BEATRIZ DITOS CAVALCANTI

ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLOS DA AMAZÔNIA MERIDIONAL

Dissertação de Mestrado

ALTA FLORESTA - MT

2025

	BEATRIZ DITOS CAVALCANTI	Diss. MESTRADO	PPGBioAgro 2025

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO
FACULDADE DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E AGROECOSSISTEMAS AMAZÔNICOS

BEATRIZ DITOS CAVALCANTI

ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLOS DA AMAZÔNIA MERIDIONAL

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos, para a obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Caione
Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Ferreira Ferbonink

ALTA FLORESTA - MT

2025

Ficha catalográfica elaborada pela Supervisão de Bibliotecas da UNEMATCatalogação de Publicação na Fonte.
UNEMAT - Unidade padrão

C376i Cavalcanti, Beatriz Ditos.
ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLOS DA AMAZÔNIA MERIDIONAL / Beatriz Ditos Cavalcanti. - Cáceres, 2025.
47f.: il.

Universidade do Estado de Mato Grosso "Carlos Alberto Reyes Maldonado", Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos/AFL-PPGBIOAGRO - Alta Floresta - Mestrado Academico, Campus Universitário De Alta Floresta.
Orientador: Prof. Dr. Gustavo Caione.
Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Ferreira Ferbonink.

1. Isotermas de Langmuir. 2. BET. 3. Freundlich. 4. Temkin. 5. Fósforo (P). 6. Correlação de Pearson. I. Caione, Prof. Dr. Gustavo. II. Ferbonink, Prof. Dr. Guilherme Ferreira. III. Título.

UNEMAT / MTSCB CDU 631.4

ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLOS DA AMAZÔNIA MERIDIONAL

BEATRIZ DITOS CAVALCANTI

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos, para a obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos.

Aprovada em: 16 de abril de 2025.

Prof. Dr. Gustavo Caione
Orientador
Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT

Prof. Dr. Luís Léssi dos Reis
Avaliador Externo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Machado – IFSULDEMINAS

Prof. Dr. Oscar Mitsuo Yamashita
Avaliador Interno
Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais Antonio Juvencio Cavalcanti e Benedita Ditos Cavalcanti que sempre acreditaram em mim, sendo meu alicerce, minha locomoção e minha inspiração.

AGRADECIMENTOS

Completar essa jornada acadêmica é um momento de imensa gratidão e profundas reflexões. Olhar para trás e perceber os desafios superados, os aprendizados conquistados e, acima de tudo, as pessoas que estiveram ao meu lado como fontes de força e inspiração enche meu coração de emoção.

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus e a Nossa Senhora, e à minha família, em especial aos meus pais, Antonio Juvencio Cavalcanti e Benedita Ditos Cavalcanti, que foram meu alicerce ao longo de toda essa trajetória. Suas palavras de encorajamento, o carinho nos momentos difíceis e a paciência infinita foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Vocês são minha maior motivação e meu porto seguro.

Sou profundamente grata aos meus amigos, especialmente José Luiz da Silva, Nayara Bertolino, Islandia Silva Pereira, Andreia Tramontin, Celia Vicente, Angelita Heidmann Campos, Ostenildo Ribeiro Campos, Márcia Regina da Silva, Andrea Bertolino, Karin Beserra Paggi, Ronalton Ramos, Adriano Campos, Erison Almagro Moura, Rosa Maria Pereira da Rosa e tantos outros(as) que não mencionarei aqui, mas que tornaram essa caminhada mais leve com palavras de apoio, risadas e companheirismo. Cada conversa e cada gesto de amizade foram como luzes em dias nublados.

À Universidade do Estado do Mato Grosso “Carlos Alberto Reyes Maldonado” (UNEMAT), ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos (PPGBioAgro), e a todos os professores envolvidos em minha formação, minha mais profunda gratidão pelo ensino de qualidade. Em especial, aos meus orientadores, os professores doutores Gustavo Caione e Guilherme Ferreira Ferbonink, registro meu sincero agradecimento por suas dedicações, orientações e pelos conhecimentos compartilhados. Vocês não apenas contribuíram para minha formação acadêmica, mas também ajudaram a construir os valores que levarei comigo para a vida inteira.

Por fim, agradeço pelas adversidades enfrentadas, que me ensinaram a importância da resiliência e do trabalho árduo. Cada obstáculo foi uma

oportunidade de crescimento, e hoje celebro essa conquista com o coração cheio de gratidão e alegria.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. REVISÃO DA LITERATURA 14
2.1 Fração do fósforo 14
2.2 Adsorção 15
2.3 Isotermas de Langmuir 16
2.4 Isotermas de BET 16
2.5 Isotermas de Freundlich 18
2.6 Isotermas de Temkin 19
2.7 Correlação de Pearson 20
3. MATERIAL E MÉTODOS 22
3.1 Area de estudo 22
3.2 Análise dos dados 23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 24
5. CONCLUSÕES 39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Apresenta as diferentes frações de fósforo e sua dinâmica no solo..10

Tabela 02. Valores nas diferentes isotermas (BET, Langmuir, Freundlich e Temkin) para cada repetição em áreas e amostras distintas, para os seguintes parâmetros: Ct, Cs de BET; Qm, KI, de Langmuir; KF, n, de Freundlich; A, e B de Temkin.....22

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Localização das áreas experimentais.....17

Figura 02. Análise de correlação entre os parâmetros das isotermas (ex.: Ct, Cs, Qm, KI, KF, n, A, B, Plábil, Pnãolábil, Pmoderado e Ptotal), destacando como os modelos se inter-relacionam 24

Figura 03. Parâmetros comparativos dentro de cada modelo (ex.: Ct, Cs, Qm, KI, KF, n, Ks, As, Plábil, Pnãolábil, Pmoderado e Ptotal) e entre modelos (ex.: Ct, Cs, Qm, KI, KF, n, A, B, Plábil, Pnãolábil, Pmoderado e Ptotal)..... 26

Figura 04. Matriz de Correlação entre Parâmetros de Modelos de Isoterma de Adsorção.....28

RESUMO

A pesquisa investigou a adsorção de fósforo em solos da Amazônia Meridional, considerando modelos isotérmicos de Langmuir, BET, Freundlich e Temkin. A análise envolveu 20 amostras coletadas em diferentes áreas, buscando entender como as frações de fósforo interagem com os parâmetros dos modelos de adsorção. Os resultados indicaram que os solos apresentam variações significativas na capacidade de adsorção do fósforo, influenciadas pela mineralogia, textura e composição química. O modelo de Langmuir mostrou-se adequado para prever a adsorção em monocamada, enquanto BET destacou-se na descrição de múltiplas camadas. Freundlich revelou a heterogeneidade dos sítios de adsorção, e Temkin evidenciou a influência da energia de adsorção. A análise estatística, por meio da Correlação de Pearson, permitiu identificar padrões entre as frações de fósforo e os parâmetros isotérmicos, reforçando a necessidade de uma abordagem integrada para melhorar a fertilização fosfatada e o manejo sustentável dos solos amazônicos.

Palavras-chave: Isoterma de Langmuir; Isoterma de BET; Isoterma de Freundlich; Isoterma de Temkin; Correlação de Pearson.

ABSTRACT

The research investigated phosphorus adsorption in soils from the Southern Amazon, considering Langmuir, BET, Freundlich and Temkin isothermal models. The analysis involved 20 samples collected in different areas, seeking to understand how phosphorus fractions interact with the parameters of the adsorption models. The results indicated that soils present significant variations in phosphorus adsorption capacity, influenced by mineralogy, texture and chemical composition. The Langmuir model proved to be adequate to predict monolayer adsorption, while BET stood out in the description of multiple layers. Freundlich revealed the heterogeneity of adsorption sites, and Temkin evidenced the influence of adsorption energy. Statistical analysis, through Pearson's correlation, allowed identifying patterns between phosphorus fractions and isothermal parameters, reinforcing the need for an integrated approach to improve phosphate fertilization and sustainable management of Amazonian soils.

Keywords: Langmuir isotherm; BET isotherm; Freundlich isotherm; Temkin isotherm; Pearson correlation.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia Meridional possui diversidades geológica e climática que resultaram em solos variados, amplamente caracterizados pela baixa fertilidade, com apenas 16% desses solos considerados adequados (SANTOS et al., 2018), enquanto os demais apresentam limitações significativas, principalmente quanto a baixa disponibilidade de fósforo. O processo de intemperismo condiciona o solo para atuar como fonte ou dreno de fósforo devido à fixação em sítios ativos (SANTOS et al., 2018).

As frações de fósforo no solo incluem fósforo lábil, moderado e não lábil. O fósforo lábil é caracterizado pela sua alta disponibilidade para as plantas, sendo facilmente acessado por meio de soluções de solo. O fósforo moderado é menos disponível, mas ainda pode ser convertido em formas utilizáveis por processos químicos ou biológicos. O fósforo não lábil serve como importante reserva de longo prazo no solo, desempenha o papel essencial na manutenção da fertilidade e previne a lixiviação excessiva.

A adsorção de fósforo pode ser quantificada por modelos matemáticos, como Langmuir, BET, Freundlich e Temkin, que ajudam a estimar a quantidade do nutriente adsorvido em função de diferentes concentrações na solução de equilíbrio e fornecem informações essenciais sobre os sistemas de adsorção (DUNNE et al., 2020); enquanto as análises de correlação, como Pearson, permitem aprimorar os modelos isotérmicos e entender melhor as interações entre os parâmetros químicos e físicos.

O objetivo neste trabalho foi estudar a correlação entre as constantes das isotermas de Langmuir, BET, Freundlich e Temkin e os atributos químicos e físicos com as frações de P do solo, buscando evidenciar se o uso de isotermas pode predizer o comportamento do solo quanto à sua capacidade de adsorver P em amostras de solos de agroecossistemas na Amazonia Meridional.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Os Latossolos e os Argissolos são as classes de solos predominantes no território brasileiro, com aproximadamente 58% da área territorial do país, caracterizados por serem altamente intemperizados, ácidos e de baixa fertilidade natural (SÁ et al., 2021). Em solos com alto grau de intemperismo, a eficiência da adubação fosfatada é geralmente baixa, devido à imobilização do fósforo no solo por meio de reações de precipitação, adsorção e fixação (PELUCO et al., 2015).

