

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL -PPGATR

MARCELO TAVARES NUNES

CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO, DESSORÇÃO E FRAÇÕES INORGÂNICAS
DE FÓSFORO EM SOLOS DO AMAZONAS

Manaus

2024

MARCELO TAVARES NUNES

CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO, DESSORÇÃO E FRAÇÕES INORGÂNICAS
DE FÓSFORO EM SOLOS DO AMAZONAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agronomia Tropical da Faculdade de Ciências Agrárias
– UFAM, como requisito para à obtenção do título de
doutor em Agronomia Tropical, área de concentração
Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. José Zilton Lopes Santos

Manaus

2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

N972c Nunes, Marcelo Tavares
Capacidade máxima de adsorção, dessorção e frações inorgânicas de fósforo em solos do Amazonas / Marcelo Tavares Nunes . 2024
76 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: José Zilton Lopes Santos
Tese (Doutorado em Agronomia Tropical) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Latossolos. 2. Mineralogia. 3. Fixação de P . 4. Isoterma de Langmuir. 5. Fracionamento de P. I. Santos, José Zilton Lopes. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

MARCELO TAVARES NUNES

CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO, DESSORÇÃO E FRAÇÕES INORGÂNICAS
DE FÓSFORO EM SOLOS DO AMAZONAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Faculdade de Ciências Agrárias/UFAM, como requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Agronomia Tropical, área de concentração em Produção Vegetal.

Aprovada em 30 de setembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



JOSE ZILTON LOPES SANTOS
Data: 30/10/2024 12:10:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Zilton Lopes Santos PPGATR/UFAM
(Presidente)

Documento assinado digitalmente



GENILSON PEREIRA SANTANA
Data: 04/11/2024 17:08:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Genilson Pereira Santana Instituto de
Ciências Exatas - ICE/UFAM

Documento assinado digitalmente



JOSINALDO LOPES ARAUJO ROCHA
Data: 31/10/2024 15:43:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Josinaldo Lopes Araújo Rocha Universidade
Federal de Campina Grande - UFCG

Documento assinado digitalmente



MARIA DO ROSARIO LOBATO RODRIGUES
Data: 30/10/2024 12:47:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Maria do Rosário Lobato Rodrigues Embrapa
Amazônia Ocidental

Documento assinado digitalmente



MATHEUS DA SILVA FERREIRA
Data: 30/10/2024 20:15:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Matheus da Silva Ferreira - Instituto Brasileiro do
Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis -
IBAMA

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Marilda Tavares dos Santos, que nunca mediu esforços para que eu pudesse trilhar meu caminho em busca de conhecimento. Com seu amor incondicional, dedicação e sacrifícios, ensinou-me o valor da perseverança e da honestidade. Cada conquista minha é também sua, pois sem seu apoio e incentivo, esta jornada não teria sido possível.

Aos meus tios Ladimir Tavares dos Santos (in memoriam), Benedito Tavares dos Santos (in memoriam) e Raimunda Tavares dos Santos, por seu apoio incondicional que foi essencial em minha trajetória, seus ensinamentos estarão sempre presentes na minha caminhada.

Aos meus filhos, Thalles Marcelo e Thauã Gael, que me inspiram a seguir em frente com amor, coragem e esperança a cada amanhecer. São minha maior motivação, a razão da minha vida e o amor que me fortalece. Que esta conquista seja um exemplo de dedicação e perseverança. Amo vocês infinitamente.

À minha esposa, Tassia Michelli, que esteve ao meu lado em cada passo desta jornada, oferecendo apoio, amor e força nos momentos mais difíceis. Sou eternamente grato por tudo que fez e faz por mim.

Ao meu pai, José Janilson Valeriano Nunes, pelos ensinamentos, conselhos e amizade.

*Quem é sábio procura aprender, mas os tolos
estão satisfeitos com a sua própria ignorância
(Provérbios 15:14)*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por conceder força nos dias difíceis, sabedoria para seguir em frente, serenidade para superar os desafios e pelas bênçãos de todos os dias.

À Universidade Federal do Amazonas, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical pela oportunidade em desenvolver este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do estado do Amazonas pela concessão do auxílio financeiro ao PPGATR, por meio do Programa Posgrad/FAPEAM.

Ao Dr. José Zilton Lopes Santos, minha sincera gratidão pela orientação, paciência e dedicação ao longo desta jornada. Seu conhecimento, conselhos valiosos e apoio constante foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sou imensamente grato por todo o aprendizado, amizade e pela confiança depositada em mim.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

À Tainah Manuela Benlolo Barbosa por toda a confiança, amizade, generosidade e contribuição para a realização desta pesquisa.

Aos amigos dos laboratórios de Nutrição Mineral de Plantas (Alan Ferreira, João Cavalcante, João Paulo, Lilian Clara e Patrik Monteiro) e Mineralogia do Solo (Wildson Benedito).

À minha família e amigos, por tudo que representam na minha vida.

RESUMO GERAL

Compreender as dinâmicas de adsorção e dessorção do fósforo (P) e o fracionamento do P inorgânico em alguns solos do Amazonas é essencial para fundamentar recomendações de adubações fosfatadas, otimizando o uso de fertilizantes e promovendo a fertilidade do solo. Este estudo teve como objetivos: 1) caracterizar diferentes Latossolos predominantes no trópico úmido quanto a capacidade máxima de adsorção (CMAP) e dessorção de P; 2) avaliar o efeito do tempo de contato fosfato-solo nas frações inorgânicas de P e na disponibilidade de P (extrator resina) em Latossolos predominantes no trópico úmido. Foram coletadas amostras de dez Latossolos Amarelos distróficos, em seis municípios do Estado do Amazonas. Posteriormente, foram realizados dois experimentos, no experimento 1, avaliamos a capacidade máxima de adsorção de P com ajuste dos dados à isoterma de Langmuir e determinamos a CMAP, energia de adsorção (EA) e fator capacidade máxima de P (FCP-máx). No experimento 2 foi determinada a extração e determinação das frações inorgânicas de P foram realizadas em solos agrupados conforme semelhança do fósforo remanescente (P-rem). Os resultados da CMAP revelam uma variação significativa entre os solos avaliados, com intervalo de 38,2 até 1.428,57 mg dm⁻³, influenciando diretamente na energia de adsorção e o fator capacidade de P máximo (FCP máx). A CMAP nos Latossolos varia em função da mineralogia, do teor de argila e do P remanescente (P-rem), influenciando diretamente a dinâmica do P no solo. A relação entre CMAP e energia de adsorção (EA) reflete a força de retenção do P, impactando sua disponibilidade para as plantas. Não houve efeito significativo ($P < 0,10$) do fator tempo de contato fosfato-solo sobre as frações Pi (P-Fe, P-Al e P-Ca). O P adicionado ao solo tem como principal destino a fração P-Fe, seguida por uma pequena parte na fração P-Ca e apenas uma baixíssima quantidade fica associada a fração P-Al. Os resultados reforçam a importância de estratégias de manejo baseadas nas características de adsorção e dessorção do P, contribuindo para uma recomendação mais adequada de fertilizantes fosfatados, visando uma recomendação mais sustentabilidade.

Palavras-Chave: Latossolos, mineralogia, fixação de P, isoterma de Langmuir, fracionamento de P.

ABSTRACT

Understanding the dynamics of phosphorus (P) adsorption and desorption, as well as the fractionation of inorganic P in certain soils of the Amazon, is essential for supporting phosphate fertilization recommendations, optimizing fertilizer use, and enhancing soil fertility. This study aimed to: (1) characterize different Latosols predominant in the humid tropics concerning their maximum adsorption capacity (CMAP) and P desorption potential; and (2) evaluate the effect of phosphate-soil contact time on inorganic P fractions and P availability (resin extractor) in Latosols dominant in the humid tropics. Soil samples were collected from ten dystrophic Yellow Latosols across six municipalities in the state of Amazonas. Two experiments were then conducted. In Experiment 1, we assessed the maximum P adsorption capacity by fitting the data to the Langmuir isotherm and determined CMAP, adsorption energy (EA), and the maximum P buffering capacity (FCP-max). In Experiment 2, the extraction and determination of inorganic P fractions were performed on soils grouped based on their similarity in remaining phosphorus (P-rem). The CMAP results revealed significant variation among the evaluated soils, ranging from 38.2 to 1,428.57 mg dm⁻³, directly influencing adsorption energy and the maximum phosphorus buffering capacity (FCP-max). The CMAP in Latosols varies as a function of mineralogy, clay content, and remaining phosphorus (P-rem), directly affecting P dynamics in the soil. The relationship between CMAP and adsorption energy (EA) reflects the strength of P retention, impacting its availability to plants. No significant effect ($P < 0.10$) of phosphate-soil contact time was observed on the inorganic P fractions (P-Fe, P-Al, and P-Ca). The added P was primarily retained in the P-Fe fraction, followed by a minor portion in the P-Ca fraction, with only a negligible amount associated with the P-Al fraction. These findings reinforce the importance of management strategies based on P adsorption and desorption characteristics, contributing to more precise phosphate fertilizer recommendations and promoting more sustainable fertilization practices.

Keywords: Oxisols, mineralogy, P fixation, Langmuir isotherm, P fractionation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1. Localização das áreas de estudo e pontos de coleta das amostras de solo.....25
- Figura 2. Ajuste da adsorção de P pelo modelo de Langmuir para a quantidade de P adsorvida em função do conteúdo de P na solução de equilíbrio ($n = 3$) em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) (D) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4) (E) do estado do Amazonas. 32
- Figura 3. Ajuste da adsorção de P pelo modelo de Langmuir para a quantidade de P adsorvida em função do conteúdo de P na solução de equilíbrio ($n = 3$) em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4), e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1) (E) do estado do Amazonas. 34
- Figura 4. Ajuste da isoterma de adsorção de Langmuir na forma linear em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) (D) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4) (E) do estado do Amazonas. 35
- Figura 5. Ajuste da isoterma de adsorção de Langmuir na forma linear em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4), e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1) (E) do estado do Amazonas. 36
- Figura 6. Ajuste da curva de dessorção de fósforo (P) em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) (D) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4) (E) do estado do Amazonas. 38
- Figura 7. Ajuste da curva de dessorção de fósforo (P) em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4) (D), e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1) (E) do estado do Amazonas. 39
- Figura 8. Relação entre fósforo (P) adsorvido e P no sobrenadante em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) (D) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4) (E) do estado do Amazonas.

Coeficientes linear (b1) das equações de 2º grau expressam o índice tampão de fósforo (ITP).
..... 40

Figura 9. Relação entre fósforo (P) adsorvido e P no sobrenadante em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4) (E), e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1) (E) do estado do Amazonas. Coeficientes linear (b1) das equações de 2º grau expressam o índice tampão de fósforo (ITP).
..... 41

Figura 10. Localização das áreas de estudo e pontos de coleta das amostras de solo..... 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classe textural dos solos, localização e pontos de coleta das amostras de solo.	24
Tabela 2. Atributos químicos dos solos utilizados no estudo na profundidade de 0 - 20 cm...	26
Tabela 3. Teores de goethita (Gt), hematita (Hm), relação entre Hm/(Hm + Gt), ferro extraído com ditionito (Fed), ferro extraído com oxalato (Feo), relação ferro oxalato/ferro ditionito (Feo/Fed) e granulometria dos solos do Amazonas.....	27
Tabela 4. Doses de P aplicadas nos diferentes tipos de solo para determinar a capacidade máxima adsorção de P no solo (CMAP ¹).	28
Tabela 5. Capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), energia de adsorção (EA) e fator capacidade de P máximo (FCP-máx), teor de argila e P-remanescente (P-rem).....	37
Tabela 6. Classe textural dos solos, localização e pontos de coleta das amostras de solo.	58
Tabela 7. Atributos químicos dos solos utilizados no estudo na profundidade de 0 - 20 cm...	60
Tabela 8. Teores de goethita (Gt), hematita (Hm), relação entre Hm/(Hm + Gt), ferro extraído com ditionito (Fed), ferro extraído com oxalato (Feo), relação ferro oxalato/ferro ditionito (Feo/Fed) e granulometria dos solos do Amazonas.....	61
Tabela 9. Efeito do tempo de contato fosfato-solo sobre as frações inorgânicas de fósforo (P) ligado a alumínio (P-Al), fósforo ligado a ferro (P-Fe), fósforo ligado a cálcio (P-Ca) e, fósforo disponível (P-resina) (n=4) no solo.	64
Tabela 10. Correlação entre as frações inorgânicas de fósforo ligado a alumínio (P-A), a ferro (P-Fe) e a cálcio (P-Ca) com a disponibilidade de P (P-resina) em LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4.	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
2	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17
3	ESQUEMA GERAL DA TESE	19
	CAPÍTULO 1: CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS PREDOMINANTES NO TRÓPICO ÚMIDO	20
1	INTRODUÇÃO	22
2	MATERIAIS E MÉTODOS	24
2.1	Caracterização geral da área de estudo	24
2.2	Procedimentos específicos	25
2.2.1	Coleta e preparação das amostras de solo	25
2.2.2	Caracterização química, granulométrica e mineralógica dos solos	25
2.2.3	Determinação do fósforo remanescente	27
2.2.4	Determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)	27
2.2.5	Determinação da dessorção de fósforo	28
2.3	Modelagem e análise da adsorção e dessorção de P	28
3	RESULTADOS	30
3.1	Atributos químicos e mineralógicos do solo	30
3.2	Isotermas de adsorção de fósforo (P)	31
3.3	Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), energia de adsorção e fator capacidade máxima de P (FCP-máx)	36
3.4	Dessorção de fósforo (P) no solo	37
4	DISCUSSÃO	42
4.1	Atributos químicos e mineralógicos do solo	42
4.2	Isoterma de adsorção	43
4.3	Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), energia de adsorção e fator capacidade máxima de P (FCP-máx)	44
4.4	Dessorção de fósforo (P) no solo	47
5	CONCLUSÃO	49
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	50
	CAPÍTULO 2: FRACIONAMENTO DE FÓSFORO INORGÂNICO DE EM LATOSSOLOS PREDOMINANTES NO TRÓPICO ÚMIDO	54
1	INTRODUÇÃO	56

2	MATERIAIS E MÉTODOS	58
2.1	Caracterização geral da área de estudo	58
2.2	Tratamentos e delineamento experimental	59
2.3	Procedimentos específicos	60
2.3.1	Coleta e preparação das amostras de solo	60
2.3.2	Caracterização química, granulométrica e mineralógica dos solos	60
2.3.3	Correção do solo e aplicação dos tratamentos e condução do experimento	61
2.3.4	Avaliação dos experimentos e variáveis analisadas	62
2.3.5	Extração das frações inorgânicas de fósforo	62
2.4	Análise estatística dos dados	63
3	RESULTADOS	64
3.1	Fracionamento das formas inorgânicas de P no solo	64
4	DISCUSSÃO	67
4.1	Fracionamento das formas inorgânicas de P no solo	67
5	CONCLUSÃO	72
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
4	CONSIDERAÇÕES GERAIS	77

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os solos da Amazônia resultam de um intenso processo de intemperismo, que ocorre há milhões de anos, impulsionado pelo clima quente e úmido da região. A combinação de chuvas abundantes e temperaturas elevadas favorece a drenagem eficaz da água de percolação, intensificando o intemperismo e contribuindo para a formação desses solos (Schubart et al., 1984).

Dentre as principais classes de solos da região, destacam-se os Latossolos, que possuem perfis bem desenvolvidos e profundos (Lima, 2001; Sanchez et al., 1982). Esses solos são caracterizados por alta acidez ($\text{pH} < 5,4$), baixa saturação de bases e elevados teores de alumínio trocável (Schaefer et al., 2008; Batista, 2014). Além disso, aproximadamente 80% das áreas cultiváveis apresentam concentrações de fósforo (P) inferiores a $5,4 \text{ mg dm}^{-3}$, tornando esse nutriente o principal fator limitante na maioria desses solos (Batista, 2014).

O P é um dos nutrientes mais utilizados e estudados na agricultura (Omari et al., 2019), desempenhando funções essenciais em processos fisiológicos como fotossíntese, respiração e transferência de energia na forma de ADP e ATP, sendo crucial para a produção e produtividade das plantas (Taiz; Zeiger, 2017). No entanto, sua dinâmica em ambientes tropicais apresenta particularidades que afetam sua disponibilidade e eficiência de uso.

A baixa disponibilidade de P nos solos tropicais está diretamente relacionada ao material de origem e à predominância de argilominerais do tipo caulinita. A presença de óxidos e hidróxidos de ferro (goethita e hematita) e alumínio (gibbsita) contribui significativamente para a retenção de P no solo (Barbosa, 2017; Schaefer et al., 2008). O P aplicado via fertilização reage intensamente com esses minerais, sendo fortemente adsorvido em seus sítios de adsorção, reduzindo sua disponibilidade para as plantas (Novais; Smyth, 1999). Esse processo resulta na formação de compostos de baixa solubilidade (Neufeldt et al., 2000; Rajj, 2011), limitando a absorção de P pelas culturas devido à sua fixação no solo (Gatiboni, 2013). Embora o teor total de P no solo varie entre 200 e 3.000 mg kg^{-1} , menos de 0,1% desse total (aproximadamente 0,2 a 3 mg kg^{-1}) encontra-se disponível em solução para absorção pelas plantas (Novais; Smyth, 1999).

Em ambientes de pH ácido, comuns em regiões tropicais, o P pode se precipitar na forma de fosfatos insolúveis ao reagir com íons de alumínio (Al^{3+}), ferro (Fe^{3+}) e manganês (Mn^{2+}) (Chien et al., 2009). Assim, compreender a dinâmica do P nos solos tropicais é essencial para otimizar a produção agrícola e promover a sustentabilidade dos sistemas de cultivo.

Diante desse cenário, torna-se fundamental entender as reações de adsorção e dessorção do P. A adsorção ocorre quando o P inorgânico (Pi) se liga à superfície dos minerais de argila e

dos óxi-hidróxidos de Fe, Al e Ca, podendo essa ligação ser fraca (interações eletrostáticas) ou forte (ligações covalentes) (Lair et al., 2009). Já a dessorção corresponde ao processo de liberação do P previamente adsorvido, tornando-o novamente disponível na solução do solo (Anghinoni, 2004).

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) reflete o potencial do solo em reter e liberar esse nutriente ao longo do tempo, influenciando sua disponibilidade para as culturas e sua persistência para safras subsequentes, fenômeno conhecido como "efeito residual" (Pereira; Faria, 1998). Parte do P adsorvido no solo não é prontamente absorvida pelas plantas, mas permanece acessível por um período prolongado, sendo liberada gradualmente. Segundo Woodruff e Kamprath (1965), a CMAP tem sido amplamente utilizada como um indicador da quantidade de P necessária para suprir a demanda das plantas e promover seu crescimento.

A modelagem da adsorção de P é frequentemente realizada por meio de isotermas de adsorção, com destaque para a equação de Langmuir, utilizada para calcular a CMAP e a constante associada à energia de adsorção. Esses parâmetros podem ser correlacionados a diversas propriedades do solo, fornecendo informações valiosas sobre a interação entre os fertilizantes fosfatados e os constituintes do solo (Olsen; Watanabe, 1957).

Outro aspecto relevante para a compreensão da dinâmica do P nos solos é a caracterização das diferentes frações inorgânicas desse elemento, realizada por meio da extração sequencial com NH_4Cl (P solúvel), NH_4F (P-Al), NaOH (P-Fe) e H_2SO_4 (P-Ca) (Silva; Raij, 1999; Wang; Lambers, 2019). O método de fracionamento desenvolvido por Chang e Jackson (1957) permite a quantificação dessas frações, incluindo o P associado ao alumínio (P-Al), ao ferro (P-Fe) e ao cálcio (P-Ca) (Gatiboni et al., 2013).

