agrícola. Os resultados do isoterma de Langmuir (A) e (C) e Freundlich (B) e (D) estão apresentados na Figura 6 e nas tabelas 2 e 3 para os meses de abril e agosto de 2021. Neste trabalho os isothermas de Langmuir e Freundlich foram utilizadas por se tratar de modelos aceitos para estudos de adsorção com moléculas de pesticidas em solos (Lita *et al.*, 2023).

Figura 3 - Isoterma de Langmuir (A) e (C) e Isoterma Freundlich (B) e (D).



Amostras	Kd $\mu\text{g mL}^{-1}$	Koc %	Kmo %	Kf $\mu\text{g mL}^{-1}$	1/N	R ²
P ₁	0,522	143,66	83,33	2,870	5,665	0,9997
P ₂	2,112	210,20	121,90	1,456	1,145	0,9921
P ₃	2,580	153,28	89,28	2,171	1,264	0,9888
P ₄	1,433	143,66	83,33	2,986	2,973	0,9989

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados encontrados na inclinação linear pelo coeficiente de adsorção (kd) nos quatro pontos do solo foram de (0,522 a 2,580 $\mu\text{g mL}^{-1}$) e coeficientes de grau de linearidade (1/n) entre (1,145 a 5,665). Para a isoterma Langmuir (Kd) A e para a isoterma de Freundlich (Kf) B variaram entre (1,456 a 2,986 $\mu\text{g mL}^{-1}$).

Tabela 3 - Valores obtidos para os coeficientes de adsorção (Kd), constante de carbono orgânico (Koc), constante de matéria orgânica (Kmo), coeficiente de Freundlich (Kf), grau de linearidade das isoterma (1/n) e o coeficiente de correlação (R²) para o herbicida glifosato.

13

Amostras	Kd $\mu\text{g mL}^{-1}$	Koc %	Kmo %	Kf $\mu\text{g mL}^{-1}$	1/N	R ²
P ₁	6,230	125,38	72,72	1,270	3,810	0,9938
P ₂	0,013	275,84	160,00	7,790	4,190	0,9983
P ₃	0,164	149,91	86,95	1,990	1,154	0,9996
P ₄	0,641	191,55	111,11	2,047	1,250	0,9889

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os valores dos coeficientes de partição (Kd) variaram de 0,013 a 6,230 $\mu\text{g mL}^{-1}$ e os coeficientes de linearidade (1/n) de 1,250 a 4,190 $\mu\text{g mL}^{-1}$, indicando isotermas tipo C, com baixa afinidade do glifosato pela fase sólida e alta disponibilidade na solução do solo, o que sugere potencial de lixiviação e/ou degradação. Os valores de Kd < 10 confirmam baixa capacidade de adsorção do glifosato, conforme critérios do IBAMA (Silva et al., 2020).

As isotermas de Freundlich foram adequadas para descrever o comportamento sortivo, principalmente quando n se aproxima de 1. O coeficiente K_d é um indicador da energia de adsorção. Em comparação, Silva et al. (2020) identificaram valores de K_d entre 9,95 e 10,45 $\mu\text{g mL}^{-1}$ para malathion, considerados elevados. A sorção do glifosato, mesmo após remoção da matéria orgânica, está mais relacionada à fração mineral dos solos, envolvendo mecanismos específicos de ligação e não apenas partição hidrofóbica.

Estudos demonstram que a sorção de herbicidas, incluindo o glifosato, é fortemente influenciada pelas propriedades físico-químicas do solo, especialmente pelo pH, teor de carbono orgânico, matéria orgânica e fração argilosa, que aumentam a retenção desses compostos na matriz coloidal (Lita et al., 2023). No presente estudo, os coeficientes K_{oc} variaram de 143,66 a 275,84% e K_{mo} de 72,72 a 160,00%, indicando que a natureza da matéria orgânica e os atributos do solo exercem papel determinante no processo de sorção do glifosato.

Estudos recentes indicam que fertilizantes fosfatados podem competir diretamente com o glifosato pelos mesmos sítios de adsorção no solo, reduzindo sua fixação à fase sólida e aumentando a fração em solução (Dotor-Robayo et al., 2022). Em solos tropicais, a mobilidade e a mineralização do glifosato também são moduladas por atributos como teor de carbono orgânico, composição mineralógica e pH, de modo que solos mais ácidos e com maior conteúdo de matéria orgânica tendem a reter e degradar mais o herbicida do que solos neutros a básicos com menor carbono orgânico (Dotor-Robayo et al., 2024).