A quantificação da fixação de fosfato nas amostras é realizada principalmente por estudos de adsorção, utilizando isotermas que descrevem a relação entre o fósforo na solução e na fase sólida (SANTOS et al., 2018). Essas isotermas são utilizadas como uma forma de descrever matematicamente a quantidade de P adsorvida em uma fase sólida em relação a concentração de P em uma solução de equilíbrio.

2.1 Fração do fósforo

As amostras apresentam diferentes frações de fósforo (Tabela 1), orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi), que constituem o fósforo total (Pt) que apresentam diferentes graus de disponibilidade (LEITE et al., 2016). O fósforo lábil é a fração mais disponível para as plantas e diretamente presente na solução do solo ou adsorvido em superfícies minerais de forma reversível. Este tipo de fósforo é influenciado por fatores como o pH do solo e a matéria orgânica. Em solos da Amazônia Meridional, o P-lábil tende a ser baixo devido à alta adsorção em óxidos de ferro e alumínio (LEITE et al., 2016), com a função principal de nutrir as plantas no curto prazo.

Tabela 1. Frações e dinâmicas de fósforo no solo.

Frações	Dinâmica das frações no solo
Plábil	Refere-se ao fósforo facilmente disponível para as plantas, encontrado na solução do solo ou fracamente adsorvido.
Pmoderado	Representa uma forma intermediária, menos acessível, que pode ser convertida em fósforo lábil por processos químicos ou biológicos.
Pnaolabil	Inclui o fósforo retido de forma mais estável no solo, como em minerais cristalinos ou adsorvido em óxidos metálicos, atuando como reserva de longo prazo.
Ptotal	É a soma de todas as frações de fósforo presentes no solo, englobando formas lábeis, moderadas e não lábeis.

O Pmoderado representa uma forma intermediária de fósforo, que pode ser lentamente convertido em Plábil, está associada a compostos minerais mais estáveis,

como fosfatos de cálcio, ou ligada a matéria orgânica mais resistente à decomposição e contribui para a fertilidade do solo em médio prazo, especialmente sob manejo adequado (LEITE et al., 2016).

O fósforo não lábil é altamente retido no solo, seja em minerais cristalinos, como apatita, ou fortemente adsorvido a superfícies de óxidos metálicos; atua como uma reserva de longo prazo, desempenhando um papel crucial na manutenção da fertilidade do solo e na prevenção da lixiviação excessiva (SANTOS et al., 2023).

Fósforo Orgânico inclui compostos de fósforo presentes na matéria orgânica, como fosfolipídios, nucleotídeos e fitatos. A atividade microbiana é essencial para a mineralização do P-orgânico, transformando-o em formas mais disponíveis (LEITE et al., 2016). Embora menos estudado, o P-orgânico possui grande relevância na reciclagem de nutrientes em solos tropicais. O P-total engloba todas as frações mencionadas, fornecendo uma visão geral da quantidade de fósforo presente no solo. Sua distribuição e proporção variam conforme o manejo agrícola, histórico de uso e mineralogia dos solos (SANTOS et al., 2023).

2.2 Adsorção

Adsorção fixa de fósforo é o processo no qual esse fósforo que está presente nos colóides, ou na solução do solo ou no complexo de troca de íons, esse P passa a fazer parte da estrutura do mineral (SPOSITO, 2008), tornando-se indisponível para a planta (NOVAIS; SMYTH, 1999). Os íons de fósforo presente na solução do solo podem estar presentes em diversas espécies iônicas, essas que variam de acordo com o pH do solo, esse fósforo está carregado eletricamente, porém a densidade iônica e o equilíbrio do pH do solo são os fatores que manejam a adsorção de fosfato pelo solo, devido à sua potencialidade de modificar tanto o ponto de carga zero quanto a carga elétrica no solo (NOVAIS; SMYTH, 1999).

A capacidade máxima de adsorção de um solo está relacionada com a quantidade de sítios de adsorção que esse solo possui, podemos deduzir que o solo compete com a planta pelo fosfato ao invés de atuar como fonte ele passa atuar como dreno e reduz a disponibilidade desse fósforo, quanto maior a proporção de argila mais adsorção de P, portanto o que mais influência na adsorção de fósforo é o teor de argila presente nos solos e sua composição mineralógica (NOVAIS; SMYTH, 1999). A estrutura física e química do solo interfere no comportamento de adsorção de fósforo. Frações de solos com maior proporção de componentes finos apresentam

maior capacidade de adsorção devido à maior disponibilidade de sítios ativos. Por outro lado, frações com menor quantidade desses componentes tendem a ser menos eficientes no processo de adsorção (LUO et al., 2023).

2.3 Isotermas de Langmuir

Langmuir (1918) desenvolveu uma equação de isotérmica para o explicar a adsorção, que se tornou base para o desenvolvimento de uma gama de isotermas de adsorção. Ele estudou a formação de filmes uni moleculares, na superfície de líquidos insolúveis (CASTELLAN et al., 2011) e sua interação ao entrar em contato com superfícies de vidro, mica e platina, resultando um modelo isotérmico de adsorção de camada única, a isoterma de adsorção química (LANGMUIR, 1918). Considerações cinéticas e de equilíbrio (CASTRO et al., 2019). O modelo de Langmuir descreve a adsorção em equilíbrio, onde a taxa de adsorção é igual à de dessorção. Esse modelo assume que a adsorção ocorre em monocamada em superfícies homogêneas e todos os sítios têm a mesma energia de ligação (CASTELLAN et al., 2011). A equação de Langmuir é aplicável a homogêneos de adsorção, onde a adsorção de cada molécula de adsorvato na superfície têm igual energia de ativação da sorção. A forma linear desta isoterma é representada pela expressão (LANGMUIR, 1918):

$$R_L = \frac{1}{1 + K_{L.}Q_m}$$

O modelo descreve a adsorção em monocamada em superfícies homogêneas, assumindo que todos os sítios de adsorção possuem a mesma energia de ligação, onde R_L indica as formas das isotermas: desfavorável ($R_L > 1$), linear ($R_L = 1$), favorável ($0 < RL < 1$) ou irreversível ($R_L = 0$) e os parâmetros K_L é a constante de equilíbrio de Langmuir, que mede a afinidade entre o fósforo e o solo; e Q_m é a monocamada teoricamente saturada.

2.4 Isotermas de BET

Em 1938 a equação isotérmica desenvolvida por Brunauer, Emmett e Teller (BET) na ciência de adsorção foi um marco. Diante do desenvolvimento de um modelo isotérmico multicamadas (fisissorção) onde a quantidade de substância adsorvida na

primeira camada (ponto B da curva tipo II) era algo excepcional (DABROWSKI, 2001). Outra forma considerada da equação de BET é calcular a área de superfície específica do adsorvente onde todas as camadas de adsorção são utilizadas (DABROWSKI, 2001).

A adsorção de camadas multimoleculares é devido às forças a condensação essas que vêem acontecer devido a pressões muito mais baixas do que a pressão de vapor do líquido, porém, desde que em capilares de dimensões moleculares a condensação ocorra a pressões inferiores à pressão de vapor. Por exemplo, a pressão em um capilar é menor do que no vapor de um líquido (BRUNAUER et al., 1938); porém a primeira camada de adsorção é formada sobre sítios de energia uniforme; as taxas de adsorção e dessorção são idênticas em cada camada molecular, onde a partir da segunda camada o calor de adsorção é idêntico ao calor de condensação do substrato (HILL, 1977). A equação da isoterma de BET é expressa como:

$$Q = \frac{Q_m . C_b(\frac{P}{P_0})}{1 - (\frac{P}{P_0})\left[1 + (C_b - 1)(\frac{P}{P_0})\right]}$$

onde:

Q é a quantidade de adsorbato adsorvida,

Qm representa a quantidade máxima de adsorbato na monocamada,

Cb é um parâmetro relacionado à energia de adsorção,

P/P_0 é a pressão relativa do gás adsorvido.

No modelo BET, uma isotérmica que leva em conta a possibilidade de que a monocamada na adsorção de Langmuir, onde a isotérmica pode atuar como um substrato para posterior adsorção (BRUNAUER et al., 1938).

Considera a formação de multicamadas de adsorção e é amplamente utilizado para determinar a área superficial e a porosidade do solo. Na equação os parâmetros Qm e Cb têm papéis fundamentais na descrição da adsorção em múltiplas camadas (HILL, 1977). O Qm está relacionado diretamente à área superficial do material adsorvente, sendo utilizado para determinar características físico-químicas de sólidos porosos, quanto maior Qm, maior é a capacidade de adsorção do material na primeira camada de adsorvato (BRUNAUER et al., 1938).

O parâmetro Cb está associado à energia de adsorção da primeira camada de moléculas em relação às camadas subsequentes, indicando a afinidade do adsorbato pelo adsorvente (BRUNAUER et al., 1938). Se Cb for alto, significa que a adsorção na monocamada é forte, e as moléculas apresentam maior dificuldade para formar camadas adicionais. Já valores mais baixos de Cb sugerem que a adsorção ocorre com menor energia, facilitando a formação de múltiplas camadas (BRUNAUER et al., 1938).

Na equação,Qm aparece no numerador, multiplicando Cb, o que indica que a capacidade máxima de adsorção na monocamada afeta diretamente a quantidade total de adsorbato adsorvida. Já Cb está envolvido no fator de correção do denominador, influenciando a relação entre a pressão e a quantidade de adsorção, refletindo a força de interação entre o adsorbato e o adsorvente (DABROWSKI, 2001).

2.5 Isotermas de Freundlich

Freundlich desenvolveu um dos mais populares modelos isotérmicos adsortivos. A porosidade da superfície influencia diretamente na concentração de moléculas adsorvidas, via utilização de hidrogênio e mica para seus estudos e optando por explorar, no processo de adsorção, uma espécie de superfície homogênea, porém porosa (FREUNDLICH, 1932). Este modelo fornece uma equação que define a heterogeneidade de superfície e distribuição exponencial de sítios ativos (AYAWEI et al., 2017). Também neste modelo de isotérmica prevê a relação logarítmica da capacidade de equilíbrio e adsorvida capacidade (GESSNER et al., 1987). A isoterma de adsorção multi sítio para superfícies heterogêneas é a isoterma de adsorção de Freundlich e a forma linear desta isoterma é expressa como (FREUNDLICH, 1906):

$$l_n Q_e = l_n K_F + \frac{1}{n} l_n C_e$$

Onde: KF é a constante de Freundlich e n é o Expoente de Freundlich. Portanto, que l_nQ_e em função l_nC_e é uma reta com interseção a l_nK_F permite que a constante e o expoente n sejam determinados.