O fracionamento das formas de Pi é uma ferramenta analítica essencial para elucidar a dinâmica do P no solo e sua disponibilidade para as plantas. Essa abordagem permite distinguir frações prontamente disponíveis daquelas fortemente fixadas nas partículas do solo, fornecendo subsídios para o manejo adequado da fertilização fosfatada. A compreensão desses processos é fundamental para otimizar o uso de fertilizantes fosfatados e promover a fertilidade dos solos em regiões tropicais, onde a disponibilidade de P é um fator crítico para a produtividade agrícola. Dessa forma, este estudo teve como objetivo 1: caracterizar diferentes Latossolos predominantes no trópico úmido quanto a capacidade máxima de adsorção (CMAP) e dessorção de P, objetivo 2 avaliar o efeito do tempo de contato fosfato-solo sobre as frações inorgânicas de P e a disponibilidade de P (P-resina) em Latossolos do trópico úmido.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGHINONI, I.; BISSANI, C. A. Fósforo e adubos fosfatados. In: BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J. & CAMARGO, F. A. O. (Eds.). Fertilidade do solo e manejo da adubação de culturas. **Porto Alegre, Genesis**, 2004. v. 1. p. 117-138.
- BARBOSA, T. M. B. **Mineralogia e disponibilidade de fósforo em solos de terra firme da Amazônia Central**. Tese (Doutorado em Agronomia Tropical). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017, 85p.
- BATISTA, I. M. P. **Recomendação de calagem para alguns solos do Estado do Amazonas**. Tese (Doutorado em Agronomia Tropical). Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2014. 37f.
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of Soil Phosphorus. **Soil Science**, v. 84, n. 2, p. 133-144, 1957.
- CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Chapter 8 - Recent Developments of Fertilizer Production and Use to Improve Nutrient Efficiency and Minimize Environmental Impacts. In: *Advances in Agronomy: Academic Press*, 2009. v. 102, p. 267-322.
- GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Chemical fractionation of soil phosphorus forms: uses and limitations. **Topics in Soil Science**, v. 8, p. 221-278, 2013.
- LAIR, G. J. *et al.* Phosphorus sorption desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. **Geoderma**, v. 149, p. 39-44, 2009.
- LIMA, H. N. Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001. 176 f.
- NEUFELDT, H.; SILVA, J. E.; AYARZA, M. A.; ZECH, W. Land- use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin/Heidelberg, v. 31, n. 1, p. 30-37, 2000. ISSN 0178-2762.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, J.T. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Vicoso: UFV, DPS, 1999. 399 p.
- OLSEN, E. R. e WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Science Society of America Journal**, v. 21, n. 2, p. 144-149, 1957.
- OMARI, H.; DEHBI, A.; LAMMINI, A.; ABDALLAOUI, A. Study of the Phosphorus Adsorption on the Sediments. **Journal of Chemistry**. v. 1, p. 1-10, 2019.
- OSORNO, L. *et al.* Phosphate desorption by a soil fungus in selected Hawaiian soils differing in their mineralogy. **Tropical Agriculture, Trinidad**, v.95 n. 2, p. 154-166, 2018.
- PEREIRA, J.R.; FARIA, C.M.B. 1998. Sorção de fósforo em alguns solos do Semi-árido do Nordeste brasileiro. **Pesq. agropec. bras.**,33(7):1179-1184.
- RAIJ, B. V (Ed.). Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes. Piracicaba-SP: Internacional **Plant Nutrition Institute**, v. 1, 420 p., 2011. 978-85-98519-07-4.
- REETZ, H. F. **Fertilizantes e seu uso eficiente**. ANDA, São Paulo, 2017, 178p.
- SANCHEZ, P. A.; BANDY, D.; VILLARICA, J.; NICHOLAIDES, J. Amazon basin soils: management for continuous crop production. *Science*, v. 216, p. 821-827, 1982.
- SCHAEFER, C.; FABRIS, J.; KER, J. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A review, **Clay Minerals - Clay Miner**, v. 43, p. 137-154, 2008.
- SCHUBART, Herbert O. R.; FRANKEN, Wolfram; LUIZÃO, Flávio J. Uma floresta sobre solos pobres, **Ciência Hoje**. v.2, n.10, p.26-32. jan-fev.1984.

SILVA, F. C. e RAIJ, B.van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.267-288, 1999.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 5da ed. Sinauer Associates, Sunderland, 2017, 34p.

WANG, Y. & LAMBERS, H. Root-released organic anions in responses to low phosphorus availability: recent progress, challenges and future perspectives, **Plant and Soil**, n. 447, p.135- 156, 2019.

WOODRUFF, J.R.; KAMPRATT, E.J. 1965. Phosphorus adsorption as maximum measured by the langmuir isotherm and its relation to phosphorus availability, **Soil. Sci. Soc. Am. Proc.**, 29:148-150.

3 ESQUEMA GERAL DA TESE

CAPÍTULO 1: CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS PREDOMINANTES NO TRÓPICO ÚMIDO

Objetivo: Caracterizar diferentes Latossolos predominantes no trópico úmido quanto a capacidade máxima de adsorção e dessorção de P.

CAPÍTULO 2: FRACIONAMENTO DE FÓSFORO INORGÂNICO DE EM LATOSSOLOS PREDOMINANTES NO TRÓPICO ÚMIDO

Objetivo: Avaliar o efeito do tempo de contato fosfato-solo nas frações inorgânicas de P e na disponibilidade P (extrator resina) em Latossolos predominantes no trópico úmido.

CAPÍTULO 1: CAPACIDADE MÁXIMA DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS PREDOMINANTES NO TRÓPICO ÚMIDO

RESUMO

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) e a desSORÇÃO de P são essenciais em solos tropicais, pois influenciam a disponibilidade de P para as plantas, a eficácia dos fertilizantes, a sustentabilidade agrícola e a produtividade das culturas. Objetivamos caracterizar diferentes Latossolos predominantes no trópico úmido quanto a capacidade máxima de adsorção (CMAP) e desSORÇÃO de P. Amostras de dez Latossolos Amarelos distróficos com ampla variação de características físicas, químicas e mineralógicas foram agitadas horizontalmente com soluções de CaCl_2 . Após período de agitação, mediu-se a concentração de P na solução de equilíbrio e foi ajustada equação de Langmuir, visando determinar a CMAP, energia de adsorção (EA) e fator capacidade máximo de P (FCP máx). Os resultados da CMAP revelam uma variação significativa entre os solos avaliados, com intervalo de 38,2 até 1.428,57 mg dm^{-3} , influenciando diretamente na EA e o FCP máx. A CMAP nos Latossolos varia em função da mineralogia, do teor de argila e do P remanescente (P-rem), influenciando diretamente a dinâmica do P no solo. A relação entre CMAP e energia de adsorção (EA) reflete a força de retenção do P, impactando sua disponibilidade para as plantas. A pesquisa compreende a importância de novos estudos da CMAP e desSORÇÃO em diferentes solos do Amazonas, para fundamentar recomendações fosfatadas precisas de modo a evitar desperdícios e contaminação do solo por excesso de P.

Palavras – chaves: fósforo adsorvido, minerais de argila, isoterma de adsorção

ABSTRACT

The maximum phosphorus adsorption capacity (CMAP) and P desorption are critical in tropical soils, as they influence P availability for plants, fertilizer efficiency, agricultural sustainability, and crop productivity. This study aimed to characterize different Latosols predominant in the humid tropics regarding their maximum adsorption capacity (CMAP) and P desorption potential. Samples of ten dystrophic Yellow Latosols, exhibiting a wide range of physical, chemical, and mineralogical characteristics, were horizontally shaken with CaCl_2 solutions. After the agitation period, the P concentration in the equilibrium solution was measured, and the Langmuir equation was fitted to determine CMAP, adsorption energy (EA), and the maximum phosphorus buffering capacity (FCP-max). The CMAP results revealed significant variation among the evaluated soils, ranging from 38.2 to 1,428.57 mg dm^{-3} , directly influencing EA and FCP-max. In Latosols, CMAP varies as a function of mineralogy, clay content, and remaining phosphorus (P-rem), directly affecting P dynamics in the soil. The relationship between CMAP and adsorption energy (EA) reflects the strength of P retention, impacting its availability to plants. This research highlights the importance of further studies on CMAP and desorption in different soils of the Amazonas region to support precise phosphate fertilization recommendations, minimizing waste and preventing soil contamination due to excessive P application.

Keywords: adsorbed phosphorus, clay minerals, adsorption isotherms

1 INTRODUÇÃO

Os solos de terra firme da Amazônia são distróficos, altamente intemperizados e de baixa fertilidade, com alta acidez, elevados teores de alumínio (Al) e baixa disponibilidade de fósforo (P) (Lima, 2001; Schaefer et al., 2008). A retenção de P ocorre devido à predominância de argilas de baixa atividade e à presença de óxidos e hidróxidos de ferro e Al, que adsorvem o nutriente, reduzindo sua disponibilidade para as plantas (Novais; Smyth, 1999). Além disso, a acidez favorece a precipitação de fosfatos insolúveis, restringindo ainda mais sua absorção (Raij, 2011). Assim, como a produtividade das culturas depende do P disponível, o uso de fertilizantes fosfatados têm sido uma estratégia para mitigar a deficiência de P (Novais; Smyth, Nunes, 2007; Mendes *et al.*, 2022).

A baixa disponibilidade de P nos solos Amazônicos deve-se, principalmente, ao material de origem e à predominância de minerais de argila, como a caulinita e os oxi-hidróxidos de ferro (Fe) e Al, representados por hematita (Hm), goethita (Gt) e gibbsita (Gb) (Motta et al. 2002; Gérard, 2016). Esses minerais possuem alta afinidade pelo P, retendo grande parte do nutriente aplicado no solo em seus sítios de adsorção, o que reduz significativamente sua disponibilidade para as plantas (Gonçalves et al. 1985). Embora o teor total de P nos solos varie entre 200 e 3000 mg kg⁻¹, menos de 0,1% (0,2 a 3 mg kg⁻¹) encontra-se na solução do solo, disponível para absorção pelas plantas (Novais; Smyth, Nunes, 2007). Desta forma, é fundamental entender as reações que envolvem a adsorção e a dessorção do P, ou seja, o processo pelo qual o P retorna à solução do solo.

A adsorção é um fenômeno físico-químico que consiste na retenção de íons ou moléculas na superfície de sólidos, sendo um dos principais processos que regulam a dinâmica de nutrientes no solo (Woodruff; Kampratt, 1965; Linhares; Oliveira; Bellis, 2009). O processo ocorre devido à interação entre cargas elétricas presentes na superfície dos colóides do solo, como argilominerais e óxidos de Fe e Al, e os íons presentes na solução do solo (Fernandez et al., 2008; Reis et al., 1995). No contexto da fertilidade do solo, a adsorção de P é especialmente relevante, pois determina a disponibilidade de P. Já a reação de dessorção de P é o processo pelo qual o P previamente adsorvido nas superfícies dos minerais do solo é liberado de volta para a solução do solo (Anghinoni, 2004).

Em solos altamente intemperizados, a adsorção ocorre predominantemente por meio da formação de complexos de superfície entre os grupos fosfato e os grupos hidroxila expostos nos oxi-hidróxidos de Fe e Al, formando ligações monodentadas ou bidentadas, que reduzem a concentração de P na solução do solo e dificultam sua absorção pelas plantas (Sims; Pierzyuski, 2005). A compreensão da adsorção é essencial para o manejo da fertilidade do solo, permitindo

a definição de estratégias para minimizar a fixação de nutrientes e otimizar sua eficiência agronômica.

A magnitude da CMAP é influenciada pela mineralogia, pelo grau de intemperismo e pela carga variável do solo, sendo maior em solos altamente intemperizados, como os Latossolos da região tropical. Tucci (1991), ao investigar a disponibilidade de P em diferentes classes de Latossolos no Estado do Amazonas, identificou a presença de caulinita e goethita na fração argila, caracterizando uma baixa CMAP ($<1.000 \text{ mg dm}^{-3}$). Por outro lado, Lima (2001), descreve valores de CMAP variando de 210 a 2.170 mg dm^{-3} , em solos da região, classificados como médios a muito altos.

Esse estudo, evidenciou a heterogeneidade na capacidade de adsorção de P, influenciada pelas características pedogenéticas e mineralógicas locais. De forma semelhante, Falcão e Silva (2004) encontraram valores de CMAP variando entre 297 e 888 mg dm^{-3} de argila, também classificados como médios a muito altos. Segundo esses autores, a variabilidade nos valores de CMAP pode ser atribuída ao teor de argila e à composição mineralógica do solo, que desempenham um papel determinante no processo de adsorção de P. Os valores de CMAP normalmente obtidos em solos da região Amazônica, são inferiores a CMAP de solos de outras regiões como cerrado (Valladares et al., 2003), o Semiárido (Corrêa et al., 2011), e Região dos Pampas (Piccolla et al., 2013), que normalmente apresentam valores de CMAP que ultrapassam 2.500 mg kg^{-1} , consideravelmente superiores aos encontrados na Amazônia.

As diferenças no padrão de resposta da CMAP entre os Latossolos evidenciam a necessidade de estudos adicionais para estimar esse parâmetro em diferentes classes de solos. Esse conhecimento é fundamental para a recomendação de fertilizantes fosfatados, permitindo ajustes nas doses de adubação de acordo com a capacidade de retenção do solo. Uma vez que, solos com alta CMAP, pode ser necessário um aporte inicial maior de P para saturar os sítios de adsorção. Em relação a solos de baixa CMAP, que doses excessivas de fertilizantes podem resultar em perdas por lixiviação, comprometendo a eficiência da adubação. Assim, a determinação da CMAP e dessorção de P contribuem para o uso racional de fertilizantes fosfatados, promovendo maior sustentabilidade do sistema de manejo da adubação (Woodruff; Kamprath, 1965). Nesse contexto, este estudo tem como objetivo caracterizar diferentes Latossolos predominantes no trópico úmido quanto à capacidade máxima de adsorção e dessorção de P.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização geral da área de estudo

As unidades geológicas das áreas estudadas são constituídas predominantemente pela formação Alter do Chão, composta por sedimentos variados do período Cretáceo (Rodrigues *et al.*, 1996). Esta formação inclui sedimentos argilo-arenoso do Cretáceo superior (Corrêa *et al.*, 2008), cuja composição do material de origem não é conhecida (Irion, 1978). O relevo predominante é o dissecado em tabuleiros, vindo a seguir as colinas que margeiam os lagos ou planícies com cotas variando de 50 a 200 m (Rodrigues *et al.*, 1996).

O clima dominante na região é tropical equatorial, do grupo Af, com precipitação anual aproximada de 2.420 mm. O mês mais seco é agosto, com média de 80 mm de precipitação, conforme a classificação climatológica de Köppen-Geiger (Alvares *et al.*, 2013). O regime térmico da região é caracterizado por temperaturas médias de 26,7°C, com variações sazonais entre 25,9°C e 27,7°C (Alvares *et al.*, 2013). A umidade relativa do ar costuma ser superior a 64%, com média anual em torno de 80% (Bastos, 1972).

A ordem de solo predominante na região de estudo é o Latossolo Amarelo, seguido pelo Argissolo Amarelo (SI, 1976). Os constituintes desses solos estão expostos a cerca de 20 milhões de anos de intemperismo (Irion, 1978), o que contribuiu para que aproximadamente 85% deles apresentem forte acidez (Baligar *et al.*, 2001), com P em níveis deficientes e Al em níveis tóxicos coexistindo (Chen *et al.*, 2012). No entanto, esses solos, especialmente os Latossolos, apresentam boas condições físicas (Maia; Marmo, 2010).

Neste estudo, foram utilizadas amostras de dez Latossolos Amarelos distróficos, coletadas em seis municípios do Estado do Amazonas: Iranduba, Manacapuru, Presidente Figueiredo, Manaus, Itacoatiara e Rio Preto da Eva, conforme descrito na Tabela 1 e visualizados na Figura 1. As coletas foram realizadas em áreas de terra firme, sob vegetação nativa de floresta ombrófila aberta (Pandolfo, 1978). A seleção dos locais visou abranger uma ampla variedade de solos já explorados para fins agrícolas na região, com base nas recomendações dos técnicos do Instituto de Desenvolvimento Agropecuário e Florestal Sustentável do Estado do Amazonas (IDAM).

Tabela 1. Classe textural dos solos, localização e pontos de coleta das amostras de solo.

Solo*	Município	Coordenadas geográficas
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1)	Iranduba	03° 12' 01" S e 60° 13' 01" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2)	Presidente Figueiredo	02° 39' 15" S e 60° 03' 19" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1)	Itacoatiara	02° 55' 51" S e 59° 09' 06" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2)	Manacapuru	03° 15' 17" S e 60° 39' 28" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3)	Iranduba	03° 12' 22" S e 60° 09' 47" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4)	Manaus	03° 06' 11" S e 59° 58' 32" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1)	Manacapuru	03° 06' 02" S e 59° 58' 28" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2)	Rio Preto da Eva	02° 42' 37" S e 59° 26' 17" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3)	Presidente Figueiredo	01° 25' 18" S e 60° 15' 20" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4)	Manaus	02° 39' 41,4" S e 60° 07' 57,5" W

*Santos et al. (2018)

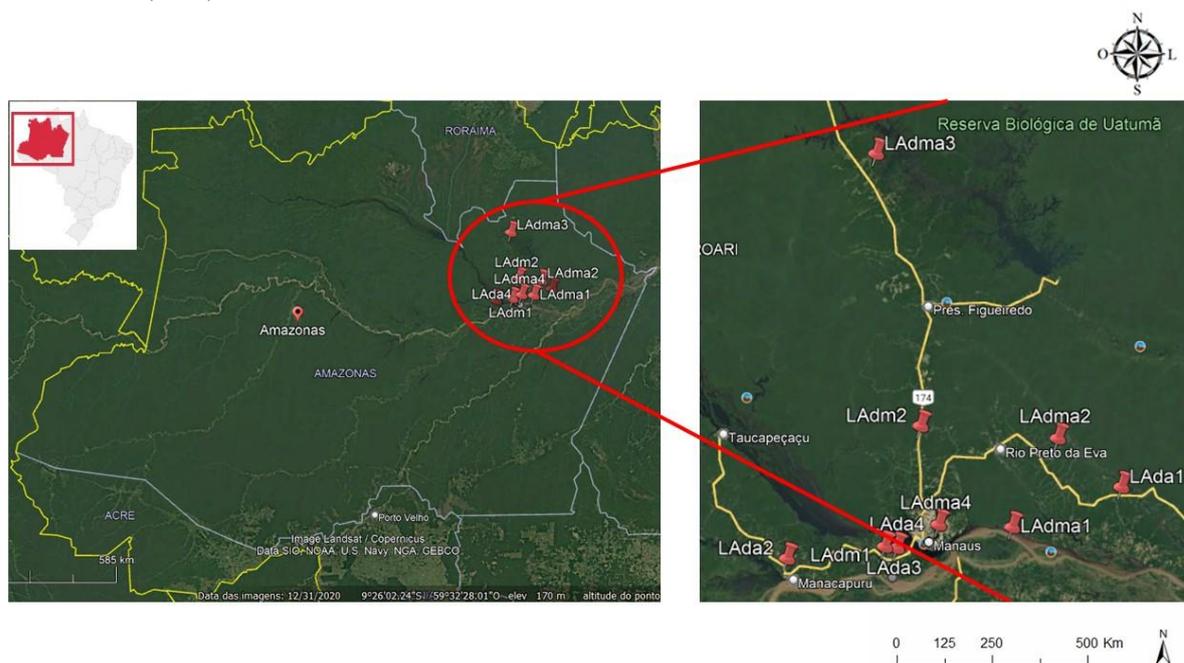


Figura 1. Localização das áreas de estudo e pontos de coleta das amostras de solo (Autor, 2024)

2.2 Procedimentos específicos

2.2.1 Coleta e preparação das amostras de solo

A coleta dos solos ocorreu na camada superficial de 0-20 cm de profundidade, em um único ponto representativo da área, onde as características originais do solo estavam bem preservadas e, que entre 80 e 100% dos locais apresentam solos com P-Melich 1 inferior a 5 mg kg⁻¹ (LEHMANN et al., 2001). Após a coleta, as amostras foram destorroadas, homogeneizadas, secas à sombra e peneiradas em uma malha de 4,0 mm. Em seguida, foram retiradas subamostras que passaram por uma peneira de 2,0 mm de abertura para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

2.2.2 Caracterização química, granulométrica e mineralógica dos solos

As subamostras de solo foram caracterizadas quimicamente em relação ao pH em H₂O e em CaCl₂, à disponibilidade de P (extraído com resina) e ao fósforo remanescente (P-rem). Também foram analisadas as formas disponíveis de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio trocável (Al³⁺), além da acidez potencial, matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva e potencial, conforme descrito por Teixeira *et al.* (2017). Com base nesses dados, foram estimados os índices de saturação por bases (V%) e saturação por Al (m%). Além desses atributos, foram avaliados os teores dos micronutrientes, cobre (Cu), ferro (Fe),

manganês (Mn) e zinco (Zn), extraídos pelo extrator Mehlich-1, e o boro (B), que foi extraído por água quente, conforme a metodologia da Embrapa (2009).