CONCLUSÃO

Com base nas caracterizações dos solos analisados, foi possível identificar que os solos das regiões agrícolas estudadas são classificados como areia média a fina, com textura siltosa a argilosa. A predominância da fração de argila em todos os pontos avaliados pode indicar um solo com elevado teor de matéria orgânica. Considerando a textura predominantemente argilosa, os teores médios de matéria orgânica encontrados podem estar associados à adição de insumos orgânicos, como adubos, que intensificam a atividade biológica no solo. Esse cenário também pode favorecer o acúmulo do herbicida glifosato, frequentemente aplicado durante o manejo pós-emergente das lavouras.

Verificou-se que 100% dos produtores rurais das propriedades analisadas fazem uso de produtos químicos, como herbicidas e inseticidas, sendo o glifosato o mais utilizado. As alterações observadas nos valores de pH entre as duas coletas foram discretas e não indicaram

impacto significativo sobre a qualidade do solo. Além disso, a forma linearizada das isotermas de Freundlich foi considerada satisfatória para a maioria das combinações solo versus herbicida. Isso indica que, nas concentrações avaliadas, as isotermas são do tipo C e passíveis de linearização nos dois períodos de coleta. Tal comportamento sugere baixa afinidade do glifosato pela fase sólida do solo, o que implica alta disponibilidade na solução do solo e, consequentemente, maior potencial de lixiviação e/ou biodegradação.

REFERÊNCIAS

BARROSO GM, et al. Pesticide residue management in Brazil: implications for human health and the environment. *Sustainability*, 2025; 17(9): 3891-3899.

CASTRO TM, et al. Vulnerabilidade do solo em área agrícola à contaminação por agrotóxicos. *Revista FSA*, 2020; 17(1): 217-229.

DUARTE KG, et al. Estudo da gestão da produção agrícola familiar na comunidade Canaã, Paço do Lumiar, Maranhão, Brasil. *Research, Society and Development*, 2021; 10(10): 1-12.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 2nd ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2017; 212 p.

GOMES AMS, et al. O uso indiscriminado de agrotóxicos e suas consequências na saúde humana e no ambiente: revisão bibliográfica. *Diversitas Journal*, 2020; 5(3): 1691-1706.

IBGE. *Censo agropecuário 2017: resultados definitivos*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019; 105 p.

IBGE. *Paço do Lumiar – MA: panorama municipal*. 2024.

KOVÁCS N, et al. Glyphosate/AMPA adsorption on magnetite under different conditions: the effect of pH and electrolytes. *Journal of Molecular Liquids*, 2024; 393: 123674.

LITA AL, et al. Glyphosate removal from water using biochar based coffee husk loaded Fe₃O₄. *Water*, 2023; 15(16): 2-12.

NARA FSP/USP. Ariadne – Sistema de Informações sobre Agrotóxicos. Núcleo de Pesquisas em Avaliação de Riscos Ambientais da FSP-USP, 2020.

QIU F, et al. Adsorption of glyphosate in water using iron-based water treatment residuals derived from drinking water treatment plants. *Processes*, 2024; 12(7): 1352.

ROBAYO MYD, et al. Influence of monoammonium phosphate on glyphosate adsorption-desorption in tropical soils: effect of the order of sorbate additions. *Chemosphere*, 2022; 303: 135030.

ROBAYO MYD, et al. Effect of the phosphate and mineralogical composition on the movement and mineralization of glyphosate in clay soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2024; 21(15): 9365-9375.

SILVA A, et al. Environmental impact of agrochemical uses on the island's agricultural production area in Maranhão, Brazil. *Global Journal of Science Frontier Research: Agriculture and Veterinary*, 2020; 20(3).

SILVA VD, et al. Perfil microbiológico e físico-químico do sedimento da região do Mangue Seco. *Caderno Pedagógico*, 2025; 22(8): 4-11.

VIANA E, et al. Diversidade da fauna edáfica em solos com diferentes sistemas de manejos no norte do Rio Grande do Sul. *Research, Society and Development*, 2022; 11(5): 1-11.

VIEIRA JMM, et al. Uso de agrotóxicos e prejuízos à saúde do produtor rural. *Biodiversidade Brasileira*, 2025; 15(3): 32-35.