Um modelo empírico desenvolvido para superfícies heterogêneas, onde a energia de adsorção varia entre os sítios (CASTELLAN et al., 2011). Os parâmetros

K_F (capacidade total de adsorção) e *n* (heterogeneidade) são utilizados para descrever a distribuição dos sítios e a intensidade da adsorção (AYAWEI et al., 2017).

2.6 Isotermas de Temkin

Dentre esses modelos, a isoterma de Temkin, proposta por Temkin e Pyzhev (1940), destaca-se por considerar a variação da energia de adsorção à medida que a cobertura superficial aumenta (CHU, 2021).

Ao contrário da isoterma de Langmuir, que assume que todos os sítios de adsorção possuem a mesma energia, o modelo de Temkin incorpora a influência das interações adsorvato-adsorvente (SAID, 2018). Essa abordagem permite uma descrição mais realista de sistemas onde há variações energéticas significativas, tornando-o adequado para situações em que as forças intermoleculares alteram a distribuição da energia de adsorção (SILVA, 2024).

O modelo de Temkin parte do pressuposto de que a energia de adsorção diminui linearmente à medida que os sítios são ocupados, em decorrência das interações entre as moléculas adsorvidas. Matematicamente, a equação que representa essa isoterma é expressa por: (CHU, 2021).

$$Q = Bln(K_T C)$$

onde:

Q é a quantidade de adsorbato adsorvida,

B é um parâmetro relacionado à energia de adsorção e à temperatura,

K_T representa a constante de equilíbrio da isoterma de Temkin,

C é a concentração do adsorbato na solução.

Para uma compreensão mais aprofundada do modelo, é essencial considerar os parâmetros A e B, que são utilizados para descrever os efeitos da afinidade entre adsorbato e adsorvente, além da influência da temperatura no processo de adsorção (JOHNSON E ARNOLD, 1995). O parâmetro A representa a afinidade do adsorvente pelo soluto e reflete a intensidade da interação química ou física entre as espécies presentes. Quanto maior o valor de A, mais forte será essa interação, o que influencia diretamente a energia envolvida no processo (CHU, 2021).

Por sua vez, o parâmetro B está relacionado à temperatura (T) e à constante universal dos gases (R), sendo determinado pela equação:

$$B = \frac{RT}{A}.$$

onde:

R é a constante universal dos gases (8,314 J/mol·K),

T é a temperatura absoluta (K),

A representa a afinidade do adsorvente pelo adsorbato.

Ao substituir B na equação original, obtém-se a forma expandida da isoterma de Temkin:

$$Q = \frac{RT}{A} \ln (K_T C)$$

Essa equação evidencia que A aparece no denominador do termo que expressa a influência da temperatura no processo de adsorção. Dessa forma, quanto maior for A, menor será a variação energética ao longo da cobertura dos sítios de adsorção (CHU, 2021).

Diferentemente do modelo de Langmuir, que assume energia de adsorção constante e adsorção em monocamada, a abordagem proposta por Temkin considera que a energia de adsorção sofre redução gradativa, refletindo um comportamento mais realista para sistemas onde há interações significativas entre as moléculas adsorvidas e o adsorvente (ARAÚJO et al., 2018).

O modelo de Temkin tem ampla aplicação em estudos de adsorção de metais pesados em solos, tratamento de águas contaminadas e processos industriais, nos quais a heterogeneidade dos sítios de adsorção pode influenciar diretamente a eficiência da remoção de substâncias específicas (SILVA, 2024). Seu uso permite uma avaliação mais precisa das propriedades físico-químicas envolvidas e contribui para o desenvolvimento de tecnologias voltadas à engenharia ambiental e química de materiais (SILVA, 2024).

2.7 Correlação de Pearson

A Correlação de Pearson, também conhecida como coeficiente de correlação produto-momento de Pearson ou r de Pearson, é uma técnica estatística paramétrica utilizada para avaliar o grau e a direção da relação linear entre duas variáveis contínuas (PEARSON, 1895). Essa medida tem aplicações abrangentes em diversas áreas da ciência, para identificar e quantificar associações lineares entre variáveis. O cálculo da Correlação de Pearson se baseia na covariância entre as duas

variáveis e na variabilidade de cada uma delas. O coeficiente de correlação de Pearson (r) varia de -1 a +1, onde:

r = +1: Indica uma correlação linear positiva perfeita, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta na mesma proporção;

r = -1: Indica uma correlação linear negativa perfeita, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui na mesma proporção; e

r = 0: Indica ausência de correlação linear entre as variáveis.

A Correlação de Pearson assume que as variáveis possuem distribuição normal bivariada e que a relação entre elas é linear. Caso esses pressupostos não sejam satisfeitos, a interpretação do coeficiente de correlação pode ser comprometida (OSBORNE, WATERS, 2002). O cálculo e a interpretação do coeficiente de correlação são relativamente simples e fornece informações claras sobre a direção e a força da relação linear entre as variáveis.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Area de estudo

A pesquisa foi realizada com 20 amostras de solos, coletadas em 5 áreas diferentes, localizadas nos municípios de Alta Floresta e Paranaíta, ambos localizados na região norte mato-grossense (IBGE, 2017), no bioma Amazônico. As amostras são de áreas experimentais que estão situadas na Fazenda Apiacás, localizada no município de Paranaíta - MT (09º 54’ 05” O e 56º 49’ 55” S), e na Fazenda Bacaeri, no município de Alta Floresta - MT (09º 59’ 02” O e 56º 53’ 15” S), ambas a uma altitude média de 222 metros. As duas propriedades são contíguas, sendo separadas unicamente pela divisa municipal, representada pela rodovia MT-208 (HEMKEMEIER, 2022).

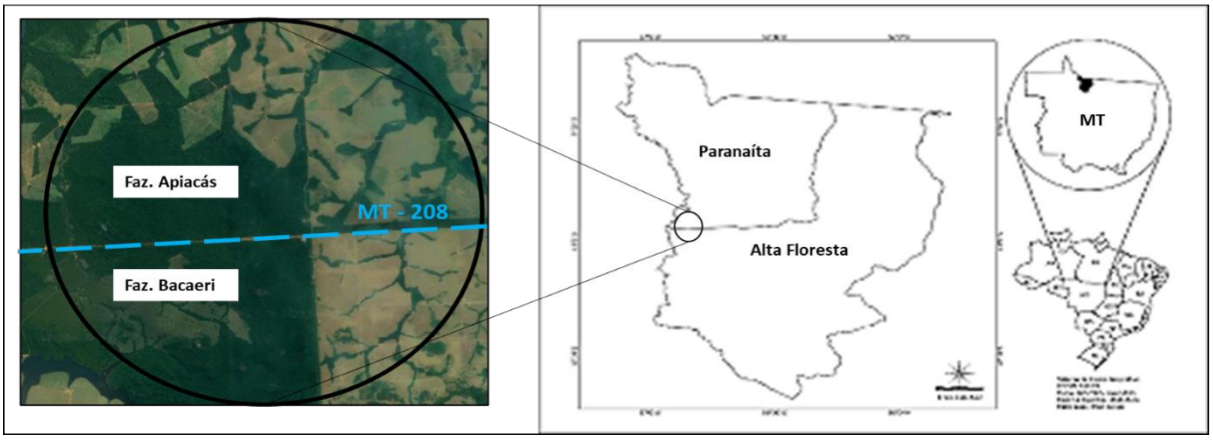

Figura 1. Localização da área experimental (HEMKEMEIER, 2022).

As temperaturas anuais dos municípios variam de 19,6ºC a 32,4ºC e as precipitações no período de maio a setembro variam entre 250 e 300 mm e nos meses de outubro a abril de 900 a 1000 mm (TARIFA, 2011). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (RABECINI, 2009).

As aptidões de adsorção e teor máximo de adsorção de fósforo foram examinadas em quatro amostras de solo das áreas de diferentes usos de solos usando diferentes isotermas com informações experimentais já expostos no Laboratório de Análises de Solos, Adubos e Foliar da UNEMAT (LASAF) - Câmpus Alta Floresta - MT.

As curvas de adsorção foram realizadas em amostras de solos armazenadas no LASAF, oriundas das áreas de cultivos com diferentes usos (HEMKEMEIER, 2022).

3.2 Análise dos dados

As isotermas de adsorção de fósforo foram construídas a partir de quatro diferentes modelos (Langmuir, BET, Freundlich e Temkin), que permitem compreender a capacidade de adsorção do solo em função das concentrações de fósforo na solução. Essas isotermas representam a relação entre a concentração de fósforo na solução e a quantidade adsorvida pelo solo, proporcionando informações sobre os parâmetros de adsorção. Por meio das análises, foi possível identificar padrões de adsorção e correlações entre os parâmetros isotérmicos e as frações de fósforo (lábil, moderado e não lábil) nas diferentes amostras de solo avaliadas.

Para a elaboração de todos os modelos acima foi utilizado o pacote ‘AdsorpR’ no R (The R Foundation For Statistical Computing, 2016). Também foi realizada análise de Correlação de Pearson onde os gráficos de dispersão foram utilizados para visualizar as relações entre as variáveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados evidenciaram diferenças marcantes na eficácia dos modelos de Langmuir, BET, Freundlich e Temkin na descrição do processo de adsorção de fósforo nas amostras da Amazônia Meridional.

O modelo BET (Brunauer, Emmett e Teller) é amplamente utilizado para descrever a adsorção física em superfícies sólidas, fornecendo parâmetros importantes para entender a capacidade de adsorção e a interação entre o adsorvato e o adsorvente (JIANG et al., 2023). Nos dados analisados (Tabela 2), observa-se uma variação significativa nos valores de BET_Qm entre as amostras, o que indica diferentes capacidades máximas de adsorção de fósforo (JIANG et al., 2023). Essa variabilidade pode estar associada a características físicas e químicas dos materiais analisados, como área superficial específica, porosidade e composição mineralógica.