Tabela 2. Atributos químicos dos solos utilizados no estudo na profundidade de 0 - 20 cm.

Solo	pH	P	K	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al	t	T	V	m	M.O.S	P-rem
		mg dm ⁻³					cmolc kg ⁻¹			%		dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹
LAdm1	4,1	2,3	10	0,1	0,1	1,4	10,9	1,6	11,2	2	85,9	2,48	22,22
LAdm2	4,4	1,4	8	0,1	0,1	0,8	4	1	4,3	5,2	78,4	1,18	18,88
LAda1	4,2	1,4	8	0,1	0,1	1,2	8,8	1,4	9	2,4	84,5	1,87	17,11
LAda2	4,4	3,2	16	0,2	0,1	1,4	9,8	1,7	10,2	3,4	80,5	2,61	12,53
LAda3	4	2,6	12	0,1	0,1	1,6	10,9	1,8	11,2	2,1	87,4	2,48	17,11
LAda4	3,9	2,9	14	0,2	0,1	1,4	9,8	1,7	10,2	3,3	80,5	1,87	15,49
LAdma1	4,7	5,8	20	0,8	0,2	1,8	12,3	2,8	13,3	7,9	63,2	3,28	5,47
LAdma2	4,1	2,6	10	0,2	0,1	1,2	8,8	1,5	9,1	3,6	78,4	1,64	17,71
LAdma3	4,1	2	10	0	0,1	1,2	8,8	1,4	9	2,5	83,9	2,11	5,79
LAdma4	4,4	1,71	10	0,25	0,2	1,1	5,05	1,55	5,5	8,21	70,97	1,64	17,71

LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4).

A análise granulométrica foi realizada na TFSA pelo método de Bouyoucos (1927), modificado por Carvalho (1985). Utilizou-se NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico, com agitação por 16 horas a 30 rpm em agitador rotatório tipo Wagner. A fração de areia (2 - 0,053 mm) foi separada por meio de tamisagem.

Os minerais da fração argila hematita (Hm) e goethita (Gt) foram caracterizados por difratometria de raio-X (DRX) pelo método do pó após a concentração dos óxidos de ferro fervendo a fração argila com NaOH (NORRISH e TAYLOR, 1961) e desferrificação da fração argila pelo método de Mehra e Jackson (1960). As amostras foram difratadas com velocidade de varredura de 1° 2θ min⁻¹ utilizando Mini-Flex Rigaku II (20mA, 30 kV), equipado com radiação Cu Kα.

A razão Hm/(Gt+Hm) foi estimada comparando as áreas dos picos obtidos da Hm/(Gt+Hm) DRX com as proporções das relações obtidas a partir de misturas padrão Gt-Hm. As porcentagens de Hm e Gt foram calculadas alocando-se a diferença entre Fe ditionito (Fed) e Fe oxalato (Feo) a estes óxidos. A razão Ct/(Ct+Gb) foi calculada utilizando as áreas dos picos dos reflexos Gb (002) e Ct (001). Os resultados estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3. Teores de goethita (Gt), hematita (Hm), relação entre Hm/(Hm + Gt), ferro extraído com ditionito (Fed), ferro extraído com oxalato (Feo), relação ferro oxalato/ferro ditionito (Feo/Fed) e granulometria dos solos do Amazonas.

Solo	Gt	Hm	Hm/(Hm + Gt)	Fed	Feo	Feo/Fed	Areia	Silte	Argila
	----- g kg ⁻¹ -----			-----g kg ⁻¹ -----			----- dag kg ⁻¹ -----		
LAdm1	51,5	5,72	11	3,8	0,14	0,04	77	1	22
LAdm2	5,26	21,3	82	2	0,15	0,08	69	9	22
LAda1	16,2	24,6	63	2,9	0,11	0,04	61	3	36
LAda2	14,9	53,4	80	5	0,31	0,06	61	3	36
LAda3	49,5	18,6	29	4,7	0,24	0,05	56	5	39
LAda4	13,7	11,5	48	1,8	0,15	0,08	37	8	55
LAdma1	59,7	10,5	16	4,7	0,19	0,04	32	6	62
LAdma2	30,6	3,35	11	2,3	0,14	0,06	22	11	67
LAdma3	8,82	23,4	75	2,6	0,39	0,15	5	21	74
LAdma4	3,62	26,4	89	2,3	0,27	0,11	15	3	82

LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4).

2.2.3 Determinação do fósforo remanescente

O fósforo remanescente (P-rem) foi determinado a partir da solução de equilíbrio obtida após agitação a 200 rpm em um agitador com movimento circular-horizontal. Para isso, uma amostra de 2,5 cm³ de terra fina seca ao ar foi misturada com 25 ml de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, contendo 60 mg L⁻¹ de P, durante 5 minutos (Alvarez V.; Fonseca, 1990). Após a agitação, a amostra foi deixada em repouso por 16 horas e, em seguida, o P na solução de equilíbrio foi determinado utilizando o método de Murphy e Riley (1962).

2.2.4 Determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) e a energia de adsorção da isoterma de Langmuir (EAP) foram determinadas conforme Olsen e Watanabe (1957). Amostras de 2,5 g de TFSA receberam 25 mL de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ com diferentes concentrações de P, conforme Alvarez V. e Fonseca (1990), estas amostras foram agitadas por 72 horas, alternando entre agitação e repouso. A agitação ocorreu por 12 horas, a temperatura ambiente, em um agitador circular-horizontal tipo vaivém a 160 rpm, seguida de 12 horas de repouso. Os níveis de P utilizados para os solos estão expressos na Tabela 4. A fonte de P utilizada foi utilizado o fosfato de potássio monobásico (KH₂PO₄), com elevado grau de pureza.

Tabela 4. Doses de P aplicadas nos diferentes tipos de solo para determinar a capacidade máxima adsorção de P no solo (CMAP¹).

Solo	Doses de P (mg L ⁻¹)										
LAdm1	0	5,00	10,00	15,00	25,00	35,00	45,00	55,00	70,00	85,00	100,00
LAdm2	0	6,75	13,5	20,25	33,75	47,25	60,75	74,25	94,50	114,75	135,00
LAda1	0	6,75	13,5	20,25	33,75	47,25	60,75	74,25	94,50	114,75	135,00
LAda2	0	8,5	17,0	25,50	42,50	59,50	76,50	93,50	119,00	144,50	170,00
LAda3	0	6,75	13,5	20,25	33,75	47,25	60,75	74,25	94,50	114,75	135,00
LAda4	0	6,75	13,5	20,25	33,75	47,25	60,75	74,25	94,50	114,75	135,00
LAdma1	0	10,5	21,0	31,50	52,50	73,50	94,50	115,50	147,00	178,50	210,00
LAdma2	0	6,75	13,5	20,25	33,75	47,25	60,75	74,25	94,50	114,75	135,00
LAdma3	0	10,5	21,0	31,50	52,50	73,50	94,50	115,50	147,00	178,50	210,00
LAdma4	0	8,5	17,0	25,5	42,50	59,50	76,50	93,50	119,00	144,50	170,00

LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4). (¹Alvarez V.; Fonseca, 1990).

Após o período de agitação, os tubos foram centrifugados por 15 min a 3000 rpm, promovendo a sedimentação do solo e permitindo a retirada completa da solução sobrenadante. Esta solução foi então filtrada em papel de filtro equivalente ao Whatman 40 e o teor de P foi determinado por colorimetria a 660 nm (Murphy; Riley, 1962).

2.2.5 Determinação da dessorção de fósforo

Após a remoção do sobrenadante para a determinação da CMAP, o resíduo sólido (solo) remanescente nos tubos de centrifugação foram lavados com agitação por 5 min utilizando 20 ml de cloreto de sódio (1 mol L⁻¹ NaCl), com o sobrenadante sendo descartado após centrifugação (3500 rpm por 15 min), a fim de eliminar o P retido na solução residual. Em seguida, foram adicionados 25 ml da solução de CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹). Os procedimentos utilizados da determinação da sorção de P, foram adotados na determinação da dessorção de P. A determinação do teor de P dessorvido foi realizada por colorimetria a 660 nm (Murphy; Riley, 1962). Para avaliar a reprodutibilidade das medidas, todas as análises foram conduzidas em triplicata (Ramsey *et al.*, 1987).

2.3 Modelagem e análise da adsorção e dessorção de P

O P adsorvido foi calculado pela diferença entre as quantidades de P adicionadas e as quantidades encontradas na solução de equilíbrio (sobrenadante) após o período de agitação. O P adsorvido e as concentrações de P na solução de equilíbrio foram ajustados à equação de Langmuir. A forma hiperbólica da equação de Langmuir foi expressa pela seguinte fórmula: $x/m = (abC)/(1 + aC)$. Onde x/m representa a quantidade de P adsorvido ao solo em mg de P

(x)/g solo (m); b é a CMAP do solo, em mg de P g⁻¹ de solo; C é a concentração de P na solução de equilíbrio, em mg L⁻¹; e a é a constante relacionada à energia de adsorção de P no solo, expressa em mg L⁻¹ (Olsen; Watanabe, 1957).

Para estimar as constantes a e b, a equação hiperbólica de Langmuir foi convertida para sua forma linear, dada por: $C/(x/m) = 1/(ab) + (1/b) C$. A partir dos resultados foram construídas as isotermas de adsorção, plotando-se a quantidade de P adsorvido na ordenada e a concentração na solução de equilíbrio na abcissa. (Alvarez, 1982 citado por Alvarez V.; Fonseca, 1990).

A CMAP (b) foi determinada pelo valor inverso da declividade da reta, a constante de energia de adsorção (a) foi calculada pela relação entre a declividade da reta e a interseção da mesma com o eixo das ordenadas, enquanto o fator capacidade de P máximo (FCP máx.) foi obtido pelo produto entre a CMAP e a energia de adsorção, conforme Bahia Filho *et al.* (1983) e Novais ; Smyth (1999).

Os resultados foram ainda submetidos à análise de regressão visando a adequação de modelos matemáticos para explicar a relação entre os teores de P dessorvidos em função das doses de P aplicado. Quando foram ajustados mais de um modelo matemático para um mesmo parâmetro, optou-se por aquele com maior coeficiente de determinação (R²). As análises foram feitas utilizando o software RStudio (Pacote Exp.Desp) (2020).

A comparação entre os modelos de regressão foi realizada com base no coeficiente linear da equação ajustada entre a variável dependente como função das doses de fósforo aplicado. Estimou-se ainda o índice tampão de P (ITP) a partir dos valores dos coeficientes b1 das equações do 2º grau ajustada entre o P adsorvido e o P dessorvido das diferentes concentrações de P adicionadas para cada solo (Accioly *et al.*, 1985).

3 RESULTADOS

3.1 Atributos químicos e mineralógicos do solo

A interpretação dos resultados dos atributos químicos dos solos foi realizada conforme Alvarez V. et. al. (1990). Os solos apresentaram acidez ativa muito elevada ($\text{pH em H}_2\text{O} < 4,5$), acidez trocável alta ($\text{Al}^{3+} > 1,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$) e saturação por alumínio muito elevada ($\text{m\%} > 50\%$) (Tabela 2). A disponibilidade de P foi interpretada com base na classe textural do solo e no P-rem. Solos de textura média, argilosa ou muito argilosa, com menos de $5,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de P disponível, como os solos deste estudo, são classificados como de baixa fertilidade em relação ao P.

Os teores de K, Ca e Mg indicam que os solos avaliados apresentam baixa disponibilidade desses nutrientes, o que impacta diretamente em sua fertilidade. Em relação ao K, os solos LAda2 e LAdma1 apresentaram teores baixos ($16\text{--}40 \text{ mg dm}^{-3}$), enquanto os demais foram classificados como de teor muito baixo ($< 15 \text{ mg dm}^{-3}$).

Quanto ao Ca, o solo LAdma1 apresentou teor baixo ($0,41\text{--}1,2 \text{ cmolc dm}^{-3}$), enquanto os demais apresentaram teores muito baixos ($< 0,40 \text{ cmolc dm}^{-3}$). Para o Mg, os solos LAdma1 e LAdma4 apresentaram teores baixos ($0,16\text{--}0,45 \text{ cmolc dm}^{-3}$), enquanto os demais foram classificados como de teor muito baixo ($< 0,15 \text{ cmolc dm}^{-3}$).

A acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$), que está diretamente relacionada ao poder tampão do solo, variou de $4,4$ a $12,3 \text{ cmolc dm}^{-3}$. O solo LAdm2 apresentou acidez potencial média ($2,51\text{--}5,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$), enquanto os demais foram classificados como de acidez potencial alta ($5,01\text{--}9,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$) a muito alta ($> 9,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$) (Tabela 2).

A CTC a pH 7,0 variou entre os solos, com valores de $4,26$ a $13,33 \text{ cmolc dm}^{-3}$. Os menores valores foram observados nos solos LAdm2 e LAdma4, com $4,26$ e $5,5 \text{ cmolc dm}^{-3}$, respectivamente (Tabela 2). De modo geral, todos os solos apresentaram baixa CTC ($< 27 \text{ cmolc dm}^{-3}$), caracterizando-se como argilas de atividade baixa.

Os teores de M.O.S. variaram de $1,18$ a $3,28 \text{ dag kg}^{-1}$. Os solos LAdm2, LAda1, LAda4, LAdma2 e LAdma4 foram classificados na faixa de baixo teor de M.O.S. ($0,71\text{--}2,0 \text{ dag kg}^{-1}$), enquanto os demais apresentaram teores médios ($2,0\text{--}4,0 \text{ dag kg}^{-1}$) (Tabela 2).

O valor de P-rem, indicador do potencial de retenção de fosfato no solo e fortemente correlacionado à textura do solo, variou de $5,47$ a $22,22 \text{ mg L}^{-1}$. O solo LAdm1 apresentou o maior valor ($22,22 \text{ mg L}^{-1}$), enquanto os menores valores foram registrados nos solos LAdma1 e LAdma3 ($5,47$ e $5,79 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente), indicando alto potencial de adsorção de P. Destaca-se que, apesar de os solos LAdma2 e LAdma4 pertencerem ao grupo de textura muito

argilosa, não estão entre aqueles com maior potencial de adsorção de P, visto que seus valores de P-rem variaram entre 0 e 10 mg L⁻¹.

Em relação a mineralogia do solo, os resultados indicam que os solos LAdm1, LAda3, LAdma1 e LAdm2 apresentaram os maiores teores de Gt e predomínio desse mineral em relação à Hm. Em contrapartida, os menores teores de Gt foram observados nos solos LAdm2, LAdma3 e LAdma4. Para Hm, o maior valor foi registrado no solo LAda2, enquanto LAdm1 e LAdma2 apresentaram os menores teores. A relação Hm/(Hm+Gt) evidenciou que os solos LAdm1, LAdma1 e LAdma2 possuem menor proporção de Hm, enquanto LAdm2, LAda1, LAda2, LAdma3 e LAdma4 apresentam maior presença desse mineral em relação aos óxidos totais de Fe.

A maior parte do ferro livre nos solos estudados encontra-se na forma cristalizada (Fed). Os teores de Fed variaram entre 1,82 e 4,98 g kg⁻¹, com as maiores concentrações em LAda2, LAda3 e LAdma1 e os menores valores em LAda4 e LAdm2. Já o ferro mal cristalizado (Feo) variou de 0,11 a 0,39 g kg⁻¹, sendo mais elevado nos solos LAdma3, LAda2, LAdma4 e LAda3, enquanto LAda1, LAdm1 e LAdma2 apresentaram os menores teores.

A análise granulométrica revelou teores de argila variando entre 22% e 82%. Os solos LAdm1 e LAdm2 foram classificados como de textura média (15%–36% de argila), enquanto os solos LAda1, LAda2, LAda3 e LAda4 apresentaram textura argilosa (36%–60% de argila). Já os solos LAdma1, LAdma2, LAdma3 e LAdma4 foram classificados como de textura muito argilosa (> 60% de argila) (Tabela 2). Assim, a maioria dos solos enquadra-se nas classes texturais argilosa e muito argilosa.

3.2 Isotermas de adsorção de fósforo (P)

Nos solos LAdm2 e LAda1 as isotermas demonstram um aumento rápido na adsorção de P em baixas concentrações, seguido de um platô e uma diminuição na quantidade adsorvida com o aumento da concentração, sendo classificada como Isoterma do tipo H (alta afinidade) (Figura 2A e 2B). Já nos solos LAda3, LAdma2 e LAda4 as isotermas apresentam uma curva de adsorção de P que cresce continuamente sem atingir um platô definido dentro das concentrações de P, o que pode ser típico das isotermas L (tipo Langmuir).