Além disso, o parâmetro BET_Cb apresenta valores negativos em todas as amostras, o que pode indicar dificuldades no ajuste do modelo BET para descrever adequadamente o processo de adsorção nessas condições específicas (JIANG et al., 2023). Em geral, BET_Cb está relacionado à energia de interação entre o adsorvato e o adsorvente, e valores negativos podem sugerir que a suposição do modelo sobre a formação de multicamadas de adsorção não está sendo plenamente atendida (JIANG et al., 2023). Isso pode ocorrer em materiais com baixa afinidade pelo fósforo ou em sistemas nos quais outras interações, como complexação ou troca iônica, desempenham papéis mais importantes na adsorção (FALCÃO; SILVA, 2004).

A grande disparidade nos valores de BET_Qm entre amostras distintas sugere que há fatores intrínsecos ao material que influenciam diretamente sua capacidade de retenção de fósforo (AYAWEI et al., 2017). Em alguns casos, valores relativamente elevados de BET_Qm podem indicar uma maior disponibilidade de superfícies ativas para adsorção, enquanto valores menores podem estar associados a superfícies menos reativas ou à presença de componentes que dificultam a adsorção (JIANG et al., 2023). Esse comportamento reforça a necessidade de uma caracterização mais aprofundada dos materiais para compreender melhor os mecanismos envolvidos na adsorção de fósforo e, eventualmente, explorar modificações nos adsorventes para otimizar sua capacidade de retenção (AYAWEI et al., 2017).

Tabela 2. Valores nas diferentes isotermas (BET, Langmuir, Freundlich e Temkin) para cada repetição em áreas e amostras distintas, para os seguintes parâmetros: *Qm, Cb* de BET; *Qm, Kl,* de Langmuir; K_F*, n,* de Freundlich; *A* e *B* de Temkin.

AREA	REP	BET_Qm	BET_Cb	Langmuir_Qm	Langmuir_Kl	Freundlich_KF	Freundlich_n	Temkin_A	Temkin_B
Amostra 01	1	2,28	-4,93	34,98	0,02	1,11	1,39	0,24	7,51
Amostra 01	2	1,86	-4,69	24,74	0,02	1,08	1,59	0,23	5,41
Amostra 01	3	2,29	-4,93	34,30	0,02	1,12	1,41	0,24	7,38
Amostra 01	4	2,94	-5,51	55,29	0,02	1,17	1,27	0,24	9,86
Amostra 02	1	0,26	-3,66	2,26	-0,06	4,28	151,05	591542,70	0,29
Amostra 02	2	0,95	-4,26	9,45	0,13	1,83	2,64	0,78	2,27
Amostra 02	3	0,68	-4,06	6,33	14,51	2,31	3,92	2,93	1,29
Amostra 02	4	0,48	-3,84	4,39	0,13	2,55	5,11	9,83	0,94
Amostra 03	1	1,46	-4,45	22,97	0,02	0,62	1,34	0,20	5,32
Amostra 03	2	2,49	-5,83	116,65	0,00	0,38	1,06	0,13	8,50
Amostra 03	3	1,91	-5,42	33,31	0,02	0,19	1,33	0,27	6,18
Amostra 03	4	2,27	-5,17	61,36	0,01	0,52	1,14	0,16	7,99
Amostra 04	1	1,47	-4,50	17,27	0,04	1,25	1,82	0,30	4,14
Amostra 04	2	0,82	-4,21	8,24	-1,15	2,15	2,75	1,05	2,39
Amostra 04	3	1,79	-4,94	22,50	0,02	1,02	1,61	0,24	4,96
Amostra 04	4	1,90	-4,80	24,46	0,03	1,33	1,60	0,29	5,86
Amostra 05	1	1,01	-4,19	10,75	0,07	1,33	2,16	0,43	2,79
Amostra 05	2	0,19	-3,72	1,68	-0,05	5,69	-17,15	269547,10	0,35
Amostra 05	3	1,25	-4,50	13,49	0,10	1,81	2,13	0,53	3,60
Amostra 05	4	0,84	-4,19	8,35	0,32	1,93	2,77	1,02	2,10

Outro aspecto relevante é a possibilidade de que o modelo BET não seja o mais adequado para descrever o sistema de adsorção do fósforo nas amostras analisadas. Embora amplamente empregado para caracterizar a adsorção física em sólidos porosos, o modelo BET assume algumas premissas específicas, como a formação de multicamadas e a ausência de interações laterais entre as moléculas adsorvidas (FALCÃO; SILVA, 2004). Caso essas condições não sejam plenamente atendidas, ajustes menos precisos podem ser observados, como sugerido pelos valores negativos de BET_Cb (JIANG et al., 2023). Nesse contexto, pode ser interessante considerar outros modelos, como os de Langmuir ou Freundlich, para avaliar a adequação da descrição da adsorção nessas amostras (FALCÃO; SILVA, 2004).

A interpretação dos valores (Tabela 2) de BET_Qm e BET_Cb deve ser feita com cautela, levando em consideração a natureza do material estudado e as possíveis limitações do modelo BET na descrição do sistema de adsorção (FARIAS et al., 2009). Estudos adicionais, incluindo experimentos complementares e análises de caracterização dos materiais, podem ajudar a elucidar os mecanismos envolvidos na adsorção de fósforo e a identificar estratégias para aprimorar a eficiência do processo em diferentes condições ambientais (FALCÃO; SILVA, 2004). Assim, compreender as particularidades do comportamento do fósforo nos materiais analisados permitirá um melhor direcionamento para aplicações em remediação ambiental, controle de poluição e aproveitamento sustentável de recursos (FALCÃO; SILVA, 2004).

O modelo de Langmuir é um dos mais amplamente utilizados para descrever processos de adsorção em superfícies sólidas, assumindo que a adsorção ocorre em um único nível de cobertura e que todas as posições de adsorção são energeticamente equivalentes (AYAWEI et al., 2017). Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam uma ampla variação no parâmetro Qm, que representa a capacidade máxima de adsorção de fósforo (AYAWEI et al., 2017). Essa dispersão nos valores sugere que há diferenças substanciais na natureza dos materiais analisados e em sua interação com o fósforo (AYAWEI et al., 2017). Diferentes amostras possuem distintas características físico-químicas que podem afetar sua capacidade de retenção de fósforo, incluindo área superficial específica, composição mineralógica, presença de óxidos metálicos e propriedades texturais (CORTIVO et al., 2019).

A grande variação observada em Qm pode indicar que algumas amostras possuem sítios de adsorção altamente disponíveis e acessíveis, enquanto outras podem apresentar obstruções ou interações competitivas que limitam a adsorção de fósforo (AYAWEI et al., 2017). Em amostras com valores elevados de Qm, é possível que haja uma maior disponibilidade de sítios ativos, favorecendo a adsorção. Por outro lado, valores menores podem ser atribuídos à presença de componentes que dificultam o processo, como matéria orgânica ou minerais que possuem baixa afinidade pelo fósforo (AYAWEI et al., 2017).

Outro fator importante é a variação do parâmetro Kl, que está diretamente relacionado à afinidade entre o adsorvente e o adsorbato. Valores elevados de Kl indicam uma forte interação entre o material e o fósforo, sugerindo que a adsorção ocorre de maneira eficiente e que a ligação entre as moléculas de fósforo e os sítios ativos do adsorvente é robusta (AYAWEI et al., 2017). Já valores mais baixos de Kl podem significar que a interação é fraca, tornando o fósforo mais facilmente removível da superfície adsorvente (AYAWEI et al., 2017).

A heterogeneidade nos valores de Kl pode estar relacionada a diferenças na química superficial dos materiais analisados, incluindo a presença de cargas elétricas, grupos funcionais ativos e interações químicas específicas (SILVA et al., 2019). Em alguns casos, materiais ricos em óxidos de ferro e alumínio tendem a apresentar valores elevados de Kl, pois esses compostos possuem alta afinidade pelo fósforo devido à formação de ligações específicas (SILVA et al., 2019). Em contrapartida, materiais com menor quantidade de tais óxidos podem exibir menor afinidade, refletindo valores reduzidos de Kl (SILVA et al., 2019).

Esses resultados reforçam a ideia de que a adsorção de fósforo não ocorre de maneira uniforme em todos os tipos de materiais e que múltiplos fatores influenciam diretamente a eficiência do processo. A análise conjunta dos parâmetros Qm e Kl no modelo de Langmuir é fundamental para compreender a capacidade de retenção de fósforo e a intensidade das interações adsorventes-adsorvato (SILVA et al., 2019). Além disso, tais variações indicam a importância de uma caracterização detalhada dos materiais antes de sua aplicação em remediação ambiental, tratamento de efluentes ou recuperação de fósforo em sistemas agrícolas (SILVA et al., 2019).

Portanto, ao interpretar esses resultados, é essencial considerar não apenas os valores numéricos dos parâmetros, mas também suas implicações práticas na adsorção de fósforo (HABEEB et al., 2023). Estratégias de otimização, como

modificações químicas nos materiais, ajustes nas condições ambientais ou escolha de adsorventes mais eficientes, podem ser exploradas para melhorar o desempenho dos processos de adsorção (HABEEB et al., 2023). O estudo desses modelos contribui para avanços no entendimento da adsorção de fósforo e abre caminho para aplicações inovadoras em diversas áreas científicas e tecnológicas (HABEEB et al., 2023).

O modelo de Freundlich é amplamente utilizado para descrever processos de adsorção em superfícies heterogêneas, sendo uma alternativa ao modelo de Langmuir quando a adsorção não ocorre de maneira uniforme (ARAÚJO et al., 2018). Ele assume que a adsorção em múltiplas camadas e que a energia de adsorção varia ao longo da superfície do adsorvente. Os parâmetros KF e n são essenciais para entender esse processo: KF representa a capacidade de adsorção do material e n indica a favorabilidade da adsorção, sendo que valores de n superiores a 1 indicam uma adsorção favorável (SILVA et al., 2019).

Nos dados analisados (Tabela 2), observa-se uma grande variação nos valores de KF e n, especialmente na Amostra 02. Essa ampla dispersão sugere que essa amostra possui um comportamento heterogêneo de adsorção, o que pode ser influenciado por fatores como a composição mineralógica do material, sua textura superficial, a presença de cargas elétricas e o tipo de interação química que ocorre entre o fósforo e os sítios de adsorção (CORNÉLIO, 2023). Em alguns casos, altos valores de KF podem indicar uma superfície altamente receptiva à adsorção de fósforo, enquanto valores mais baixos podem sugerir que os sítios ativos disponíveis são limitados ou possuem baixa afinidade pelo adsorvato (ARAÚJO et al., 2018).

A variabilidade no parâmetro n também reforça a heterogeneidade do comportamento de adsorção na Amostra 02 (Tabela 2). Em sistemas nos quais n assume valores muito elevados, a adsorção tende a ser mais espontânea e eficiente, indicando forte interação entre o fósforo e a superfície adsorvente (FARIAS et al., 2009). Por outro lado, valores de n próximos ou inferiores a 1 podem indicar uma menor eficiência no processo, sugerindo que a adsorção é menos favorável e pode depender de condições específicas do ambiente, como pH da solução ou concentração inicial do adsorvato (SILVA et al., 2019).

A heterogeneidade observada na Amostra 02 pode estar relacionada a uma possível presença de diferentes fases minerais no material adsorvente, resultando em variações nas características químicas e físicas das superfícies disponíveis para

adsorção (ARAÚJO et al., 2018). Além disso, variações na composição dos poros e na distribuição de cargas elétricas podem influenciar diretamente os valores de KF e n, tornando a adsorção de fósforo menos previsível e dependente da especificidade dos locais de adsorção (ARAÚJO et al., 2018).

Outro fator que pode explicar a ampla variação nos valores de KF e n da Amostra 02 é a possibilidade de interações competitivas entre diferentes compostos presentes na matriz do material. Em sistemas heterogêneos, outros íons ou moléculas podem competir com o fósforo pelos sítios de adsorção, alterando a capacidade de retenção e tornando o processo menos eficiente (ARAÚJO et al., 2018). Dependendo da composição química do meio, certos componentes podem se ligar preferencialmente à superfície do adsorvente, deslocando o fósforo e reduzindo sua adsorção (ARAÚJO et al., 2018).

Os resultados do modelo de Freundlich reforçam a importância de considerar a heterogeneidade dos materiais ao estudar processos de adsorção. A variabilidade nos valores de KF e n sugere que diferentes mecanismos podem estar influenciando a adsorção de fósforo em cada amostra, tornando essencial a caracterização detalhada dos materiais antes de sua aplicação em remediação ambiental ou controle de poluição (ARAÚJO et al., 2018). Compreender essas diferenças é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que otimizem a adsorção e garantam um uso mais eficiente dos adsorventes (CORNÉLIO, 2023).

Diante dessas observações, estudos complementares podem ajudar a identificar os fatores específicos que contribuem para a heterogeneidade da adsorção na Amostra 02. Experimentos adicionais, como análises de microscopia eletrônica e espectroscopia química, poderiam fornecer mais detalhes sobre a composição superficial do material e sobre possíveis interações entre o fósforo e os sítios de adsorção (CORNÉLIO, 2023). Dessa forma, seria possível aprimorar o entendimento dos mecanismos envolvidos e potencialmente melhorar a eficiência dos processos de adsorção para aplicações futuras.

O modelo de Temkin é uma abordagem matemática para descrever a adsorção em superfícies sólidas, considerando as interações químicas entre o adsorvente e o adsorbato (LIMA, 2017). Diferente dos modelos de Langmuir e Freundlich, o modelo de Temkin pressupõe que a energia de adsorção diminui linearmente à medida que os sítios de adsorção são ocupados, devido às interações entre as moléculas adsorvidas (FERNANDES, 2023). Esse modelo é particularmente

útil para avaliar sistemas em que há influência significativa de fatores termodinâmicos no processo de adsorção (FERNANDES, 2023).

Nos dados analisados (Tabela 2), o parâmetro A apresenta uma variação extrema entre as amostras, indo de valores pequenos a números extremamente elevados (FERNANDES, 2023). Isso sugere que as interações entre o fósforo e o adsorvente não são homogêneas e podem ser influenciadas por múltiplos fatores, incluindo a composição mineralógica dos materiais, o pH da solução, a presença de outras substâncias competitivas e a estrutura física do adsorvente (SENA, 2019). Valores elevados de A indicam interações fortes entre o fósforo e o adsorvente, sugerindo uma maior estabilidade na adsorção (ROGERI, 2013). Já valores menores podem estar associados a interações mais fracas, nas quais o fósforo pode ser facilmente desorvido ou redistribuído no sistema (ROGERI, 2013).

Essa ampla variação no parâmetro A pode estar relacionada a diferenças nas propriedades químicas e físicas dos materiais analisados. Em alguns casos, superfícies com alta densidade de grupos funcionais ativos, como óxidos de ferro e alumínio, tendem a apresentar valores elevados de A, pois esses compostos oferecem locais de ligação fortes para o fósforo (DÁVILA, 2016). Em contrapartida, materiais com menor disponibilidade desses grupos podem apresentar valores reduzidos, refletindo interações mais fracas e menos eficientes na retenção de fósforo (LIBERALESSO et al., 2018).

Outro aspecto relevante é que a variação extrema de A pode indicar a presença de múltiplos mecanismos de adsorção atuando simultaneamente no sistema (ROGERI, 2013). Em certos materiais, a adsorção pode ser controlada por interações eletrostáticas, formação de complexos químicos ou processos de troca iônica, resultando em diferenças significativas nos valores de A (ROGERI, 2013). Essa complexidade nas interações químicas reforça a necessidade de uma análise mais aprofundada para entender os fatores que governam a adsorção de fósforo em cada amostra (CORNÉLIO, 2023).

Além da influência da composição mineralógica, fatores ambientais como temperatura, concentração inicial de fósforo e presença de outras moléculas no meio podem impactar os valores de A (ROGERI, 2013). O modelo de Temkin considera o efeito da temperatura sobre a energia de adsorção, o que pode ser um fator determinante para as variações observadas (CHU, 2021). Em condições em que a temperatura afeta a mobilidade das moléculas de fósforo, a interação com o

adsorvente pode se tornar mais forte ou mais fraca, resultando em variações no parâmetro A (ROGERI, 2013).

A interpretação dos resultados do modelo de Temkin deve ser feita com cautela, pois a ampla variação observada pode indicar que diferentes amostras possuem características únicas que influenciam diretamente sua capacidade de adsorção (SCHMITZHAUS, 2020). Para obter um melhor entendimento dessas interações, seria interessante complementar a análise com estudos espectroscópicos e experimentos em diferentes condições ambientais (PRIMO et al., 2011). Além disso, testar modelos alternativos de adsorção pode ajudar a confirmar quais fatores desempenham papéis-chave na retenção de fósforo (CORNÉLIO, 2023).

Compreender a complexidade das interações entre o adsorvente e o fósforo é essencial para otimizar processos de remediação ambiental e melhorar o desempenho de materiais adsorventes em diversas aplicações (DÁVILA, 2016). A análise detalhada do modelo de Temkin oferece insights valiosos sobre a dinâmica da adsorção e permite identificar estratégias para aprimorar a eficiência dos sistemas de retenção de fósforo (SCHMITZHAUS, 2020).

Os valores negativos observados nos parâmetros das isotermas (Tabela 2) de adsorção indicam aspectos específicos das interações entre o fósforo e os solos da Amazônia Meridional (SILVA et al., 2019). No modelo BET, o parâmetro Cb, que está relacionado à energia de adsorção, apresentou valores negativos, o que sugere desafios na adaptação desse modelo às características das amostras (SILVA et al., 2019). Isso pode ocorrer quando há baixa afinidade entre os sítios de adsorção e o fósforo, ou quando interações secundárias, como complexação ou troca iônica, influenciam a retenção do nutriente (SILVA et al., 2019).

Nos modelos de Langmuir e Freundlich, a presença de valores negativos para determinados coeficientes pode indicar que a adsorção ocorre sob condições em que a energia de ligação do fósforo ao solo não segue um padrão homogêneo, resultando em um ajuste estatístico desfavorável (ARAÚJO et al., 2018). Esses valores podem ser reflexo de uma distribuição irregular de sítios de adsorção ou da presença de fases minerais com baixa capacidade de retenção (ARAÚJO et al., 2018).

Os valores negativos das isotermas não significam necessariamente erro, mas podem indicar limitações do modelo para descrever a complexidade da interação solo-fósforo (SILVA et al., 2019). Essa informação é útil para a escolha de abordagens alternativas na modelagem da adsorção, permitindo uma interpretação mais refinada

dos processos envolvidos na retenção do fósforo nos solos avaliados (SILVA et al., 2019).