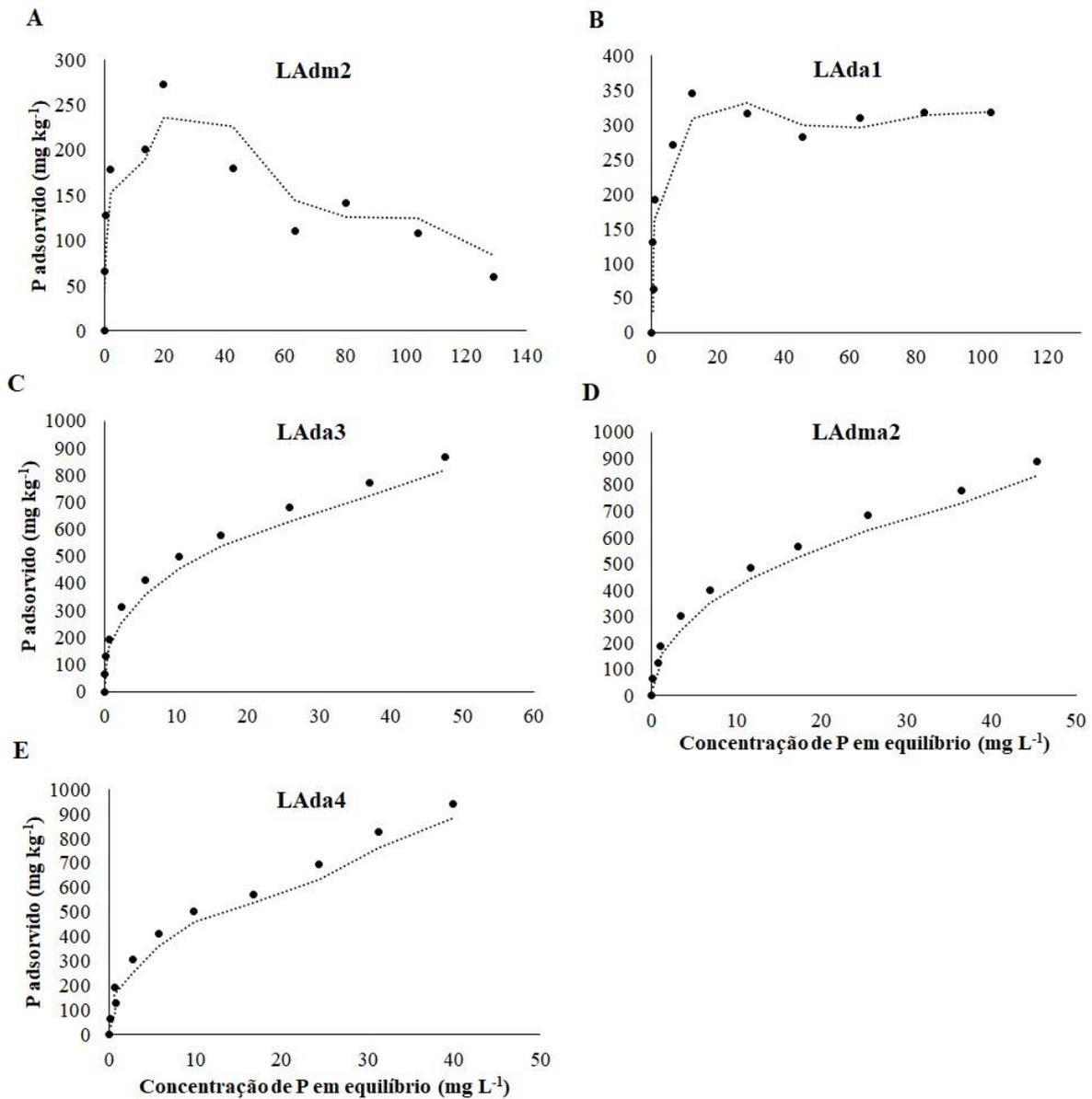
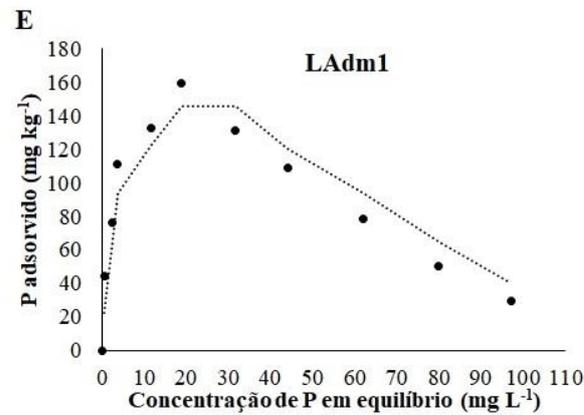
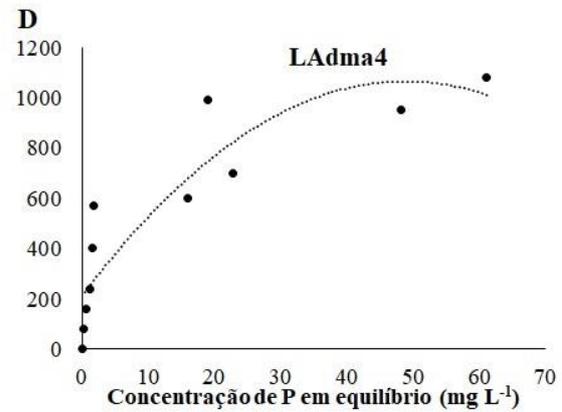
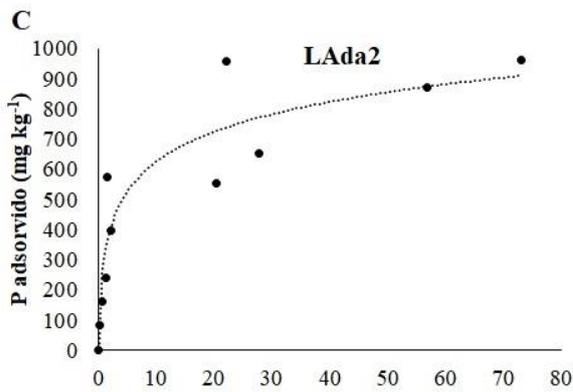
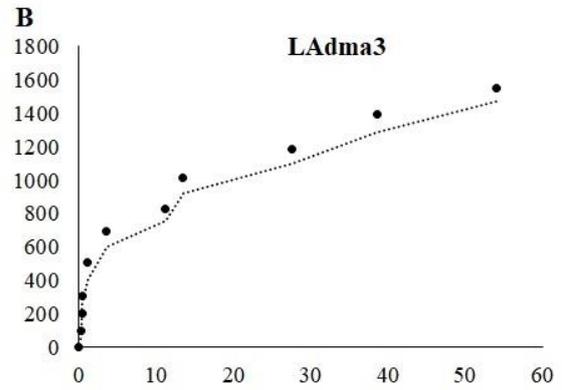
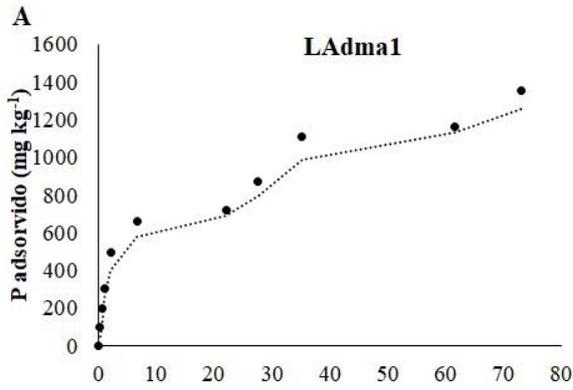


Figura 2. Ajuste da adsorção de P pelo modelo de Langmuir para a quantidade de P adsorvida em função do conteúdo de P na solução de equilíbrio ($n = 3$) em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) (D) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4) (E) do estado do Amazonas.

Os resultados das isotermas de adsorção de P para os solos LAdma1, LAdma3, LAda2, LAdma4 e LAdm1 estão apresentados na Figura 2. Com base nesses resultados, observa-se que exceto o solo LAdm1, os demais seguem o modelo de isotermas em forma de L (tipo Langmuir). No entanto, nos solos LAdma1 e LAdma3, há um aumento contínuo na curva de adsorção, sem atingir um platô claro nas concentrações avaliadas. Já nos solos LAda2 e LAdma4, a resposta ou ajuste de adsorção também apresenta um aumento constante, sem um limite evidente de saturação, indicando um padrão típico de adsorção em superfícies homogêneas. O solo LAdm1 apresenta um padrão de resposta diferente, com um aumento

rápido na adsorção seguido de uma diminuição após atingir um pico, com formato característico de uma isoterma H (alta afinidade).



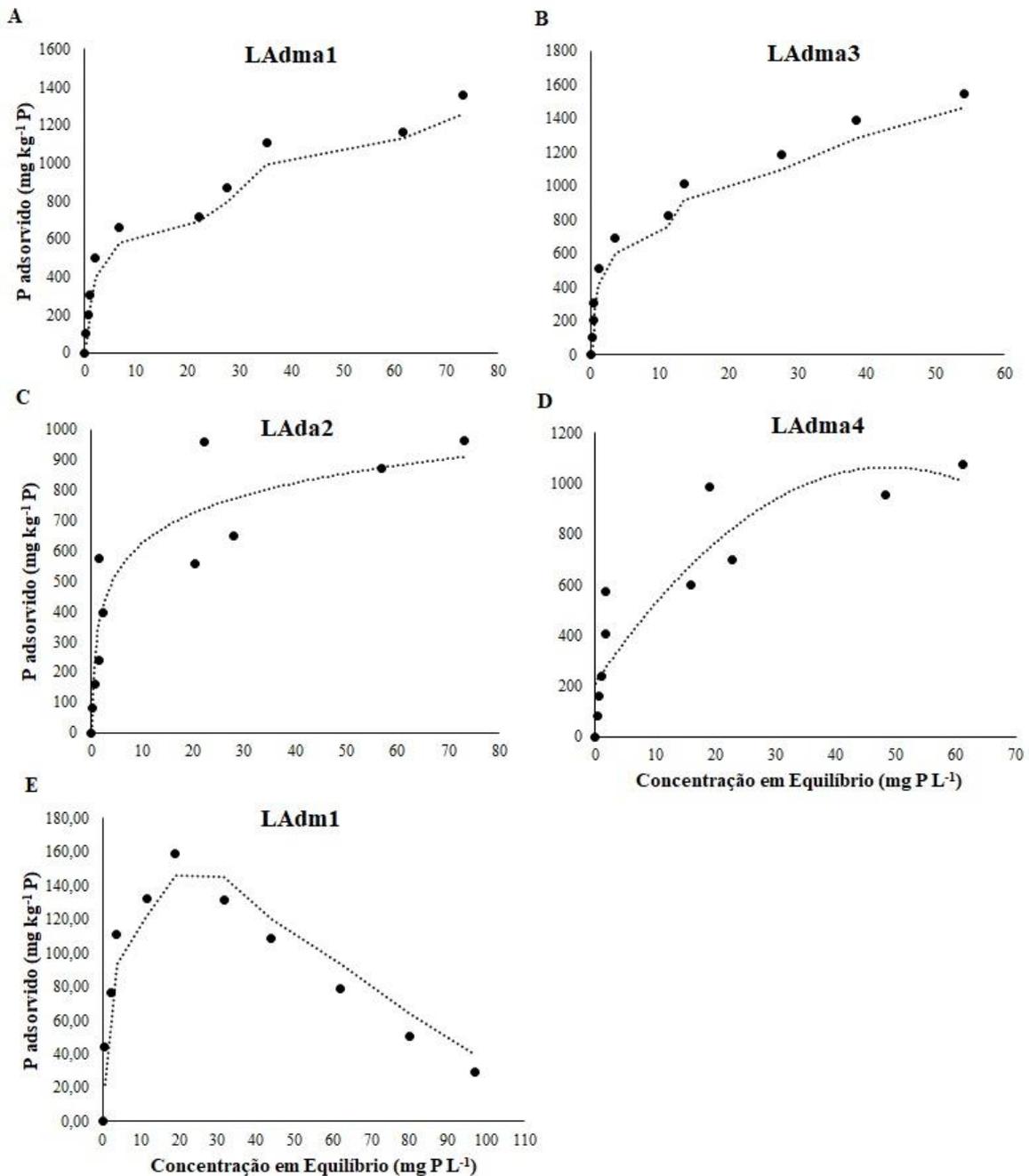


Figura 3. Ajuste da adsorção de P pelo modelo de Langmuir para a quantidade de P adsorvida em função do conteúdo de P na solução de equilíbrio ($n = 3$) em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4), e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1) (E) do estado do Amazonas.

Observa-se que a equação linearizada de Langmuir para a adsorção de P ajustou-se adequadamente em todos os solos avaliados. As equações indicam que, à medida que aumentam as concentrações de equilíbrio de P, ocorre um incremento na quantidade adsorvida de P (Figuras 3 e 4). O ajuste do modelo da isoterma de Langmuir aos dados experimentais foi significativo, como pode ser constatado pelos elevados valores dos coeficientes de

determinação, o que indica que este modelo é bem ajustado às diversas condições de solo e concentrações de P (Figuras 1 e 2).

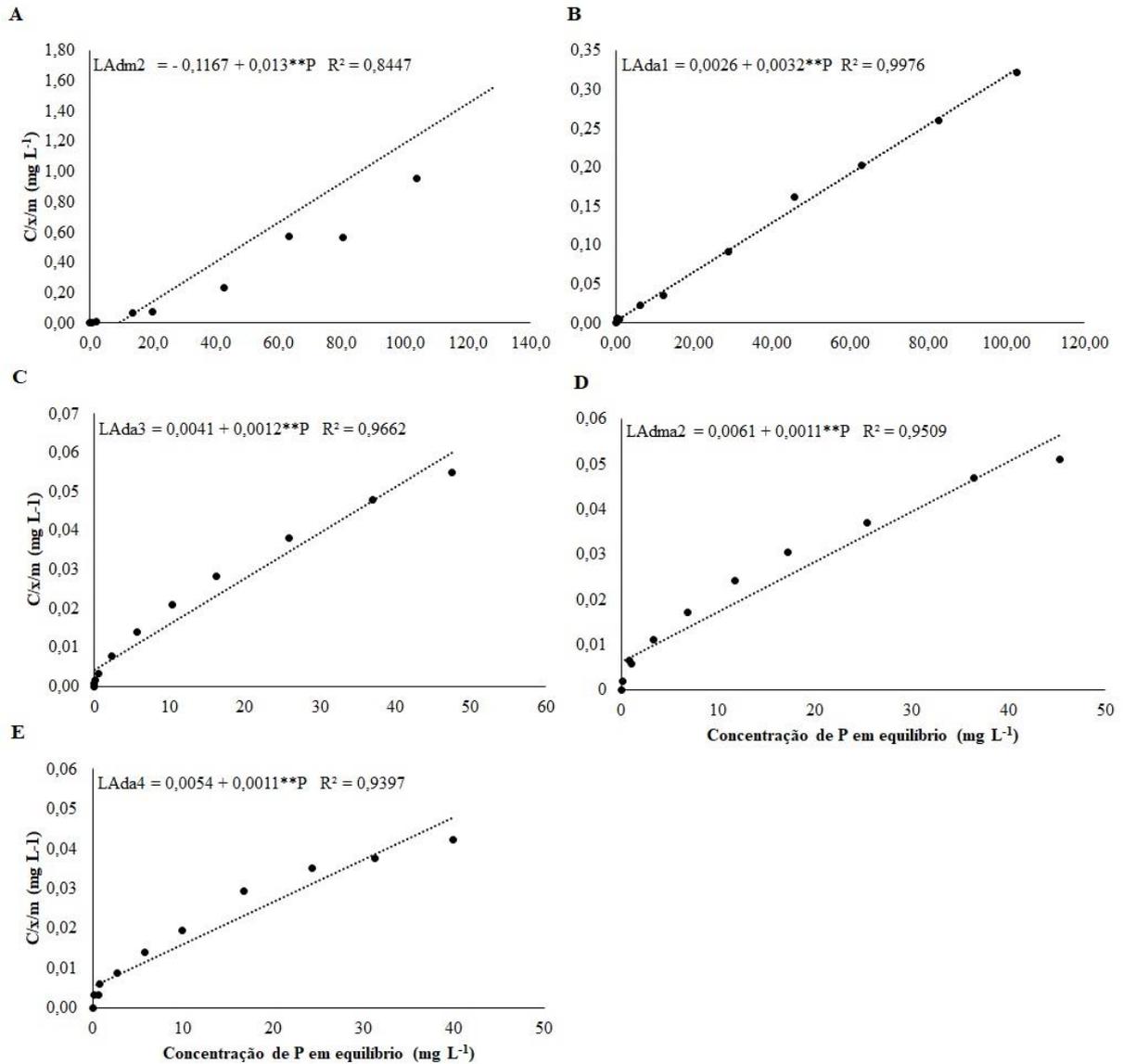


Figura 4. Ajuste da isoterma de adsorção de Langmuir na forma linear em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) (D) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4) (E) do estado do Amazonas.

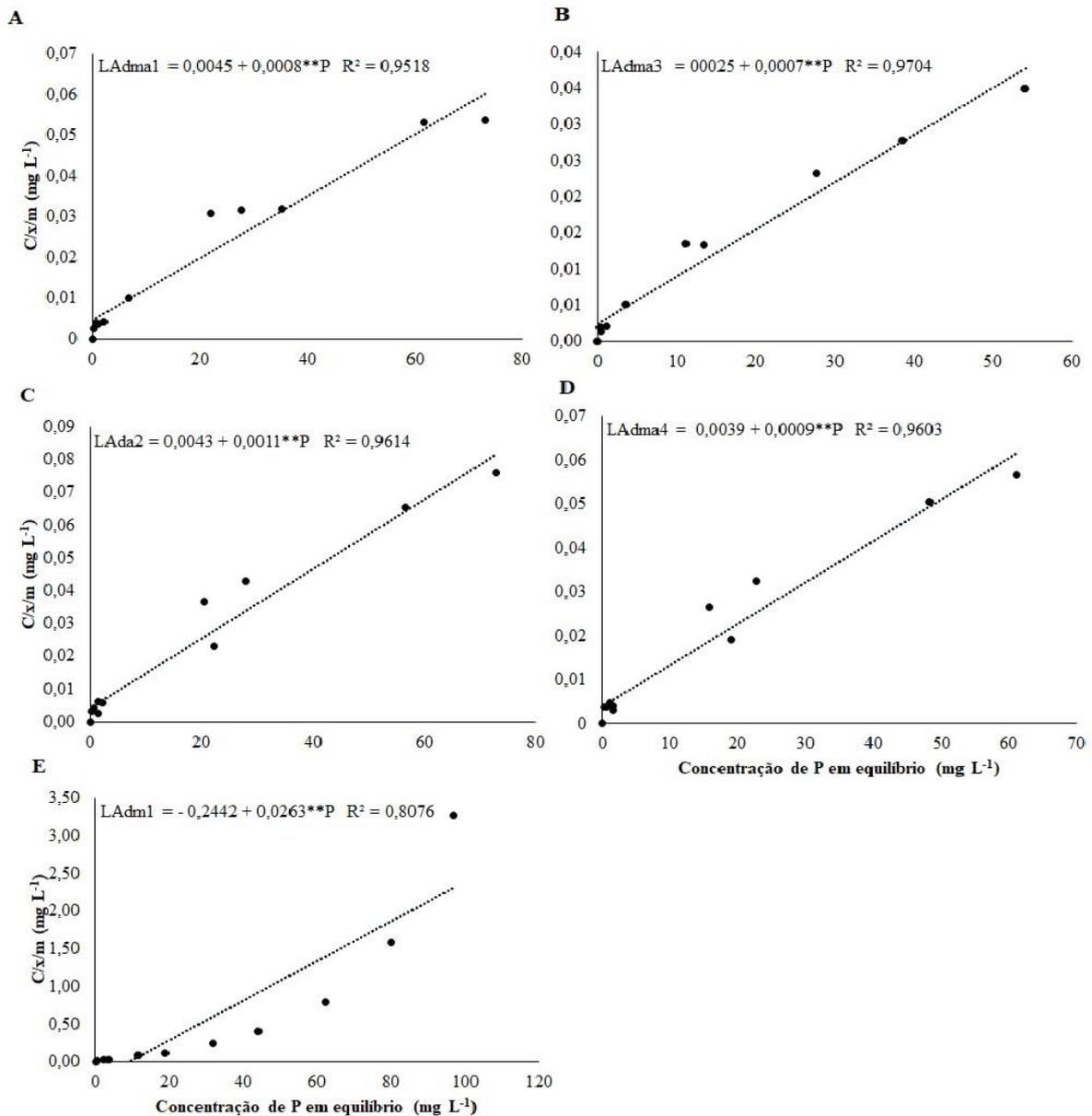


Figura 5. Ajuste da isotermas de adsorção de Langmuir na forma linear em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4), e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1) (E) do estado do Amazonas.

3.3 Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), energia de adsorção e fator capacidade máxima de P (FCP-máx)

Com base nas equações de Langmuir, foi estimado a CMAP dos Latossolos. Os resultados da CMAP estão apresentados na Tabela 5 e revelam uma variação significativa entre os Latossolos estudados. Os valores da CMAP variaram de 38,02 mg kg⁻¹ no solo LAdm1 (Iranduba) até 1.428,57 mg kg⁻¹ nos solos LAdma3 (Presidente Figueiredo). A energia de adsorção (EA), que reflete a afinidade do solo pelo P, variou conforme a localidade avaliada.

Nos solos LAdm1 e LAdm2, localizado em Iranduba e Presidente Figueiredo, foram encontrados os menores valores de energia de liga ($0,11 \text{ mg L}^{-1}$), enquanto no solo LAda1, em Itacoatiara, foram encontrados os maiores valores de energia de ligação ($1,23 \text{ mg L}^{-1}$) (Tabela 3). Esses resultados indicam que o solo de Itacoatiara apresenta uma maior afinidade pelo P em comparação aos demais solos estudados.

Tabela 5. Capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), energia de adsorção (EA) e fator capacidade de P máximo (FCP-máx), teor de argila e P-remanescente (P-rem).

Solo	Procedência	CMAP ¹ (mg kg^{-1})	EA ² (mg L^{-1})	FCP-máx ³ . (ml kg^{-1})
LAdm1	Irاندuba	38,02	0,11	4,1
LAdm2	Presidente Figueiredo	76,92	0,11	8,57
LAda1	Itacoatiara	312,5	1,23	384,62
LAda2	Manacapuru	909,09	0,26	232,56
LAda3	Irاندuba	833,33	0,29	243,9
LAda4	Manaus	909,09	0,20	185,19
LAdma1	Manacapuru	1250,00	0,18	222,22
LAdma2	Rio Preto da Eva	909,09	0,18	163,93
LAdma3	Presidente Figueiredo	1.428,57	0,28	400
LAdma4	Manaus	1.111,11	0,23	256,41

LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4), e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1) (E). ¹Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP); ²Constante relacionada com a energia de ligação do P (EA) e ³Fator de capacidade de fósforo (FCP-máx)

Os valores mais elevados do fator de capacidade de fósforo máxima (FCP-máx) foram observados nos solos LAdma3 (400 mL kg^{-1}) e LAda1 ($384,62 \text{ mL kg}^{-1}$), enquanto o solo LAdm1 apresentou o menor valor ($4,1 \text{ mL kg}^{-1}$). Esses resultados corroboram os dados obtidos para a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP).

3.4 Dessorção de fósforo (P) no solo

Na Figura 6, estão expressos os resultados das curvas de dessorção de P para os solos LAdm2, LAda1, LAda3, LAdma2 e LAda4. Verifica-se que em todos os solos avaliados, o modelo de regressão linear foi o modelo predominante. Ou seja, com o aumento das doses de fosfato adicionado ao solo ocorre o aumento da dessorção de P no solo. Resposta similar foi obtida na Figura 7. Com base nos elevados valores dos coeficientes de determinação das equações, verifica-se que o modelo indica uma forte relação entre as doses de fosfato aplicadas no solo com o P dessorvido na solução do solo.

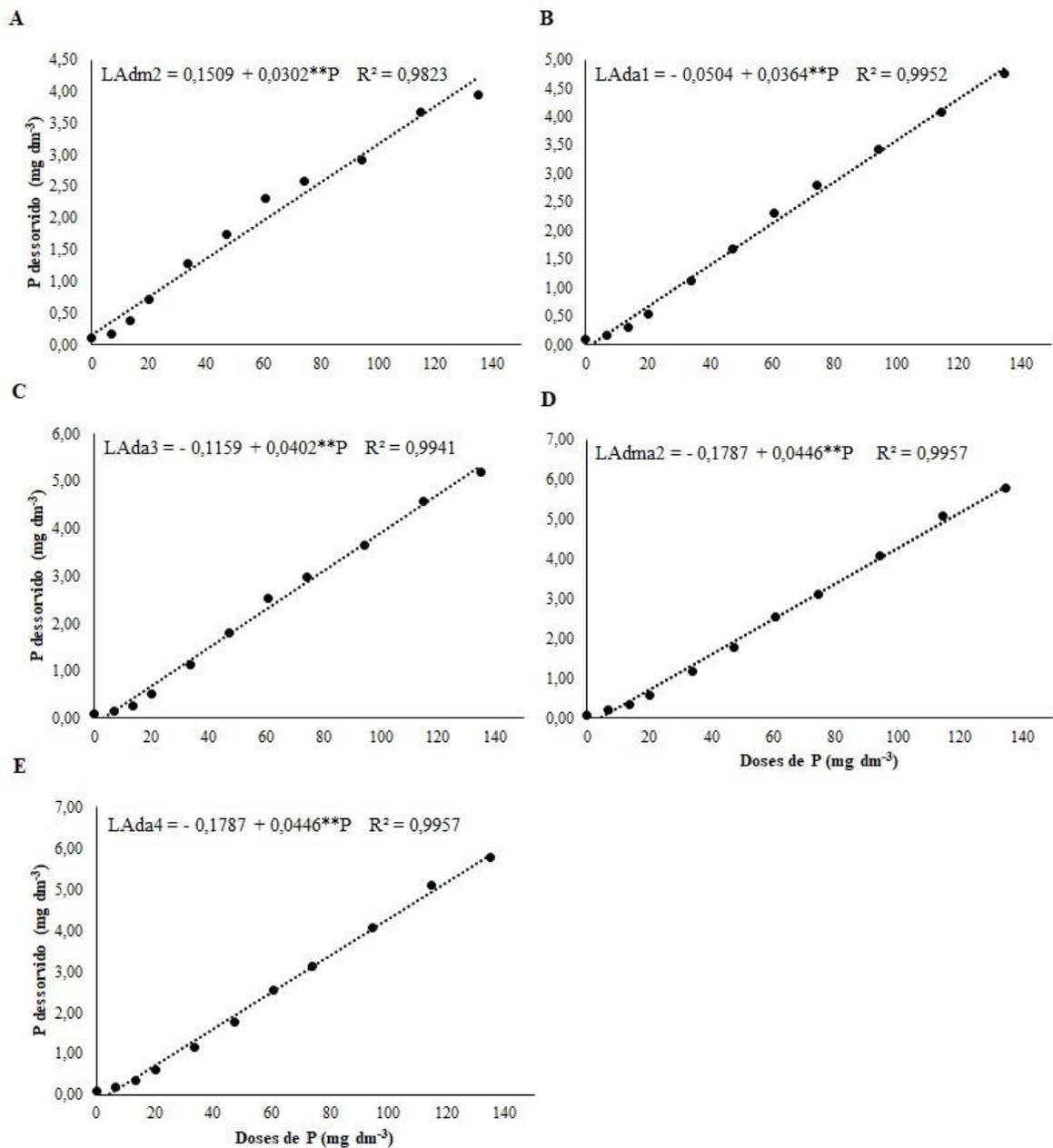


Figura 6. Ajuste da curvas de dessorção de fósforo (P) em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) (D) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4) (E) do estado do Amazonas.

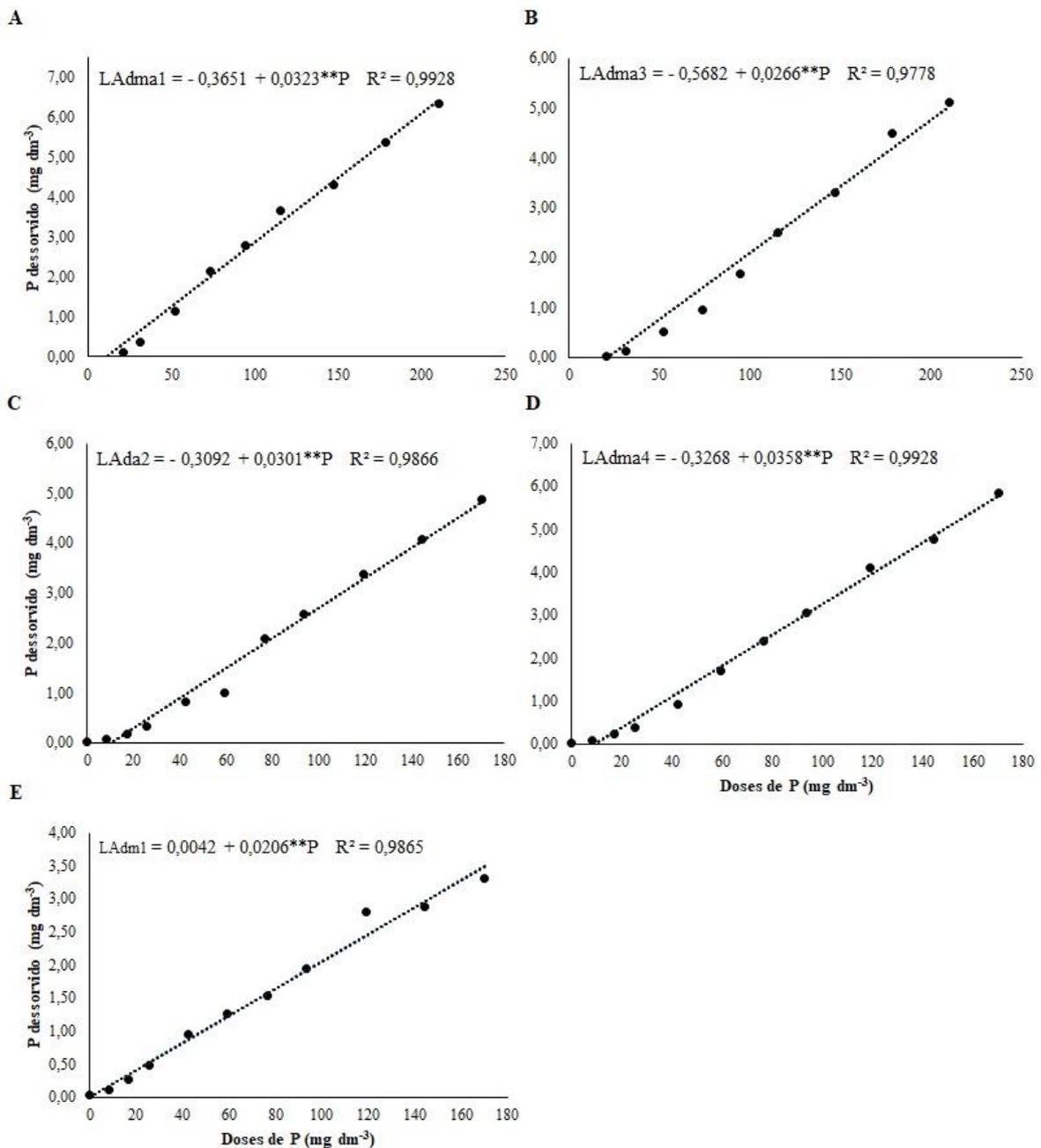


Figura 7. Ajuste da curva de dessorção de fósforo (P) em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4) (D), e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1) (E) do estado do Amazonas.

Nas Figuras 8 e 9, são apresentados os valores referentes à relação entre os teores de P adsorvido e P dessorvido. A análise dessa relação permite identificar Índice Tampão de P (ITP) e visualizar o FCP-máx (Fator de Capacidade de Fósforo máximo), que corresponde ao fluxo máximo de P adsorvido pelo solo em direção à solução, mantendo a concentração de P na solução em níveis constantes. Quanto mais elevado o valor do coeficiente linear (ITP), mais elevado será o FCP-máx. Neste caso o inverso também é verdadeiro, pois quanto menor o ITP,

menor será o FCP-máx. Para este estudo maiores coeficientes lineares foram obtidos em LAdma3 (449,9**) (Figura 8B) e os menos foram alcançados em LAdm2 (163,81**) (Figura 7A).

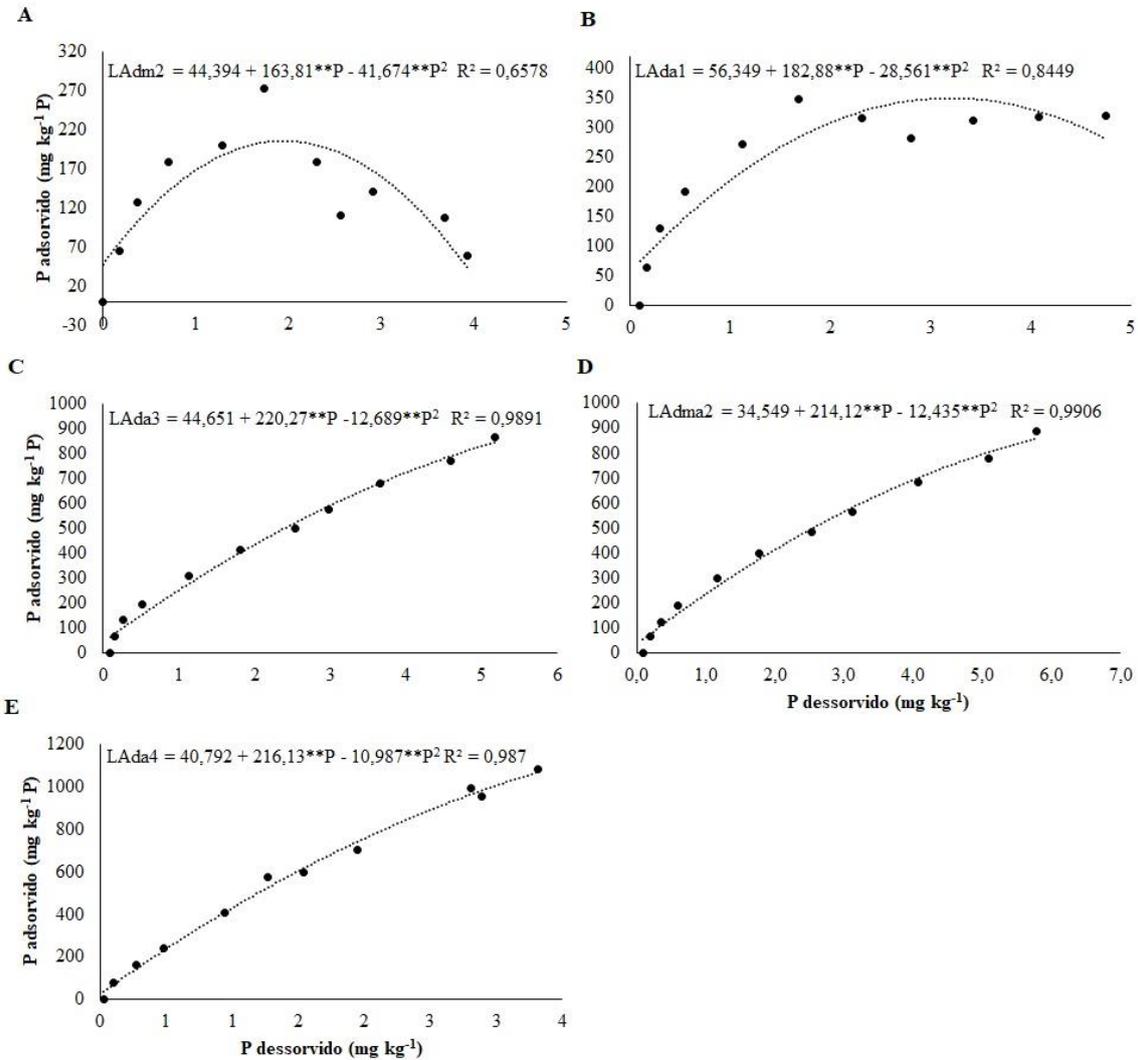


Figura 8. Relação entre fósforo (P) adsorvido e P no sobrenadante em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) (D) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4) (E) do estado do Amazonas. Coeficientes linear (b1) das equações de 2º grau expressam o índice tampão de fósforo (ITP).

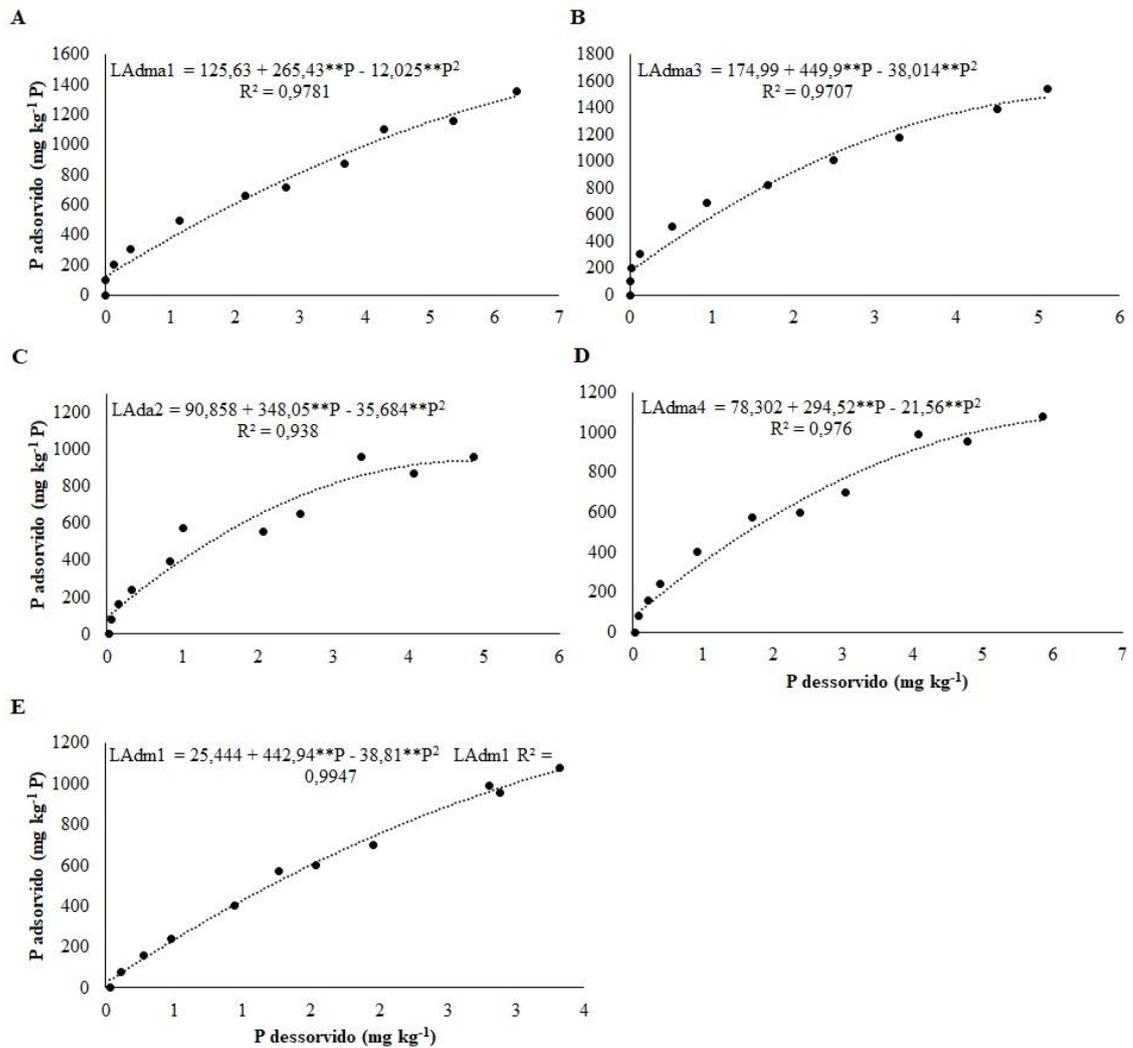


Figura 9. Relação entre fósforo (P) adsorvido e P no sobrenadante em LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1) (A), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3) (B), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2) (C), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4) (D), e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1) (E) do estado do Amazonas. Coeficientes linear (b1) das equações de 2º grau expressam o índice tampão de fósforo (ITP).

4 DISCUSSÃO

4.1 Atributos químicos e mineralógicos do solo

A CMAP nos solos está diretamente relacionada a fatores com o teor de argila e mineralogia, P disponível e P-rem. Os solos avaliados apresentaram baixa disponibilidade de P ($<5,5 \text{ mg dm}^{-3}$), classificada como indicativa de baixa fertilidade em relação a esse nutriente (Alvarez V. et al., 2002). Essa baixa disponibilidade decorre, em grande parte, da elevada adsorção do P pelas superfícies coloidais do solo, especialmente em solos com alta proporção de óxidos de Fe e Al (Reis et al., 1995).

O P-rem, indicador do potencial de retenção de fosfato no solo, variou amplamente entre os solos estudados, refletindo diferenças na CMAP (Novais; Smyth, Nunes, 2007). Valores baixos de P-rem, como observados nos solos LAdma1 e LAdma3 ($5,47$ e $5,79 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente), indicam alto potencial de adsorção de P, resultado da elevada presença de óxidos de Fe e Al, além da alta saturação por Al^{3+} (Barbosa, 2017). Por outro lado, o solo LAdm1 apresentou o maior valor de P-rem ($22,22 \text{ mg L}^{-1}$), sugerindo menor retenção de P e, conseqüentemente, maior disponibilidade de P para as plantas.