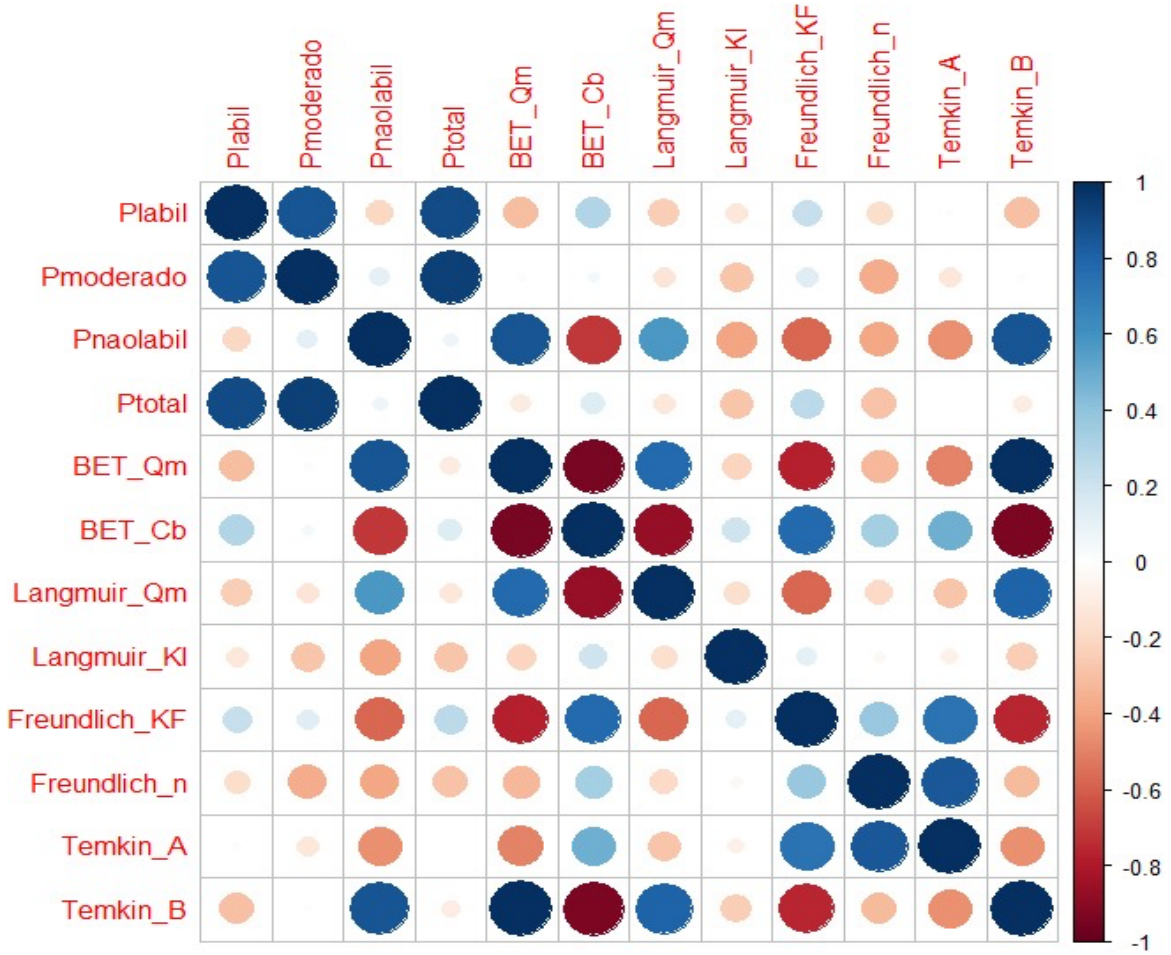

Figura 2. Análise de correlação entre os parâmetros das isotermas (ex.: Q_m, *Cb*, Q_m, K_l, K_F, *n*, *A*, *B*, *Plábil, Pnãolábil, Pmoderado* e *Ptotal)*, destacando como os modelos se inter-relacionam.

A disposição das variáveis inclui fósforo em diferentes formas ("Plabil," "Pmoderado," "Pnaolabil," "Ptotal") e os parâmetros das isotermas BET, Langmuir, Freundlich e Temkin, proporcionando uma visão abrangente sobre as interações entre esses fatores. A matriz de correlação (Figura 2) pode revelar, por exemplo, se o fósforo em sua forma mais lábil (Plabil) tem uma relação direta com os parâmetros de adsorção dos modelos de BET ou Langmuir (SILVA et al., 2019). Se houver uma correlação positiva forte, isso pode sugerir que amostras com altos valores de Plabil possuem maior capacidade de adsorção, ou que determinadas superfícies favorecem essa retenção (CORNÉLIO, 2023). Por outro lado, a presença de correlações negativas entre Pnaolabil e os parâmetros de adsorção pode indicar que fósforo em

formas menos disponíveis possui um comportamento distinto nesses modelos (CORNÉLIO, 2023).

Além de ser útil na interpretação dos dados experimentais, a matriz de correlação pode ter implicações práticas na previsão da adsorção de fósforo em diferentes condições ambientais (CORNÉLIO, 2023). A identificação de padrões pode ajudar na escolha de materiais adsorventes mais eficientes ou na otimização de processos para a retenção do fósforo em solos e efluentes (MATTOS et al., 2016). Dessa forma, a abordagem visual e estatística fornece um panorama abrangente sobre as interações entre os parâmetros estudados, contribuindo para uma análise mais detalhada dos mecanismos envolvidos no processo de adsorção (MATTOS et al., 2016).

Coeficientes variam de -1 a 1, sendo que valores próximos de 1 indicam correlações positivas fortes, ou seja, quando um parâmetro aumenta, o outro também tende a aumentar (MATTOS et al., 2016). Já valores próximos de -1 sinalizam correlações negativas fortes, onde o aumento de uma variável está associado à diminuição da outra (MATTOS et al., 2016). Correlações próximas de 0 sugerem que não há uma relação clara entre os parâmetros analisados (MATTOS et al., 2016).

Ao observar esses coeficientes dentro da matriz de correlação, é possível identificar padrões significativos entre as isotermas BET, Langmuir, Freundlich e Temkin e as formas de fósforo como Plabil, Pmoderado, Pnaolabil e Ptotal (ROGERI, 2013). Por exemplo, se houver uma correlação positiva alta entre Plabil e os parâmetros da isoterma de Langmuir, isso pode indicar que essa forma de fósforo possui forte afinidade com superfícies adsorventes, favorecendo a retenção em determinados materiais (FARIAS et al., 2009). Por outro lado, uma correlação negativa entre Pnaolabil e BET_Qm pode sugerir que fósforo em formas menos disponíveis não interage bem com os sítios de adsorção descritos pelo modelo BET (DABROWSKI, 2001).

Na Figura 3 é possível identificar padrões de interação entre as formas de fósforo presentes no ambiente Plabil, Pmoderado, Pnaolabil e Ptotal e os parâmetros das isotermas de adsorção BET, Langmuir, Freundlich e Temkin. Esses modelos fornecem diferentes abordagens para descrever a retenção de fósforo em superfícies adsorventes, e a matriz de correlação ajuda a entender quais são as influências predominantes entre essas variáveis (ARAÚJO et al., 2018).

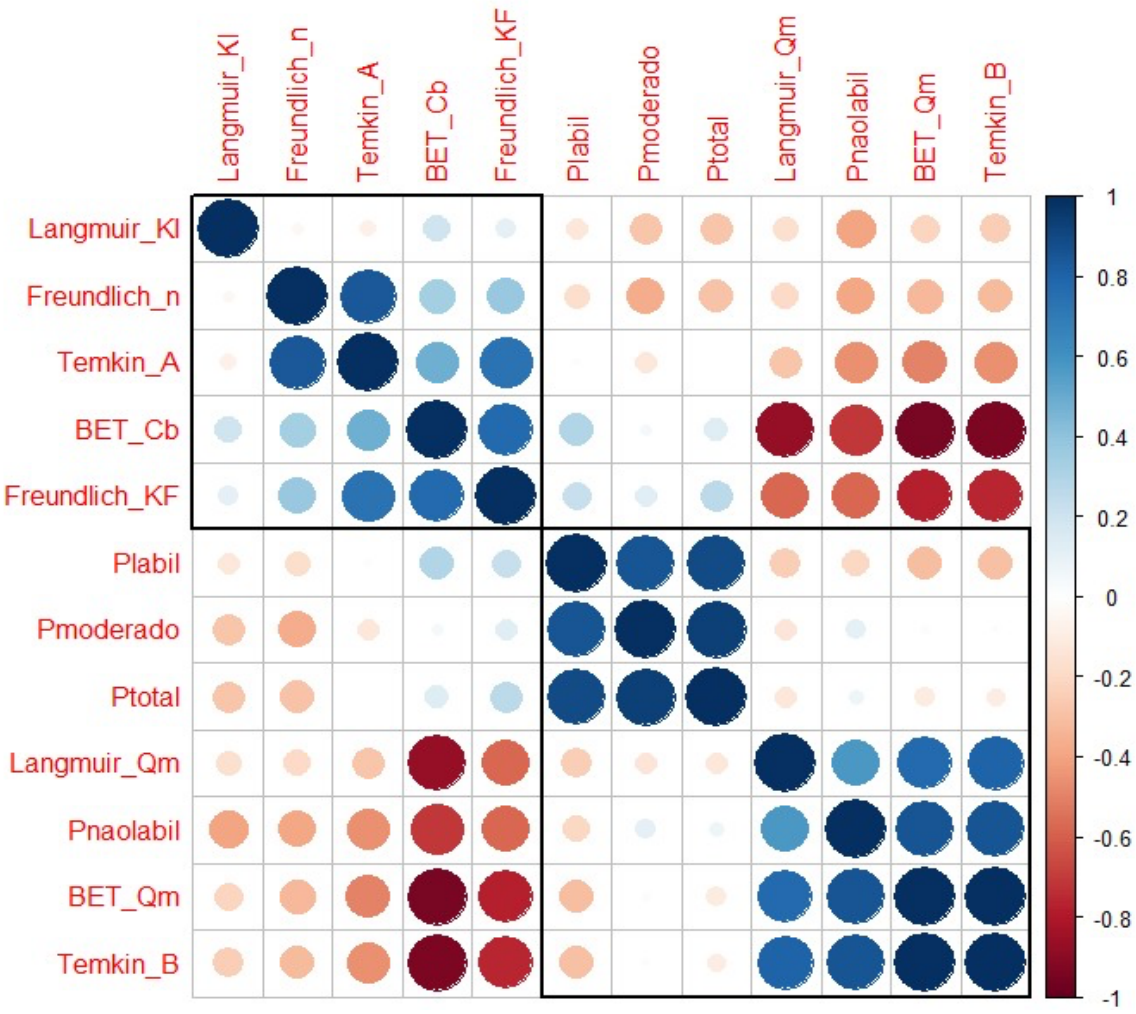

Figura 3. Parâmetros comparativos dentro de cada modelo (ex.: Q_m, *Cb*, Q_m, K_l, K_F, *n*, *A*, *B*, *Plábil*, *Pnãolábil*, *Pmoderado* e *Ptotal)* e entre modelos (ex.: Q_m, *Cb*, Q_m, K_l, K_F, *n*, *A*, *B*, *Plábil*, *Pnãolábil*, *Pmoderado* e *Ptotal)*.

A forte correlação positiva entre Plabil e Langmuir_Qm pode sugerir que o fósforo mais disponível no sistema é altamente retido pelos sítios ativos de adsorção descritos pelo modelo de Langmuir (FARIAS et al., 2009).

Por outro lado, correlações negativas podem indicar um comportamento oposto, onde um aumento em um parâmetro resulta na redução de outro. Se Pnaolabil apresentar uma correlação negativa com BET_Qm, isso pode significar que fósforo em formas menos disponíveis possui menos afinidade pelos locais de adsorção previstos pelo modelo BET (DABROWSKI, 2001). Dessa maneira, a matriz de correlação se torna uma ferramenta valiosa para estabelecer relações estatísticas

entre as variáveis e interpretar os mecanismos envolvidos na adsorção do fósforo (DABROWSKI, 2001).