A relação entre CMAP e textura do solo também é notável. Os solos de textura muito argilosa ($>60\%$ de argila), como LAdma1, LAdma2, LAdma3 e LAdma4, geralmente possuem maior capacidade de adsorção de P devido à maior superfície específica dos coloides minerais (Motta et al., 2002). Entretanto, observa-se que solos como LAdma2 e LAdma4, apesar de serem muito argilosos, apresentaram valores de P-rem entre 0 e 10 mg L^{-1} , sugerindo que a mineralogia dos óxidos de Fe e Al pode ser um fator determinante adicional na adsorção do P.

A mineralogia dos solos revelou predomínio de goethita nos solos LAdm1, LAda3, LAdma1 e LAdm2, enquanto hematita esteve mais presente nos solos LAdm2, LAda1, LAda2, LAdma3 e LAdma4. A relação $\text{Hm}/(\text{Hm}+\text{Gt})$ indicou que os solos LAdm1, LAdma1 e LAdma2 possuem menor proporção de Hm, o que pode estar associado a uma maior capacidade de adsorção de P, já que a goethita, por possuir maior área superficial específica em comparação à hematita, apresenta maior capacidade de fixação do fosfato (Guedes et al., 2015). Os solos com maior teor de Hm, por sua vez, podem apresentar menor adsorção de P, refletindo maiores valores de P-rem.

Além disso, a forma cristalizada do ferro livre (Fed) variou entre $1,82$ e $4,98 \text{ g kg}^{-1}$ nos solos, sendo mais elevada nos solos LAda2, LAda3 e LAdma1. Já o ferro mal cristalizado (Feo), que tem maior reatividade na adsorção de P, apresentou teores entre $0,11$ e $0,39 \text{ g kg}^{-1}$, sendo mais elevado nos solos LAdma3, LAda2, LAdma4 e LAda3. A alta proporção de Feo nesses

solos pode indicar uma maior retenção de P devido à maior disponibilidade de sítios ativos para adsorção.

Portanto, a CMAP nos solos avaliados é influenciada por uma combinação de fatores, onde baixos valores de P-rem, alta argilosidade e predominância de goethita e ferro mal cristalizado estão associados a uma maior adsorção de fósforo. Esse conhecimento é essencial para a recomendação de práticas de manejo que visem otimizar a disponibilidade de P para as culturas, especialmente em solos altamente intemperizados e pobres nesse nutriente.

4.2 Isoterma de adsorção

As isotermas de adsorção de P apresentadas nas Figuras 3 e 4 demonstram que a quantidade de fosfato adsorvida pelos solos aumentou com o incremento da concentração da solução de equilíbrio, inicialmente de forma mais acentuada. No entanto, em concentrações elevadas, a adsorção tende a atingir um valor constante. Os resultados indicam que a maioria dos solos avaliados apresenta a isoterma do tipo (LAda2, LAda3, LAda4, LAdma1, LAdma2, LAdma3 e LAdma4) (Figura 3 e 4), com sete dos dez Latossolos analisados exibindo esse padrão de resposta, enquanto três solos (Lada1, LAdm1 e LAdm2) apresentaram a isoterma do tipo H (alta afinidade) (Giles; Smith, 1974).

Na isoterma tipo L, existe uma afinidade do solo (adsorvente) com o fosfato (absorbato) em baixas concentrações e diminuição da superfície livre do solo (Sparks, 2001), indicando a diminuição da disponibilidade dos sítios ativos à medida que a cobertura da superfície adsorvente aumenta, o que resulta em uma menor energia de adsorção e menor inclinação da curva. A magnitude deste fenômeno depende da natureza e da quantidade de sítios disponíveis na superfície dos minerais, do mineral constituinte da fração de argila, bem como de outros atributos do solo, como pH, P-rem, óxidos de Fe e Al, e M.O.S (Chaves *et al.*, 2009).

A isoterma em H mostra um aumento rápido na adsorção em baixas concentrações, seguido por um platô e, posteriormente, uma redução na quantidade adsorvida à medida que a concentração aumenta. Esse padrão sugere uma alta afinidade inicial pelos sítios de adsorção, seguida de uma estabilização do processo conforme esses sítios se tornam saturados (Giles *et al.*, 1960). Os solos utilizados apresentam acidez elevada (< 4,5), nestas condições o P pode ser predominantemente adsorvido por óxidos e hidróxidos de Al e Fe, como goethita e hematita (Parfitt, 1989) (Tabela 3). O P pode ser primeiro adsorvido na superfície de minerais de argila e óxidos de Fe e Al formando vários complexos, como complexos de superfície bidentados não protonados e protonados. Minerais de argila e óxidos de Fe/Al têm grandes áreas de superfície específicas, que fornecem grande número de locais de adsorção (Barbosa, 2017)).

As isotermas de adsorção identificadas H e L são características da adsorção química de uma monocamada aniônica, pela fase sólida adsorvente do solo (Barrow, 1978). Na fase inicial de rápida adsorção de P no solo, há uma atração eletrostática inicial (Barrow, 1985), seguida pela adsorção por oxidróxidos, por meio de troca de ligantes (Barrow, 1985; Sanyal; Datta, 1991). Nessa reação, denominada quimiossorção, há troca de ligantes, como OH^- e OH_2^+ , da superfície dos óxidos, por fosfato da solução. É uma ligação predominantemente covalente (“adsorção específica”), ao contrário do NO_3^- ou do Cl^- , adsorvidos por atração eletrostática (“adsorção não específica”) (Parfitt, 1979).

Estudo avaliando a CMAP em Latossolos de textura muito argilosa, variando de 67,02 a 76,02 dag kg^{-1} , Damaceno *et al.* (2020), identificaram os padrões para as isotermas de adsorção era do tipo H. Resposta compatível foi obtida no ensaio de Falcão e Silva, (2004), que avaliou a CMAP de seis Latossolos do estado do Amazonas com textura argilosa e muito argilosa.

4.3 Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), energia de adsorção e fator capacidade máxima de P (FCP-máx)

Os resultados obtidos para a CMAP revelam uma considerável variação entre os Latossolos estudados, refletindo as diferenças intrínsecas de cada solo, incluindo aspectos como teor de argila e mineralogia. Observa-se que a CMAP variou de 38,02 mg kg^{-1} no solo LAdm1 (Iranduba) até 1.428,57 mg kg^{-1} no solo LAdma3 (Presidente Figueiredo). A maioria dos Latossolos estudados apresenta CMAP classificada como alta (500 a 1.000 mg kg^{-1}) e muito alta ($> 1.000 \text{ mg kg}^{-1}$), representando cerca de 80% dos solos avaliados.

Os solos com elevada CMAP, como LAdma3, LAdma1 e LAdma4, indicam uma grande capacidade de adsorção de P. Nestes solos foram verificados dois cenários distintos: em LAdma3 e LAdma4, foram observados teores superiores de hematita em relação à goethita, enquanto em LAdma1 foi observada a resposta oposta (Tabela 3).

Os resultados da literatura sobre as características mineralógicas do solo são contrastantes (Gérard, 2016). Nesse contexto, acredita-se que a hematita apresente menor superfície específica e menor densidade de grupos hidroxila do que a goethita, o que, teoricamente, reduziria a adsorção de P (Barbosa, 2017). No entanto, a quantidade total de hematita pode compensar sua menor reatividade específica, fornecendo numerosos sítios de adsorção (Torrent; Schwertmann; Barron, 1994). Além disso, a hematita pode apresentar variações na sua estrutura cristalina que influenciam sua capacidade de retenção de P.

Outro aspecto de substancial importância para a adsorção de P é o grau de cristalinização do Fe. O Fed representa os óxidos de Fe cristalinos (hematita e goethita), enquanto o Feo representa óxidos amorfos (ferridrita e formas mais desordenadas de ferro) (Ekebafé; Ekebafé, 2023). Os solos LAdma3, LAdma1 e LAdma4 apresentam maior teor de Fed em relação ao Feo, indicando uma maior proporção de óxidos cristalinos, que tendem a ser menos reativos do que os amorfos (Tabela 3).

Entretanto, quando presentes em grandes quantidades, esses óxidos cristalinos ainda podem oferecer um número expressivo de sítios de adsorção de P. Adicionalmente, esses solos apresentam elevados teores de argila (Tabela 3), contribuindo significativamente para a alta CMAP, uma vez que o maior teor de argila aumenta a área de contato e o número total de sítios de adsorção de P.

Em LAdma1 foi observado o predomínio de hematita, em relação a goethita (Tabela 3). A goethita tende a ter maior superfície específica e maior densidade de grupos hidroxila (OH) na superfície do que a hematita (Fontes; Weed; Bowen, 1992). Com mais grupos hidroxila disponíveis, a goethita pode fornecer mais sítios ativos para a adsorção de P, mesmo que a hematita esteja presente em menor quantidade. A alta capacidade de adsorção da goethita está associada ao fato de que ela forma complexos mononucleares e binucleares mais estáveis com o P (Shen *et al.*, 2011).

Por outro lado, os solos com menor CMAP, como LAdm1 (38,02 mg kg⁻¹) e LAdm2 (76,92 mg kg⁻¹), apresentam uma capacidade limitada de adsorção de P, o que pode estar associado a uma menor fração de argila ou a um conteúdo reduzido de óxidos de Fe e Al. Nesses solos, a EA também foi baixa (0,11 mg L⁻¹), indicando interações mais fracas entre o P e os componentes do solo, resultando em maior mobilidade de P e maior susceptibilidade à lixiviação. A EA reflete a força com que o P é retido nos sítios adsorptivos do solo. Nos solos com elevada CMAP, a EA variou de 0,18 a 0,28 mg L⁻¹, indicando que o P está fortemente ligado à matriz do solo, o que pode reduzir sua disponibilidade no solo.

Solos com maior EA apresentam maior afinidade pelos íons de P, o que implica em maior capacidade de retenção de P, reduzindo potencialmente sua concentração na solução do solo. A presença de minerais como goethita e hematita, que possuem elevada superfície específica, contribui para o aumento dessa afinidade devido à elevada EA, especialmente em condições de pH ácido (Oliveira *et al.*, 2014) (Tabela 2). Além disso, a EA pode variar em função da quantidade de P disponível e de suas diferentes formas químicas presentes no solo. Assim, é comum observar variações na EA entre solos da mesma classe (Hanyabui *et al.*, 2020), o que também foi constatado na maioria dos solos analisados neste estudo. Esses resultados

indicam que tais solos podem demandar estratégias de manejo diferenciadas para a aplicação de fertilizantes fosfatados, considerando as diferenças na EA e, conseqüentemente, na dinâmica do P no solo.

Tucci (1991), ao estudar a disponibilidade de P em diferentes classes de Latossolos do Estado do Amazonas, verificou a presença de caulinita e goethita na fração argila, sendo a CMAP considerada baixa ($< 1.000 \text{ mg dm}^{-3}$), conforme a classificação proposta por Juo e Fox (1977). Entretanto, Lima (2001) encontrou valores de CMAP variando de 210 a 2.170 mg dm^{-3} , classificados como médios a muito altos, em solos da região. Esse estudo, avaliou a adsorção de P em diferentes ordens de solos do Estado do Amazonas, destaca a heterogeneidade da capacidade de adsorção de P em função das características pedogenéticas e mineralógicas locais.

Os resultados obtidos neste estudo são compatíveis com os valores observados por Falcão e Silva (2004), que encontraram valores de CMAP variando entre 297 e 888 mg dm^{-3} de argila, classificados como médios a muito altos. Segundo os autores, tais valores podem indicar a influência do teor de argila e dos componentes mineralógicos no processo de adsorção de P.

Resultados semelhantes aos obtidos neste estudo foram relatados por Damaceno et al. (2020), que, ao avaliar a adsorção e a disponibilidade de P em Latossolo Amarelo da Amazônia Central, com teores de argila variando de 67 a 76 dag kg^{-1} e predomínio de goethita em relação à hematita, encontraram valores de CMAP entre 941 e 1.184 mg kg^{-1} , próximos aos obtidos neste estudo. Assim, verifica-se que o teor de argila e a mineralogia exercem influência significativa sobre a CMAP, destacando-se a importância das características mineralógicas e texturais na dinâmica da capacidade de adsorção de P nos solos da região amazônica.

A relação entre CMAP e FCP-máx. é crucial para compreender a disponibilidade do P no solo. O FCP-máx. representa a proporção de P adsorvido que pode ser potencialmente disponibilizado para as plantas. Nos solos de maior CMAP, como LAdma3 (400 ml kg^{-1}) e LAdm4 ($256,41 \text{ ml kg}^{-1}$), o FCP-máx. também foi elevado, sugerindo que, apesar da forte retenção, ainda há uma fração significativa de P passível de ser disponibilizada no solo. Em contrapartida, nos solos de menor CMAP (LAdm1 e LAdm2), os valores de FCP-máx. foram extremamente baixos ($4,12$ e $8,57 \text{ ml kg}^{-1}$, respectivamente), indicando que, além da baixa capacidade de adsorção, esses solos apresentam um P pouco retido, tornando-o mais suscetível às perdas por lixiviação.

Dessa forma, a interdependência entre CMAP, EA e FCP-máx. revela que solos com alta CMAP e EA tendem a fixar fortemente o P, reduzindo sua disponibilidade imediata, enquanto aqueles com baixo CMAP e EA apresentam maior mobilidade do P, aumentando o risco de

perdas por lixiviação. O equilíbrio entre adsorção e disponibilidade é essencial para estratégias de manejo da fertilização fosfatada, sendo necessário considerar tanto a capacidade de retenção quanto a liberação de P ao longo do tempo, visando a eficiência no uso do nutriente e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas em solos altamente intemperizados.

4.4 Dessorção de fósforo (P) no solo

A análise das curvas de dessorção de P em diferentes tipos de Latossolos apresentou resultados significativos em relação às quantidades de P dessorvido. Os resultados indicam que a dessorção de P tende a aumentar de forma proporcional com o incremento das doses de fosfato, seguindo um modelo linear em todos os solos analisados (Figuras 6 e 7). Observou-se que a taxa de dessorção de P é maior em solos com menor EA, por exemplo, a dessorção aumenta com a elevação da disponibilidade de P no solo (Smolders *et al.*, 2021). Outro fator substancial que influencia na adsorção de P, é a EA exercida pelas partículas do solo sobre o P (Barrow, 1983).

Os Latossolos utilizados neste estudo apresentam predomínio dos minerais goethita e hematita (Tabela 3) (Barbosa, 2017; Damaceno *et al.*, 2020). O fosfato, uma vez adsorvido nos sítios de superfície desses minerais, permanece fortemente retido, o que retarda o processo de dessorção e a difusão de P na solução do solo (Torrent, Schwertmann, Barrón, 1992). Esse padrão de resposta indica que os Latossolos possuem um elevado potencial para reduzir a taxa de dessorção de P, devido, principalmente, ao alto teor de argila, à composição mineralógica, à grande superfície específica dos minerais e a atributos químicos, como o teor de P disponível e o pH do solo (Fink *et al.*, 2016). Assim, é esperado que solos ricos em goethita demandem maiores doses de fertilizantes fosfatados para suprir adequadamente as necessidades das culturas.

As relações entre os valores de P adsorvido e dessorvido nas diferentes concentrações de P adicionado evidenciam a influência da CMAP, EA e do FCP-máx no processo de dessorção de P (Figuras 8 e 9). Isso ocorre porque a CMAP determina o limite de quanto P o solo pode reter, EA reflete a força com que o P está ligado aos sítios de adsorção dos minerais do solo. Já o fator de capacidade de fósforo (FCP) indica a eficiência com que o solo pode liberar o P retido de volta para a solução do solo. Em conjunto, esses fatores controlam o equilíbrio entre o P adsorvido e o dessorvido, influenciando diretamente a disponibilidade de P no solo. Solos com alta CMAP e forte EA tendem a reter o P por mais tempo, dificultando sua dessorção, enquanto solos com menor FCP liberam P mais facilmente, aumentando sua disponibilidade para as culturas

Ao avaliar o ITP, observa-se que os solos LAdma4, LAdma1 e LAdma3 apresentaram os maiores teores de argila, CMAP, EA e FCP-máx. Esses resultados refletem diretamente na adsorção e dessorção de P nesses solos. Nessas condições, para que ocorra aumentos na disponibilidade de P para a solução do solo, é necessário aplicar uma dose substancialmente maior em comparação a outros solos, como o LAdm1, LAdma2 e Lada1, que apresenta menor CMAP, EA e FCP-máx, o que impacta todos os parâmetros relacionados à adsorção e dessorção de P.

Assim, como uma tendência geral, solos com maiores valores de CMAP e ITP apresentaram, também, menor dessorção percentual de P, expressa pela razão entre P dessorvido e P adsorvido nas diferentes concentrações de P adicionado (Figura 8 e 9). Isto demonstra que, adicionalmente à maior capacidade de retenção de P, Latossolos com maiores CMAP e ITP apresentam também menor capacidade de dessorção do P retido para a solução do solo.

O estudo fornece informações relevantes sobre a CMAP e a dessorção de P, contudo, apresenta limitações que devem ser consideradas. A principal restrição reside na elevada variabilidade dos resultados observados entre os diferentes Latossolos analisados, especialmente em relação à EA e ao FCP-máx. Essa heterogeneidade compromete a extrapolação dos dados, uma vez que cada solo apresenta atributos físicos, químicos e mineralógicos específicos que influenciam de forma distinta os processos de adsorção e dessorção de P. Tal cenário reforça a necessidade de estratégias de manejo mais direcionadas, considerando as particularidades de cada classe de solo. Assim, evidencia-se a importância de estudos adicionais que aprofundem a compreensão da CMAP e da dinâmica de dessorção de P em diferentes condições edafoclimáticas, com ênfase em solos tropicais.

5 CONCLUSÃO

- O modelo de Langmuir descreveu satisfatoriamente os dados de adsorção de P, apresentando correlações significativas. Esses resultados indicam que, para os solos da região amazônica, esse modelo representa adequadamente a dinâmica de adsorção do P.
- A Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP) em Latossolos varia em função da mineralogia, do teor de argila e do P remanescente (P-rem), influenciando diretamente a dinâmica do P no solo. A relação entre CMAP e energia de adsorção (EA) reflete a força de retenção do P, impactando sua disponibilidade para as plantas.
- Solos com maior CMAP apresentam maior adsorção e menor disponibilidade de P, enquanto solos com menor CMAP favorecem a dessorção. O Fator de Capacidade Máxima de Fósforo (FCP-máx) demonstrou ser um indicador relevante para avaliar o potencial de retenção de P nos solos estudados.
- Houve grande variação na CMAP, EA e FCP-máx entre os Latossolos, sendo que solos com elevado teor de argila e predomínio de minerais como goethita e hematita apresentaram alta CMAP, atingindo valores de até 1.428,57 mg kg⁻¹ no solo LAdma3. Esses solos também exibiram menor taxa de dessorção, reduzindo a disponibilidade de P e exigindo maior aplicação de fertilizantes fosfatados para suprir a demanda das culturas.
- Os resultados reforçam a importância de estratégias de manejo baseadas nas características de adsorção e dessorção do P, contribuindo para uma recomendação mais adequada de fertilizantes fosfatados, visando uma recomendação mais sustentabilidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ACCIOLY, L.J.O.; DAL BÓ, M.A.; ALVAREZ V., V.H. & RIBEIRO, A.C. Método para determinação do potencial de sulfato em solos. **R. Bras. Ci. Solo**, 9:103-106, 1985.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVAREZ, V. V. H. e FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios de casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 48-55, 1990.
- ANGHINONI, I.; BISSANI, C. A. Fósforo e adubos fosfatados. In: BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J. & CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Fertilidade do solo e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre, Genesis, 2004. v. 1. p. 117-138.
- BAHIA FILHO, A. F. C.; VASCONCELLOS, C. A.; SANTOS, H. L.; MENDES, J. F.; PITTA, G. V. E.; OLIVEIRA, A. C. Formas de fósforo inorgânico e fósforo disponível em um Latossolo Vermelho-Escuro, fertilizado com diferentes fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, n. 1, p. 99-104, 1982.
- BALIGAR, V. C.; FEGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, p. 921-950, 2001.
- BARBOSA, T. M. B. **Mineralogia e disponibilidade de fósforo em solos de terra firme da Amazônia Central**. Tese (Doutorado em Agronomia Tropical). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017, 85p.
- BARROW, N J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, v. 34, p. 733-750, 1983.
- BARROW, N J. Reaction of anions and cations with variable charge soils. *Advances in Agronomy*, [s. l.], v. 38, p. 183-230, 1985.
- BARROW, N J. The description of phosphate adsorption curves. **Journal of Soil Science**, v. 24, p. 447-462, 1978.
- BASTOS, T. X. **O estado atual do conhecimento das condições climáticas da Amazônia brasileira**. In: ZONEAMENTO Agrícola da Amazônia. Belém, PA: IPEAN, 1972. p. 68-122. (IPEAN. Boletim técnico, 54).
- BOUYOUCOS, G. J. The hydrometer method improved for the mechanical analysis of soil. **Soil Science**, v. 23, p. 343-353, 1927.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RadamBrasil: folha S.A 21 Santarém – geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1976.
- CARVALHO, M. A. **Eficiência de dispersantes na análise textural de materiais de solos com horizontes B Latossólico e B textural** (Dissertação). Escola Superior de Agricultura de Lavras Lavras, 1985.
- CHAVES, L. H G.; CHAVES, I. DE B.; NASCIMENTO, A. K. S. DE; SOUSA, A. E. C. Características de adsorção de fósforo em Argissolos, Plintossolos e Cambissolos do Estado da Paraíba. **Engenharia Ambiental**, v. 6, p.130-139, 2009.
- CHEN, R. F.; ZHANG, F. L.; ZHANG, Q. M.; SUN, Q. B.; DONGA, X. Y.; SHENA, R. F. Aluminium-phosphorus interactions in plants growing on acid soils: does phosphorus always alleviate aluminium toxicity? **Journal of the science of food and agriculture**, v. 92 (5), p. 995-1000, 2012.
- CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F.; CURTI, N. Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente Tabuleiros Costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, n. 5, p. 1857-1872, 2008.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Adsorção de fósforo em dez solos do estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum**, v. 33, p. 153- 159, 2011.