O grande marcador associado a uma correlação positiva sugere que há uma relação direta forte entre as variáveis (ARAÚJO, 2018). Na Figura 3 Temkin_A tem círculos grandes e vermelhos ao lado de Pmoderado, isso pode indicar que a adsorção de fósforo moderadamente disponível é influenciada pelos fatores termodinâmicos considerados pelo modelo de Temkin (SENA, 2019). Por outro lado, a presença de marcadores menores pode apontar que certas interações são menos significativas, indicando relações mais fracas entre os parâmetros estudados (SAID, 2018).

Os coeficientes entre Langmuir_KI e Plabil forem significativamente altos e positivos, indicando que a afinidade entre os sítios de adsorção e o fósforo mais disponível é elevada, favorecendo sua retenção (LEANDRO-SILVA et al., 2020). Em contraste, os valores de Freundlich_KF apresentarem uma correlação negativa com Pnaolabil, pode-se inferir que fósforo menos disponível tem uma menor capacidade de adsorção nos materiais descritos pelo modelo de Freundlich (ARAÚJO et al., 2018).

Compreender como as diferentes formas de fósforo interagem com os parâmetros das isotermas possibilita a escolha de materiais adsorventes mais eficientes e a previsão do comportamento do fósforo em diferentes condições ambientais (MATTOS et al., 2016).

Além disso, uma análise mais aprofundada dos coeficientes pode auxiliar na formulação de hipóteses sobre os mecanismos que governam a adsorção de fósforo (HABEEB et al., 2023). Estudos complementares, como experimentos em diferentes condições de temperatura e pH, podem ajudar a validar essas correlações e refinar a compreensão dos processos de adsorção (HABEEB et al., 2023). Dessa maneira, a matriz de correlação não apenas fornece um panorama estatístico das interações entre variáveis, mas também serve como uma ferramenta fundamental para direcionar pesquisas e aplicações tecnológicas voltadas para a eficiência na retenção de fósforo (HABEEB et al., 2023).

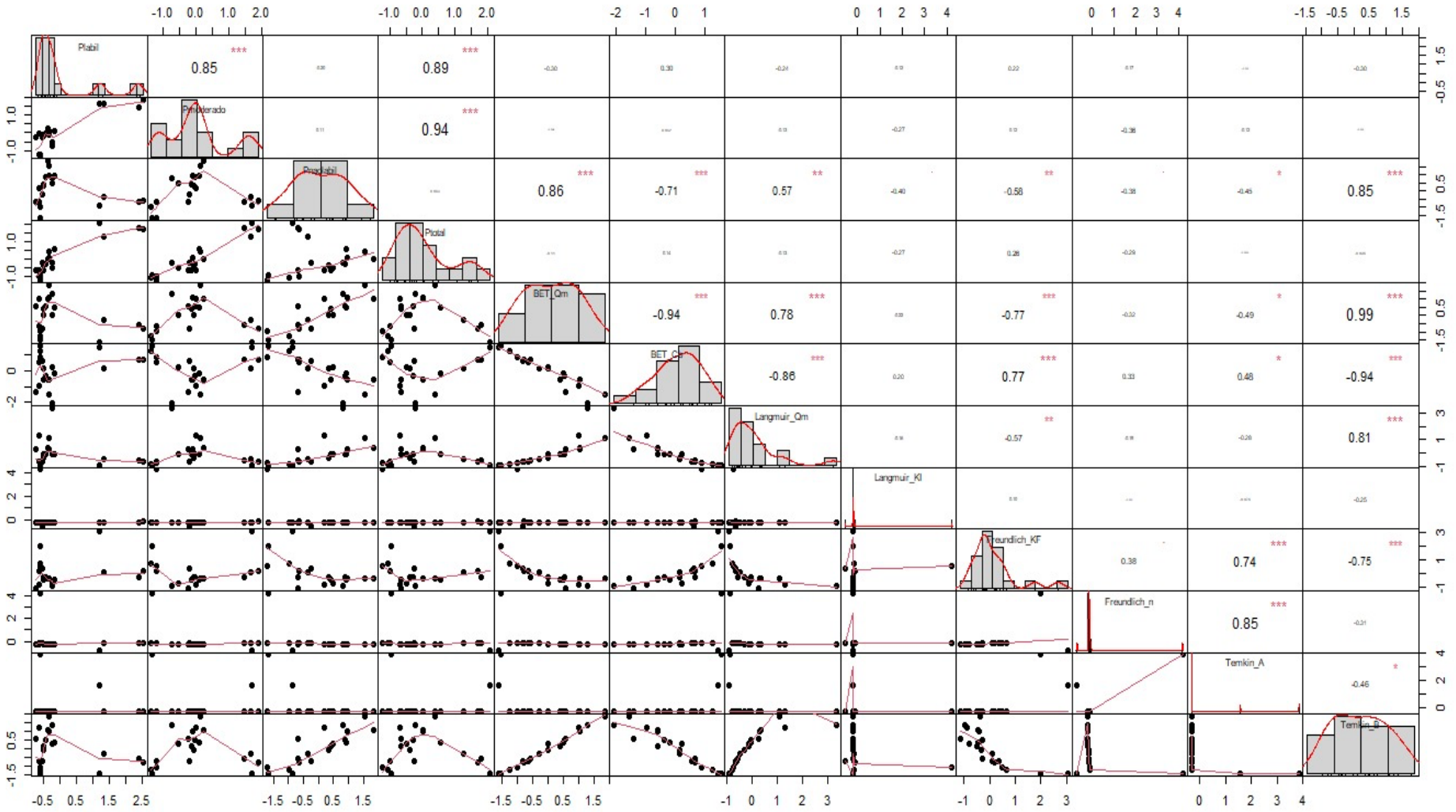

Figura 4. Matriz de Correlação entre Parâmetros de Modelos de Isoterma de Adsorção. **Símbolos:** ***: Correlação muito significativa ($p < 0.001$). **: Correlação significativa ($p < 0.01$). *: Correlação pouco significativa ($p < 0.05$). (Em branco): Correlação não significativa. **Números:** Próximo de 1: Correlação positiva forte. Próximo de -1: Correlação negativa forte. Próximo de 0: Correlação fraca.

A matriz de correlação apresentada no gráfico visual é uma ferramenta fundamental para compreender as relações entre múltiplas variáveis que influenciam a adsorção de fósforo (Figura 4). A correlação positiva forte entre Ptotal e Langmuir_Qm pode indicar que essa forma de fósforo é altamente adsorvida pelos sítios previstos pelo modelo de Langmuir, reforçando a ideia de que a adsorção ocorre em superfícies homogêneas com máxima capacidade de retenção (ARAÚJO et al., 2018). Por outro lado, uma correlação negativa entre Ptotal e BET_Cb pode sugerir que essa forma de fósforo não se encaixa bem no modelo BET, que pressupõe a adsorção em múltiplas camadas (ARAÚJO et al., 2018).

A presença de valores como 0,85, 0,94 e -0,71 na matriz evidencia padrões interessantes entre os parâmetros das isotermas e as formas de fósforo. (CORNÉLIO, 2023). Por exemplo, um coeficiente de 0,85 entre Ptotal e Freundlich_KF pode indicar que essa forma de fósforo apresenta uma adsorção favorável em superfícies heterogêneas, conforme descrito pelo modelo de Freundlich (ARAÚJO, 2018). Já um coeficiente de -0,71 entre Temkin_A e Pnaolabil pode sugerir que fósforo menos disponível possui interações menos intensas com os materiais adsorventes regidos pelo modelo de Temkin (SENA, 2019).

Compreender como os diferentes tipos de fósforo interagem com os parâmetros das isotermas possibilita o desenvolvimento de estratégias mais eficientes para remediação e aproveitamento sustentável desse nutriente, essas relações auxilia na escolha dos modelos mais adequados para descrever a adsorção de fósforo em diferentes condições ambientais (CORNÉLIO, 2023).

A linearização das isotermas de adsorção é uma técnica fundamental para interpretar os dados experimentais e ajustar modelos matemáticos às interações entre fósforo e os solos. Os modelos de Langmuir, BET, Freundlich e Temkin, oferecem perspectivas distintas sobre a retenção de fósforo (FARIAS et al., 2009). A aplicação da linearização permite identificar a adequação desses modelos aos dados obtidos, facilitando a comparação entre coeficientes e parâmetros de adsorção (FARIAS et al., 2009).

A linearização do modelo de Langmuir, por exemplo, transforma a equação original em uma relação linear entre a concentração do adsorvato e a quantidade adsorvida, permitindo a obtenção do coeficiente de adsorção (Kl) e da capacidade máxima de retenção (Qm) (FARIAS et al., 2009). Esse procedimento é essencial para

verificar a validade da hipótese de adsorção em monocamada e determinar se há uma boa correlação entre os dados e o modelo (FARIAS et al., 2009).

Já no caso do modelo BET, a linearização é usada para avaliar a formação de multicamadas e compreender melhor o parâmetro Cb, que está relacionado à energia de adsorção (FARIAS et al., 2009). Como observado na dissertação, alguns valores negativos para Cb indicam desafios na adaptação do modelo, tornando a linearização uma ferramenta importante para detectar possíveis desvios dos pressupostos teóricos (FARIAS et al., 2009).

No modelo de Freundlich, a linearização permite ajustar os coeficientes KF e n, que indicam a capacidade de adsorção e a heterogeneidade dos sítios de adsorção (FARIAS et al., 2009). A equação linearizada facilita a interpretação dos resultados, destacando a influência da composição mineralógica e da disponibilidade dos sítios de adsorção (FARIAS et al., 2009).

Por fim, no modelo de Temkin, a linearização auxilia na avaliação da variação da energia de adsorção ao longo da superfície do solo (FARIAS et al., 2009). Os parâmetros A e B podem ser ajustados de forma mais clara, permitindo uma melhor compreensão das interações químicas que afetam a adsorção do fósforo (FARIAS et al., 2009). A linearização desempenha um papel central na análise dos dados isotérmicos, permitindo a validação e a comparação dos modelos utilizados.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, conclui-se que a adsorção de fósforo nos solos da Amazônia Meridional varia significativamente conforme a mineralogia, textura e disponibilidade de sítios ativos. Os modelos isotérmicos demonstraram diferentes níveis de eficiência na descrição do comportamento do fósforo no solo.