DAMACENO, João Batista Dias et al. Physical, Chemical, Morphological and Mineralogical Characterization Surface and Subsurface in Hydromorphic and Non-hydromorphic Soil of the Central Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 4, p. 245, 2020.

EKEBAFE, O. M.; EKEBAFE, L. O. Phosphorus sorption characteristics of amended LPA soils cultivated to oil palm seedlings. **Journal of Scientific Research and Development**, v. 22, n. 1, p. 141-152, 2023.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, Informação Tecnológica. 2009. 627p.

FALCÃO, N. P. S. e SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 34, p. 337-342, 2004.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J. B.; VIDAL, T. J. BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. *Soil & tillage research*, v.155, p. 62-68, 2016.

FONTES, M. R.; WEED, S. B.; BOWEN, L. H. Association of microcrystalline goethite and humic acid in some Oxisols from Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 982-990, 1992.

GÉRARD, F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils - A myth revisited. **Geoderma**, v. 262, p. 213-226, 2016.

GILES, C. H. et al. Studies in adsorption. Part XI. A system for classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific areas of solids. **Journal of the Chemical Society (Resumed)**, v. 2, p. 3973-3993, 1960.

GILES, C. H; SMITH, D. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I. Theoretical. *Journal of colloid and interface science*, **Journal of colloid and interface science**, v. 47, n. 3, p. 755-765, 1974.

GONÇALVES, J. L. M.; FIRME, D. J.; NOVAIS, R. F.; RIBEIRO, A. C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 9, p. 107-111, 1985.

GUEDES, Rafael Silva et al. Maximum Phosphorus Adsorption Capacity Adjusted to Isotherm Models in Representative Soils of Eastern Amazon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 20, p. 2615-2627, 2015.

HANYABUI E, APORI SO, FRIMPONG KA, ATIAH K, ABINDAW T, ALI M, YEBOAH AJ, BYALEBEKA J. Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agric Food**, 5:599-616. 2020.

IRION, G. Soil fertility in the Amazonian rainforest. **Naturwissenschaften**, v. 65, p. 515-519, 1978.

LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001. 176p.

LINHARES, L. A.; OLIVEIRA, C. V. D.; BELLIS, V. M. D. Adsorção de cádmio e chumbo em solos tropicais altamente intemperizados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 291-299, 2009.

MAIA, M. A. M. e MARMO, J. L. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. CPRM, Manaus, 2010, 275 p.

MEHRA, O. P. E. e Jackson, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v. 7, p. 317- 327, 1960.

MENDES, W. D. et al. Efeito de bactérias solubilizadoras de fósforo na cultura da soja no Brasil: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v.11, n. 16, 2022.

MOTTA, P E F et al. Adsorção e formas de fósforo em latossolos: Influência da mineralogia e histórico de uso. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 349–359, 2002.

MURPHY, J. e RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, Oxford, v.27, p.31-36, 1962.

NORRISH, K. e TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. **European Journal of Soil Science**, v. 12, p. 294-306, set. 1961.

NOVAIS, R. F. e SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, pp. 471-450, 2007.

OLSEN, E. R. e WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Science Society of America Journal**, v. 21, n. 2, p. 144-149, 1957.

PANDOLFO, C. **A floresta amazônica brasileira: enfoque econômico-ecológico**. Belém: SUDAM, 1978. 118 p.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in agronomy**, v. 30, p. 1-50, 1979.

PICCOLLA, C. D. **Características químicas de biocarvões produzidos a partir do bagaço de cana-de-açúcar e a disponibilidade de fósforo no solo**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013, 70 p.

RAIJ, B. V (Ed.). **Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes**. Piracicaba-SP: Internacional Plant Nutrition Institute, v. 1, 420 p., 2011. 978-85-98519-07-4.

REIS, C.; FABRIS, J.D.; NOVAIS, R.F.; BAHIA FILHO, A.F.C.; SANTANA, D.P.; CURI, N.; COEY, J.M.D. Cinética de sorção de fósforo em alguns solos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, n.3, p.337-344, 1995.

RODRIGUES, T. E.; PEREIRA, L. C.; GAMA, J. R. N. F.; REGO, R. S.; HENRIQUE, L. M. Uso e Ocupação do Solo da Amazônia Brasileira. In: Anais do Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação de Solo, VIII; 1996; Londrina, Paraná: Londrina, 1996. p. 145-191.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. **Rev. Ampl.** Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SANYAL, S K; DATTA, S K. Chemistry of Phosphorus Transformations in Soil. **Advances in soil science**, v. 16, p. 1–120, 1991.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, n. 1, p. 137-154, mar. 2008.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant physiology**, v. 156, n. 3, p. 997-1005, 2011.

SIMS, J.T; PIERZYUSKI, G.M. Chemistry of Phosphorus in Soils. In: TABATABAI,M.A.; SPARKS, D.L. **Chemical Processes in Soils**. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America, Inc. 2005. p.151-192.

SMOLDERS, Erik et al. The phosphate desorption rate in soil limits phosphorus bioavailability to crops. **European Journal of Soil Science**, v. 72, n. 1, p. 221–233, 2021.

SPARKS, D. L. Elucidating the fundamental chemistry of soils: past and recent achievements and future frontiers. **Geoderma**, v. 100, p. 303–319, 2001.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2017, 574 p

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural materials. **Clays and Clay Minerals**, v. 40, n. 1, p. 14–21, 1992.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Phosphate sorption by natural hematites. **European Journal of Soil Science**, v. 45, n. 1, p. 45-51, 1994.

TUCCI, C. A. F. **Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991. 142p.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, v.62, p.111-118, 2003.

WOODRUFF, J.R.; KAMPRATT, E.J. 1965. Phosphorus adsorption as maximum measured by the langmuir isotherm and its relation hip to phosphorus availability, **Soil. Sci. Soc. Am. Proc.**, 29:148-150.

CAPÍTULO 2: FRACIONAMENTO DE FÓSFORO INORGÂNICO DE EM LATOSSOLOS PREDOMINANTES NO TRÓPICO ÚMIDO

Resumo

O fracionamento do fósforo (P) no solo é essencial para compreender sua disponibilidade para as plantas e dinâmica em solos tropicais, especialmente aqueles com elevados teores de ferro (Fe) e alumínio (Al). Objetivamos avaliar o efeito do tempo de contato fosfato-solo sobre as frações inorgânicas de P e a disponibilidade de P (P-resina) em Latossolos do trópico úmido. Foram coletadas amostras de dez Latossolos do estado do Amazonas, categorizados em quatro grupos conforme o teor de argila e P remanescente (P-rem). Foram conduzidos quatro sub-experimentos (LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4) simultaneamente. Os tratamentos consistiram em cinco tempos de contato do P com o solo (0, 15, 30, 60 e 120 dias), em delineamento inteiramente casualizado, com 15, 6 e 3 repetições para os sub-experimentos LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4, respectivamente. As doses de P aplicadas foram 455, 455, 385, 320 e 185 mg dm⁻³ para LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4, respectivamente, utilizando KH₂PO₄ e (NH₄)₂HPO₄ como fontes. Após os períodos de incubação, realizou-se a extração sequencial das frações inorgânicas de P: 1) fósforo ligado ao alumínio (P-Al); 2) P ligado ao ferro (P-Fe); e 3) fósforo ligado ao cálcio (P-Ca), além da extração do P disponível com resina de troca iônica. Os resultados indicaram que o tempo de incubação (dias) não afetou significativamente ($P < 0,05$) as frações P-Al, P-Fe e P-Ca. O P adicionado ao solo foi predominantemente retido na fração P-Fe, seguido por menor retenção em P-Ca e mínima associação com P-Al. A maior disponibilidade de P-resina ocorreu nos solos que receberam as maiores doses de P e no menor tempo de contato fosfato-solo. Assim, práticas de manejo, como a calagem, podem influenciar a dinâmica e a disponibilidade de P. Estratégias como a aplicação fracionada de fertilizantes fosfatados e o uso de fontes de P de liberação gradual podem ser consideradas para otimizar a eficiência dos fertilizantes fosfatados em solos tropicais.

Palavras chaves: disponibilidade de P, formas de P, adsorção de P, adubação fosfatada.

Abstract

Phosphorus (P) fractionation in the soil is essential for understanding its availability to plants and its dynamics in tropical soils, particularly those with high iron (Fe) and aluminum (Al) contents. We aimed to evaluate the effect of phosphate-soil contact time on the inorganic P fractions and P availability (resin-P) in Oxisols from the humid tropics. Soil samples were collected from ten Oxisols in the state of Amazonas, categorized into four groups based on clay content and remaining phosphorus (P-rem). Four sub-experiments (LAd1, LAd2, LAd3, and LAd4) were conducted simultaneously. Treatments consisted of five phosphate-soil contact times (0, 15, 30, 60, and 120 days) in a completely randomized design, with 15, 6, and 3 replicates for LAd1, LAd2, LAd3, and LAd4, respectively. The applied P doses were 455, 455, 385, 320, and 185 mg dm⁻³ for LAd1, LAd2, LAd3, and LAd4, respectively, using KH₂PO₄ and (NH₄)₂HPO₄ as P sources. After the incubation periods, sequential extraction of inorganic P fractions was performed: 1) aluminum-bound P (P-Al); 2) iron-bound P (P-Fe); and 3) calcium-bound P (P-Ca), in addition to extracting available P using ion-exchange resin. Results indicated that incubation time (days) had no significant effect ($P < 0.05$) on P-Al, P-Fe, and P-Ca fractions. The added P was predominantly retained in the P-Fe fraction, followed by lower retention in P-Ca and minimal association with P-Al. The highest P-resin availability was observed in soils receiving the highest P doses and at the shortest phosphate-soil contact time. Thus, management practices such as liming can influence P dynamics and availability. Strategies such as split applications of phosphate fertilizers and the use of slow-release P sources should be considered to optimize phosphate fertilizer efficiency in tropical soils.

Keywords: P availability, P fractionation, P forms, P adsorption

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um macronutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, desempenhando um papel fundamental na fotossíntese, respiração celular e síntese de ácidos nucleicos (Marschner, 2012; Taiz; Zeiger, 2017). No entanto, em solos tropicais altamente intemperizados, como os Latossolos da Amazônia, a disponibilidade de P é frequentemente limitada, representando um desafio para a agricultura. Esses solos, caracterizados por alta acidez e elevada concentração de alumínio (Al), apresentam formas de P fortemente adsorvidas às partículas do solo, reduzindo sua absorção pelas plantas e comprometendo a produtividade agrícola (Quesada et al., 2012; Withers et al., 2018).

Originados de rochas cristalinas antigas, como granitos e gnaisses, ou sedimentos terciários, esses solos são naturalmente pobres em P. O intenso intemperismo e as condições climáticas aceleram a depleção desse nutriente, resultando em teores totais de P entre 200 e 3000 mg dm⁻³, dos quais menos de 0,1% encontra-se disponível na solução do solo (Curi et al., 2017; Falcão & Silva, 2004).

A fração argila desses solos é dominada por caulinita, além de óxidos e hidróxidos de ferro (goethita e hematita) e alumínio (gibbsita) (Schaefer et al., 2008; Barbosa, 2017). Esses minerais promovem intensa adsorção de P, formando compostos de baixa solubilidade, o que reduz sua disponibilidade para as plantas (Neufeldt et al., 2000; Raij, 2011). Além disso, em pH ácido, o P pode precipitar com Al, Fe e Mn, tornando-se ainda menos acessível (Chien et al., 2009). Assim, cerca de 90% dos solos de terra firme da Amazônia apresentam deficiência de P, exigindo elevadas doses de fertilizantes fosfatados para viabilizar a produção agrícola (Sanchez, 1989; Shen et al., 2011).

A compreensão da dinâmica do P nos solos requer a caracterização de suas frações por meio da extração sequencial com diferentes soluções extratoras (Silva; Raij, 1999). Esse método permite avaliar a distribuição das formas de P e suas interações com os constituintes do solo, considerando sua presença em distintas ligações químicas (Raij; Feitosa, 1980; Shao et al., 2019). Entre os métodos de fracionamento, destaca-se o de Chang e Jackson (1957), que quantifica as principais frações de fósforo inorgânico (Pi), incluindo P associado ao Al (P-Al), ao Fe (P-Fe) e ao Ca (P-Ca) (Gatiboni et al., 2013).

O procedimento envolve a extração sequencial de P utilizando NH₄Cl (P solúvel), NH₄F (P-Al), NaOH (P-Fe) e H₂SO₄ (P-Ca) (Wang et al., 2010). Em seguida, a amostra pode ser tratada com ditionito de sódio, que solubiliza os óxidos de Fe e libera o P ocluso (Raij, 2011).

Em solos tropicais, a distribuição das frações inorgânicas de P segue a ordem P-Fe > P-Al > P-Ca (Raij, 2004). No entanto, a labilidade do P diminui na sequência P-Al > P-Fe > P-Ca

(Novais; Kamprath, 1978), sendo as frações P-Fe e P-Al predominantes em solos altamente intemperizados, como os do Cerrado. Em solos da Carolina do Norte (EUA), Novais e Kamprath (1978) verificaram maior liberação de P-Al, seguido de P-Fe e P-Ca, embora essa distribuição varie conforme o solo (Novais; Smyth, 1999). Avaliando frações inorgânicas em em Latossolos do estado do Amazonas (P-Al, P-Fe e P-Ca), Monteiro (2021) identificou maiores concentrações na fração P-Fe, seguidas por P-Ca e, por fim, P-Al, resposta provavelmente as elevadas quantidades de goethita e hematita encontradas nos solos. No extrator Mehlich 1, a ordem de labilidade segue $P\text{-Fe} < P\text{-Al} < P\text{-Ca}$ (Thomas & Peaslee, 1973).

Pereira et al. (2020) confirmaram que frações de P ligadas ao Fe e Al predominam em solos mais intemperizados e ácidos, corroborando os achados de Souza Junior et al. (2012) em solos da Paraíba, Brasil, onde P-Al e P-Fe foram as formas predominantes sob pH ácido e baixos teores de Ca, enquanto em solos alcalinos, P-Ca foi mais expressivo. Barbosa et al. (2013), ao estudarem solos do Amazonas, também verificaram a predominância de P-Fe, seguido de P-Al e P-Ca. Esses resultados confirmam a relação entre intemperismo, acidez e a fixação de P por Fe e Al ou sua adsorção em sesquióxidos (Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Ranno et al., 2007; Novais; Smyth, 1999; Wang et al., 2010).

Em experimentos com Latossolo Vermelho-Escuro argiloso, Bahia Filho et al. (1982) observaram que o superfosfato triplo (SFT) elevou os teores de P-Al, P-Fe e P-Ca, enquanto o fosfato de Araxá influenciou apenas P-Ca e o termofosfato Yoorin apenas P-Fe. Já Santos et al. (2008) constataram que a adubação parcelada com fontes de diferentes solubilidades (SFT, fosfato natural reativo e termofosfato magnésiano) resultou em maior acúmulo de P nas frações mais lábeis (P-resina e P-bicarbonato inorgânico), evidenciando que tanto a fonte quanto a forma de aplicação influenciam a disponibilidade de P.

A caracterização dessas frações permite uma melhor compreensão da disponibilidade de P para as plantas, contribuindo para aprimorar o manejo da fertilidade do solo, especialmente em ecossistemas tropicais como a Amazônia. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do tempo de contato entre fosfato e solo sobre as frações inorgânicas de P e sua disponibilidade (P-resina) em Latossolos do trópico úmido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização geral da área de estudo

As unidades geológicas das áreas de coleta são constituídas predominantemente pela formação Alter do Chão, composta por sedimentos variados do período Cretáceo (Rodrigues *et al.*, 1996). Esta formação inclui sedimentos argilo-arenoso do Cretáceo superior (Corrêa *et al.*, 2008), cuja composição do material de origem não é conhecida (IRON, 1978). O relevo predominante é o dissecado em tabuleiros, vindo a seguir as colinas que margeiam os lagos ou planícies com cotas variando de 50 a 200 m (Rodrigues *et al.*, 1996).

O clima dominante na região é tropical equatorial, do grupo Af, com precipitação anual aproximada de 2.420 mm. O mês mais seco é agosto, com média de 80 mm de precipitação, conforme a classificação climatológica de Köppen-Geiger (Alvares *et al.*, 2013). O regime térmico da região é caracterizado por temperaturas médias de 26,7°C, com variações sazonais entre 25,9°C e 27,7°C (Alvares *et al.*, 2013). A umidade relativa do ar é, geralmente, superior a 64%, com média anual em torno de 80% (Bastos, 1972).

A ordem de solo predominante na região estudada é o Latossolo Amarelo, seguido pelo Argissolo Amarelo (BRASIL, 1976). Os constituintes desses solos estão expostos a cerca de 20 milhões de anos de intemperismo (Irion, 1978), o que contribuiu para que aproximadamente 85% deles apresentem forte acidez (Baligar *et al.*, 2001), com P em níveis deficientes e Al em níveis tóxicos coexistindo (Chen *et al.*, 2012). No entanto, esses solos, especialmente os Latossolos, apresentam boas condições físicas (MAIA; MARMO, 2010).

No presente estudo utilizamos amostras de dez Latossolos Amarelos distróficos, coletadas em seis municípios do Estado do Amazonas (Iranduba, Manacapuru, Presidente Figueiredo, Manaus, Itacoatiara e Rio Preto da Eva), conforme descrição na Tabela 6. A coleta foi ambiente de terra firme, sob vegetação nativa (floresta ombrófila aberta) (Pandolfo, 1978). A seleção dos locais foi feita procurando abranger ampla faixa de solos que já vem sendo explorados com fins agrícolas na região, conforme orientação dos técnicos do Instituto de Desenvolvimento Agropecuário e Florestal Sustentável do Estado do Amazonas (IDAM).

Tabela 6. Classe textural dos solos, localização e pontos de coleta das amostras de solo.