O modelo de Langmuir mostrou boa correlação com o fósforo lábil, indicando que esse modelo pode ser eficaz para prever a capacidade máxima de adsorção em superfícies homogêneas. O modelo BET apresentou limitações devido à influência de fatores estruturais e físicos do solo, sugerindo que a adsorção ocorre predominantemente em monocamada. A isoterma de Freundlich, por sua vez, evidenciou a heterogeneidade dos sítios de adsorção, mostrando uma forte relação com frações de fósforo de disponibilidade variável. O modelo Temkin ressaltou a influência da energia de adsorção, indicando que essa abordagem pode ser útil para prever a interação do fósforo com partículas do solo em diferentes condições ambientais.

A matriz de correlação mostrou relações significativas entre os parâmetros isotérmicos e as frações de fósforo, indicando que certos modelos são mais adequados para prever a retenção e mobilidade desse nutriente em sistemas naturais. As análises reforçam a necessidade de uma abordagem integrada para caracterizar a adsorção de fósforo, contribuindo para práticas de manejo mais eficazes nos agroecossistemas amazônicos.

Esses achados são relevantes para otimizar a fertilização fosfatada, melhorar a sustentabilidade do uso dos solos e orientar futuras pesquisas sobre disponibilidade e retenção de fósforo em ambientes tropicais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, C. S. T. et al**.** Elucidation of mechanism involved in adsorption of Pb (II) onto lobeira fruit (*Solanum lycocarpum*) using Langmuir, Freundlich and Temkin isotherms. **Microchemical Journal**, v. 137, p. 348-354, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.11.009>. Acesso em: 15 set. 2024.

ARAÚJO, L. S. et al. Caracterização e avaliação de fatores que determinam a remoção de microcistina-LR em carvão ativado granular produzido a partir de diferentes matérias-primas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 6, p. 1131-1142, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018177756>. Acesso em: 15 set. 2024.

AYAWEI, N.; EBELEGI, A. N.; WANKASI, D. Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. **Journal of Chemistry**, v. 2017, p. 1–11, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>. Acesso em: 06 ago. 2024.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/ja01269a023>. Acesso em: 04 fev. 2025.

CASTELLAN, G. W.; SANTOS, C. M. P. DOS; FARIA, R. DE B. **Fundamentos de físico-química**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CASTRO, D. A.; PEREIRA, D. H.; LEAL, P. V. B. Isoterma de Langmuir: considerações cinéticas e de equilíbrio. **Tchê Química**, v. 16, n. 31, p. 324-334, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.52571/ptq.v16.n31.2019.330_periodico31_pgs_324_334>.pdf. Acesso em: 02 fev. 2025.

CHU, K. H. Revisiting the Temkin isotherm: dimensional inconsistency and approximate forms. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 60, n. 35, p. 13140-13147, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01788>. Acesso em: 02 fev. 2025.

CORNÉLIO, J. P. L. **Desenvolvimento de material adsorvente a partir do resíduo da colheita do arroz (*Oryza sativa*) para a remoção de poluentes emergentes em solução aquosa**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2023. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/handle/riu/8735>. Acesso em: 02 fev. 2025.

CORTIVO, N. S. D. **Quantificação de íons metálicos nas frações TFSA, areia, silte e argila de solos no entorno do Parque Nacional do Iguaçu-PR.** 2019. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

DABROWSKI, A. Adsorption: from theory to practice. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 93, n. 1–3, p. 135–224, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8>. Acesso em: 08 fev. 2025.

DÁVILA, I. V. J. **Remoção de Vermelho Reativo 120 em solução aquosa usando hidroxicarbonatos de Mg-Al, Mg-Fe e Mg como sólidos sorventes.** 2016.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DUNNE, K. S. et al. Prediction of phosphorus sorption indices and isotherm parameters in agricultural soils using mid-infrared spectroscopy. **Geoderma**, v. 358, n. 2, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113981>. Acesso em: 11 mar. 2025

FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 3, p. 337-342, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672004000300001>. Acesso em: 11 mar. 2025.

FARIAS, D. R. et al. Fósforo em solos representativos do estado da paraíba: I-isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 623–632, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300015>. Acesso em: 24 jul. 2024.

FERNANDES, Milena Meireles. **Remoção de tetraciclina e sulfametoxazol em meio aquoso empregando a resina Amberlite XAD-7.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2023. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/33738>. Acesso em: 24 jul. 2024.

FREUNDLICH, H. M. F. Over the adsorption in solution. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 57, p. 385-471, 1906. Disponível em: https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=857464. Acesso em: 13 jul. 2024.

FREUNDLICH, H. Of the adsorption of gases. Section II. Kinetics and energetics of gas adsorption. Introductory paper to section II. Transactions of the Faraday Society, v. 28, p. 195–201, 1932. Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1932/tf/tf9322800195. Acesso em: 27 jul. 2024.

GESSNER, P. K.; HASAN, M. M. Freundlich and Langmuir Isotherms as Models for the Adsorption of Toxicants on Activated Charcoal. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 76, n. 4, p. 319–327, abr. 1987.

HABEEB, K. H.; ODHAFA, A. K. H.; KAREEM, H. H. Effect of different types and levels of phosphorous fertilizers on kinetics of phosphorous release in the soil. **Bionatura**, v. 8, n. 2, p. 1-11, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21931/RB/CSS/2023.08.02.1>. Acesso em: 25 jul. 2024.

HEMKEMEIER, C. **Qualidade do solo sob diferentes usos na Amazônia Meridional**. 2022. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Alta Floresta-MT, 2022.

HILL, C. G. An introduction to chemical engineering kinetics & reactor design. New York: Wiley, 1977.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Divisão Regional do Brasil, 2017. <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/default_div_int.shtm?c=1#> Acesso em: 24 set. 2024.

JIANG, Y. et al. Phosphorus adsorption characteristics and release risk in saline soils: a case study of Songnen Plain. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1302763>. Acesso em: 30 jan. 2025.

JOHNSON, R. D.; ARNOLD, F. H. The Temkin isotherm describes heterogeneous protein adsorption. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure and Molecular Enzymology,** v. 1247, n. 2, p. 293-297, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/0167-4838(95)00006-G >. Acesso em: 25 jul. 2024.

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, set. 1918. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/ja02242a004>. Acesso em: 24 jul. 2024.

LEANDRO-SILVA, E. et al. Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich no estudo da casca de banana como bioadsorvente de cobre (II) em meio aquoso. **Matéria**, v. 25, n. 2, p. e-12656, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1056>. Acesso em: 24 jul. 2024.

LEITE, J. N. F. et al. Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1880–1889, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016001100010>. Acesso em: 02 fev. 2025.

LIBERALESSO, T. et al. **Telhados verdes extensivos: influência da composição do substrato na retenção hídrica e no desenvolvimento da vegetação.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/19104>. Acesso em: 30 jan. 2025.

LIMA, S. N. P. **Caracterização das fibras de buriti e sua aplicabilidade como adsorvente de metais e corantes.** 2017. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11612/435>. Acesso em: 02 fev. 2025.

LUO, D. Phosphorus adsorption by functionalized biochar: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 1, p. 497-524, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01519-5>. Acesso em: 18 nov. 2024.

TEMKIN, M. J.; PYZHEV, V. Recent modifications to Langmuir isotherms. **Acta Physical Chemistry**, v. 12, p. 217–222, 1940.

MATTOS, A. G. et al. Sorção de Cd e Pb nos solos da região do Médio Rio Paraíba-RJ, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 1, p. 01-12, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160001. Acesso em: 16 nov. 2024.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. Disponível em: https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=572348&biblioteca=va

zio&busca=(autoria:%22NOVAIS,%20R.%20F%22)&qFacets=(autoria:%22NOVAIS,%20R.%20F%22)&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1. Acesso em: 11 mar. 2025.

OSBORNE, J. W.; WATERS, K. Four assumptions of multiple regression that researchers should always test. **Practical Assessment, Research, and Evaluation**, v.7, n.20, p.1-9, 2002.

PEARSON, K. Notes on the theory of the algebraical solution of the problem of the most probable double value. **Philosophical Magazine**, v. 39, n. 229, p. 163-169, 1895.

PELUCO, R. G. et al. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 3, p. 259–266, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300010. Acesso em: 11 mar. 2025.

PRIMO, D. C.; MENEZES, R. C.; SILVA, T. O. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, v. 7, n. 5, 2011. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/342>. Acesso em: 11 mar. 2025.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3586105>. Acesso em: 04 out. 2024.

RABECINI, J. A. F. **Levantamento dos solos do município de Alta Floresta – MT**. 2009. Monografia (Graduação) - Universidade do Estado de Mato Grosso, Alta Floresta - MT, 2009.

ROGERI, D. A. **Uso do índice P-remanescente como indicador do poder tampão de fósforos em solos.** 2013. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SÁ, I. B.; PETRERE, V. G.; TAURA, T. A. **Argissolos**. Embrapa, 2021. Disponível em:<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/solos/argissolos>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SAID, K. A. M. et al**.** Application of Freundlich and Temkin isotherm to study the removal of Pb (II) via adsorption on activated carbon equipped polysulfone membrane. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, n. 3.18, p. 91-93, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.18.16683>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, H. P.; TOMM, G. O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, RS, v. 33, n. 3, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000300013>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SCHMITZHAUS, T. E. **Líquidos iônicos como inibidores de corrosão**: desempenho e mecanismos de atuação. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SENA, M. M. **Adsorção individual, competitiva e estudos cinéticos e termodinâmicos de cobre, chumbo e níquel em solos de uma topossequência do Cerrado.** 2019. Tese (Doutorado em Química) – Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2019.

SILVA, M. R. L. **Estudo da adsorção dos corantes sintéticos azul de metileno e vermelho do congo e do antibiótico tetraciclina utilizando o argilomineral haloisita.** 2024. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/58985>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. ed. Oxford University Press: Nova Iorque, 2008.

TARIFA, J. R. **Clima**: análise e representação cartográfica. Entrelinhas: Cuiabá, 2011.