Solo*	Município	Coordenadas geográficas
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1)	Iranduba	03° 12' 01" S e 60° 13' 01" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2)	Presidente Figueiredo	02° 39' 15" S e 60° 03' 19" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1)	Itacoatiara	02° 55' 51" S e 59° 09' 06" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2)	Manacapuru	03° 15' 17" S e 60° 39' 28" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3)	Iranduba	03° 12' 22" S e 60° 09' 47" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4)	Manaus	03° 06' 11" S e 59° 58' 32" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1)	Manacapuru	03° 06' 02" S e 59° 58' 28" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2)	Rio Preto da Eva	02° 42' 37" S e 59° 26' 17" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3)	Presidente Figueiredo	01° 25' 18" S e 60° 15' 20" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4)	Manaus	02° 39' 41,4" S e 60° 07' 57,5" W

*Santos et al. (2018)

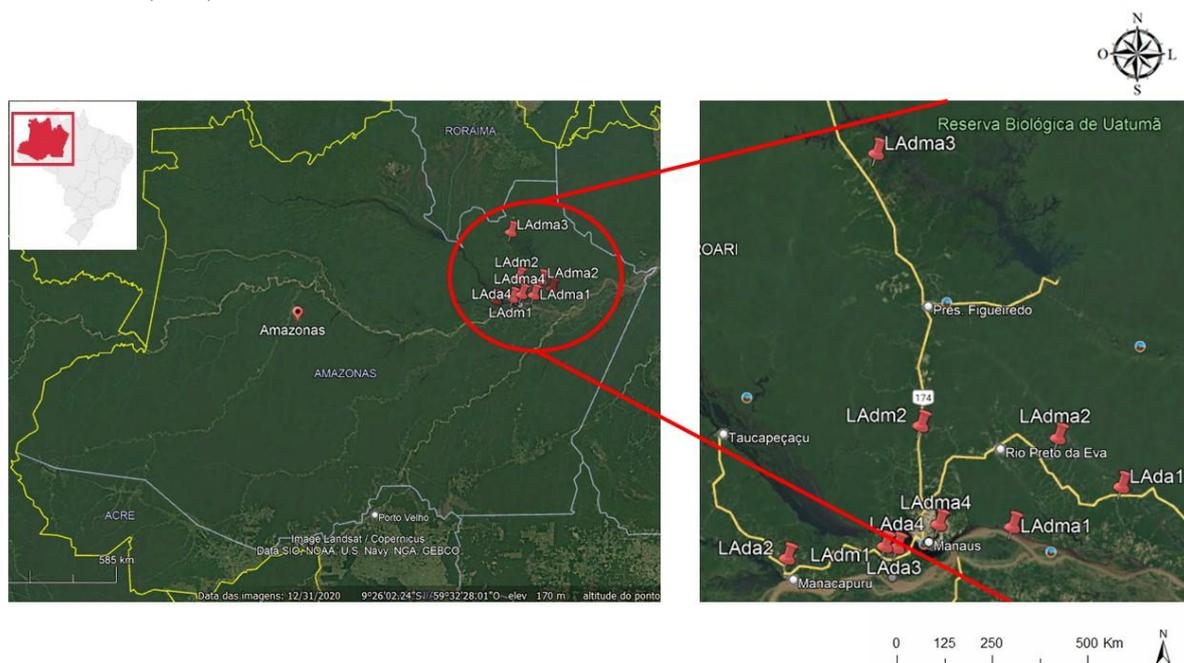


Figura 10. Localização das áreas de estudo e pontos de coleta das amostras de solo (Autor, 2024)

2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os 10 solos em estudo foram agrupados em quatro categorias com base na similaridade dos valores de P remanescente (P-rem), formando quatro experimentos distintos. Essa abordagem permitiu a aplicação de doses específicas de P em cada experimento, conforme a recomendação de Alvarez V. e Fonseca (1990).

Dessa forma, os solos receberam as seguintes doses de P: 455 mg dm^{-3} para os Latossolos de Presidente Figueiredo (LAdma3) e Manacapuru (LAdma1); 385 mg dm^{-3} para os solos de Manacapuru (LAda2) e Fazenda UFAM (LAdma4); 320 mg dm^{-3} para os Latossolos da UFAM (LAda4), Rio Preto da Eva (LAdma2), Iranduba (LAda3), Itacoatiara (LAda1) e Presidente Figueiredo (LAdm2); e 185 mg dm^{-3} para o solo de Iranduba (LAdm1).

Com base nessas doses, foram conduzidos quatro experimentos simultaneamente, cada um correspondendo a uma faixa de aplicação de P, conforme apresentado na Tabela 5. Os tratamentos foram compostos por cinco períodos de incubação do fósforo no solo (0, 15, 30, 60 e 120 dias). O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, com três repetições por tratamento. No total, o Experimento 1 (LAd1) contou com 75 unidades experimentais, os Experimentos 2 e 3 (LAd2 e LAd3) com 30 unidades experimentais cada, e o Experimento 4 (LAd4) com 15 unidades experimentais.

2.3 Procedimentos específicos

2.3.1 Coleta e preparação das amostras de solo

A coleta dos solos foi feita na camada superficial de 0-20 cm de profundidade e, em único ponto representativo da área, onde os solos estavam bem preservados quanto as suas características originais. Após a coleta, as amostras de solos foram destorroadas, homogeneizadas, secas à sombra e passadas em peneira de 4,0 mm. Em seguida foram retiradas subamostras dos solos que foram passadas em uma peneira de 2,0 mm de abertura para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

2.3.2 Caracterização química, granulométrica e mineralógica dos solos

As subamostras de solo foram caracterizadas quimicamente quanto a pH em H₂O; fósforo (P) disponível (extrator resina) e P-remanescente (P-rem); formas disponíveis de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio trocável (Al³⁺); acidez potencial, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva e CTC potencial, conforme Teixeira *et al.* (2017). Com base nesses dados foram estimados os índices de saturação por bases (V%) e saturação por Al (m%). Além desses atributos, foram avaliados os teores dos micronutrientes cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) que foram extraídos pelo extrator Mehlich-1 e, o boro (B) extraído por água quente conforme metodologia Embrapa (2009) (Tabela 7). Nós extraímos e determinamos o fósforo remanescente (P-rem) de acordo com o método descrito por Alvarez *et al.* (2000). 5,0 cm³ de TFSA foi colocado em erlenmeyer e misturado com 50 ml de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ contendo 60 mg L⁻¹ de P, com uma relação solo: solução de 1:10. Os erlenmeyers foram agitados em agitador com movimento circular-horizontal durante cinco minutos a 200 rpm e, deixados em repouso durante 16 horas, para decantação do solo. Após esse período foi coletada uma alíquota do sobrenadante (solução de equilíbrio) para a determinação do P por colorimetria, de acordo com Murphy e Riley (1962).

Tabela 7. Atributos químicos dos solos utilizados no estudo na profundidade de 0 - 20 cm.

Solo	pH	P	K	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al	t	T	V	m	M.O.S	P-rem
		mg dm ⁻³	-----cmolc kg ⁻¹ -----	-----%-----	dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹							
LAdm1	4,1	2,3	10	0,1	0,1	1,4	10,9	1,6	11,2	2	85,9	2,48	22,22
LAdm2	4,4	1,4	8	0,1	0,1	0,8	4	1	4,3	5,2	78,4	1,18	18,88
LAda1	4,2	1,4	8	0,1	0,1	1,2	8,8	1,4	9	2,4	84,5	1,87	17,11
LAda2	4,4	3,2	16	0,2	0,1	1,4	9,8	1,7	10,2	3,4	80,5	2,61	12,53
LAda3	4	2,6	12	0,1	0,1	1,6	10,9	1,8	11,2	2,1	87,4	2,48	17,11
LAda4	3,9	2,9	14	0,2	0,1	1,4	9,8	1,7	10,2	3,3	80,5	1,87	15,49
LAdma1	4,7	5,8	20	0,8	0,2	1,8	12,3	2,8	13,3	7,9	63,2	3,28	5,47
LAdma2	4,1	2,6	10	0,2	0,1	1,2	8,8	1,5	9,1	3,6	78,4	1,64	17,71
LAdma3	4,1	2	10	0	0,1	1,2	8,8	1,4	9	2,5	83,9	2,11	5,79
LAdma4	4,4	1,71	10	0,25	0,2	1,1	5,05	1,55	5,5	8,21	70,97	1,64	17,71

LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4).

A análise granulométrica foi feita na TFSA pelo método Bouyoucos (1927) modificado por Carvalho (1985), utilizando NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico, e agitação durante 16 h e a 30 rpm em agitador rotatório tipo Wagner, sendo a fração areia (2 - 0,053 mm) separada através de tamisagem. Os minerais da fração argila hematita (Hm), goethita (Gt), caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) foram caracterizados por difratometria de raio-X (DRX) pelo método do pó após a concentração dos óxidos de ferro fervendo a fração argila com NaOH (NORRISH e TAYLOR, 1961) e desferrificação da fração argila pelo método de Mehra e Jackson (1960). As amostras foram difratadas com velocidade de varredura de 1° 2θ min⁻¹ utilizando Mini-Flex Rigaku II (20mA, 30 kV), equipado com radiação Cu Kα (Tabela 8).

Tabela 8. Teores de goethita (Gt), hematita (Hm), relação entre Hm/(Hm + Gt), ferro extraído com ditionito (Fed), ferro extraído com oxalato (Feo), relação ferro oxalato/ferro ditionito (Feo/Fed) e granulometria dos solos do Amazonas.

Solo	Gt	Hm	Hm/(Hm + Gt)	Fed	Feo	Feo/Fed	Areia	Silte	Argila
	----- g kg ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----		-----g kg ⁻¹ -----	-----g kg ⁻¹ -----		----- dag kg ⁻¹ -----	----- dag kg ⁻¹ -----	----- dag kg ⁻¹ -----
LAdm1	51,5	5,72	11	3,8	0,14	0,04	77	1	22
LAdm2	5,26	21,3	82	2	0,15	0,08	69	9	22
LAda1	16,2	24,6	63	2,9	0,11	0,04	61	3	36
LAda2	14,9	53,4	80	5	0,31	0,06	61	3	36
LAda3	49,5	18,6	29	4,7	0,24	0,05	56	5	39
LAda4	13,7	11,5	48	1,8	0,15	0,08	37	8	55
LAdma1	59,7	10,5	16	4,7	0,19	0,04	32	6	62
LAdma2	30,6	3,35	11	2,3	0,14	0,06	22	11	67
LAdma3	8,82	23,4	75	2,6	0,39	0,15	5	21	74
LAdma4	3,62	26,4	89	2,3	0,27	0,11	15	3	82

LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4).

2.3.3 Correção do solo e aplicação dos tratamentos e condução do experimento

Os solos foram corrigidos com uma mistura de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio puro para análise (p.a) na relação estequiométrica Ca:Mg de 4:1, adotando-se o critério de aumentar a saturação por bases (V) a 60% e, posteriormente os solos foram incubados por 30 dias. As doses de corretivos foram definidas conforme curvas de incubação (DUNN, 1943) determinadas via experimentos de laboratório (Batista, 2014).

Após esse período, os solos foram secos e em seguida foi realizada a aplicação dos tratamentos utilizando como fontes o KH_2PO_4 e $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Na aplicação da fonte, o solo de cada vaso foi exposto em uma bandeja, onde recebeu a solução com as doses de P e, posteriormente foram misturados (de forma manual) de modo homogêneo com o solo. Após o fornecimento dos fertilizantes, individualizado por tratamentos, o solo foi devolvido individualmente para cada vaso, onde foi incubado novamente por 120, 60, 30, 15 e 0 dias, para que ocorresse o melhor equilíbrio das fontes de P com o solo. Os períodos de incubação foram iniciados em diferentes épocas, para que, em um mesmo e último dia, os diferentes períodos de equilíbrio P-solo fossem satisfeitos. Durante as fases de incubação dos solos, a umidade foi mantida equilibrada em aproximadamente 60% da capacidade de campo, por meio do fornecimento de água deionizada.

Nós utilizamos vasos plásticos de polietileno, sem poros de drenagem, possuindo capacidade volumétrica de $3,0 \text{ dm}^3$, como recipiente.

2.3.4 Avaliação dos experimentos e variáveis analisadas

As amostras de solo ($\approx 0,5 \text{ dm}^3$) foram coletadas aos 120, 60, 30, 15 e 0 dias após aplicação dos tratamentos, em cada unidade experimental. Essas amostras foram preparadas para a obtenção da TFSA, para avaliar a disponibilidade de P (extrator resina) e as frações inorgânicas de P.

2.3.5 Extração das frações inorgânicas de fósforo

A extração e determinação das frações inorgânicas de P no solo foi realizada conforme metodologia de Chang e Jackson (1957) com adaptação para o uso de terra fina seca ao ar (TFSA). As alterações realizadas do método original foram as seguintes: 1) remoção da extração e determinação da fração P- H_2O , por esta representar uma baixa quantidade nos solos tropicais (Kuo, 1996; Gatiboni *et al.*, 2013); 2) remoção da etapa de extração e determinação da fração P-Ocluso, por representar uma fração pouco usualmente determinada e de difícil caracterização (Novais ; Smyth, 1999); 3) as amostras de solo estavam no tamanho de TFSA; 4) o solo foi lavado apenas uma vez com uma solução de NaCl 1M, após a extração de cada fração.

As amostras de solo foram submetidas a uma extração sequencial das frações inorgânicas de P. As frações de P determinadas no solo foram: a) fósforo ligado ao alumínio (P-Al), extraído por meio de uma solução de fluoreto de amônio (NH_4F $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em pH 8,5); b) fósforo ligado ao ferro (P-Fe), obtido com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH 0,1

M) e c) fósforo ligado ao cálcio (P-Ca), extraído com uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4 0,25 M). Durante a fase de extração de todas as frações, as amostras foram agitadas a 150 rotações por minutos (rpm) e centrifugadas a 1800 rpm.

Determinação de P: A determinação da concentração de P, em todos os extratos, foi feita por espectrofotometria a 660 nm, de acordo com Murphy e Riley (1962).

2.4 Análise estatística dos dados

Os resultados foram previamente submetidos ao teste de detecção de outliers e posteriormente testados quanto à normalidade (Shapiro-Wilk, 1965) e homogeneidade de variância (LEVENE, 1960) a um nível de significância de 10%. Como as variáveis P-Al, P-Fe, P-Ca e P-resina atenderam a essas condições, então quando o F foi significativo, as médias dessas variáveis foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

3 RESULTADOS

3.1 Fracionamento das formas inorgânicas de P no solo

Em relação ao padrão de resposta das frações inorgânicas de P ligadas ao alumínio (P-Al), ferro (P-Fe) e cálcio (P-Ca) e da disponibilidade de P (P-resina) no solo em função do tempo de contato em dia (15, 30, 60 e 120), verificamos pouco efeito dos tratamentos sobre as frações inorgânicas, entretanto sobre a disponibilidade de P, notamos variação significativa (Tabela 9) ($P \leq 0,50$).

Os valores de P-Al foram baixos em todos os solos (LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4), indicando pouca interação do Al com o P disponível (Tabela 9). Em alguns tratamentos, os valores iniciais foram próximos a zero, sugerindo que a adsorção do P em óxidos de Al não foi predominante. A fração de P-Fe apresentou os maiores valores em todas as amostras, com uma tendência de redução ao longo do tempo (Tabela 9). Esse padrão de resposta sugere que parte do P inicialmente adsorvido nos óxidos de Fe pode estar sendo liberado para a solução do solo ou redistribuído entre outras frações. Com relação ao P-Ca, os valores foram considerados intermediários, sem grandes variações ao longo do tempo (Tabela 9). Isso sugere que os solos estudados possuem baixa reatividade com o Ca para a formação de compostos fosfatados, o que pode estar relacionado ao pH dos solos.

Tabela 9. Efeito do tempo de contato fosfato-solo sobre as frações inorgânicas de fósforo (P) ligado a alumínio (P-Al), fósforo ligado a ferro (P-Fe), fósforo ligado a cálcio (P-Ca) e, fósforo disponível (P-resina) (n=4) no solo.

Frações de P (mg dm ⁻³)	Tempo (dias)				
	0	15	30	60	120
Experimento 1- LAd1					
P - Al	0,06 A	0,04 A	0,00 A	0,02 A	0,04 A
P- Fe	239,8 A	251,3 A	238,76 A	240,09 A	221,11 A
P - Ca	33,31 A	32,5 A	34,73 A	34,59 A	32,41 A
P-resina (mg kg ⁻¹)	191,99 A	177,74 AB	152,66 BC	142,83 C	124,38 C
Experimento 2 - LAd2					
P - Al	1,47A	1,6 A	1,66 A	1,54 A	1,72 A
P- Fe	430,89 A	398,85 A	380,2 A	405,26 A	389,91 A
P - Ca	79,66 A	74,37 A	41,26 A	71,61 A	80,73 A
P-resina (mg kg ⁻¹)	279,15A	252,56AB	196,52AB	190,41B	186,29B
Experimento 3 - LAd3					
P - Al	0 A	0 A	0 A	0 A	0 A
P- Fe	349,84 A	358,36 A	341,34 A	333,79 A	318,1 A
P - Ca	36,84 A	35,72 A	35,34 A	33,59 A	32,84 A
P-resina (mg kg ⁻¹)	210,78A	176,41B	172,24B	146,23C	157,43BC
Experimento 4 - LAd4					
P - Al	1,41 A	3,53 A	6,35 A	8,47 A	7,41 A
P- Fe	146,27 A	164,72 A	168,85 A	163,27 A	151,61 A
P - Ca	32,23 A	32,47 A	31,75 A	30,32 A	25,99 A
P-resina (mg kg ⁻¹)	80,50B	60,33B	124,86 A	67,01 B	47,96 B

LAd1 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4), LAd2 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3), LAd3 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura

argilosa (LAd2) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAd4) - LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAd1). Linhas seguidas de mesmas letras não diferem significativamente, pelo teste de Tukey, a 10% de probabilidade.

O P extraído por resina (P-resina) é um indicativo da fração potencialmente disponível para as plantas. Os valores dessa fração diminuíram ao longo do tempo de incubação, o que indica um processo de adsorção progressiva do P aplicado (Tabela 9) ($P \leq 0,50$). Houve uma redução significativa na disponibilidade de P ao longo dos 120 dias de incubação em todos os experimentos (LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4), evidenciando a adsorção de P pelos constituintes do solo. Verificou-se que no tempo zero dias de contato os experimentos LAd1, LAd2 e LAd3 a recuperação foi acima de 50%, em LAd4 foi 40%. Por outro lado, aos 120 dias de contato em LAd1, LAd2 e LAd3 a recuperação de P foi entorno de 40% e em LAd4 foi de 25%. Observamos também que os maiores teores de P foram obtidos em LAd2, seguido por LAd3 e LAd1 e por último da LAd4. Também,

A Tabela 10 apresenta as correlações entre as frações inorgânicas de P e a disponibilidade de P-resina para os diferentes experimentos (LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4) ($P \leq 0,50$). A correlação de Pearson revela como essas frações interagem e influenciam a disponibilidade do P no solo.

O P-Fe apresentou correlação significativa com o P-Ca em LAd1 ($r = 0,65^{**}$) e LAd2 ($r = 0,50^{**}$), sugerindo que, nesses solos, há uma relação entre essas frações na dinâmica do P. O P-Al teve correlação positiva significativa com P-Fe apenas em LAd2 ($r = 0,56^{**}$), indicando que, nesse solo específico, essas frações podem estar participando conjuntamente da adsorção do P. No solo LAd3, observou-se uma correlação positiva entre P-Fe e P-Ca ($r = 0,57^{**}$), reforçando a hipótese de que a fixação do fósforo pode estar ocorrendo por múltiplos mecanismos envolvendo Fe e Ca (Tabela 10). As correlações entre o P-resina e as frações inorgânicas de P foram, em sua maioria, não significativas, indicando que a disponibilidade do P no solo pode estar sendo controlada por outros fatores além dessas frações inorgânicas específicas.

O solo LAd2 apresentou mais correlação entre as frações de P, sugerindo que a dinâmica do P nesse solo pode estar mais dependente da interação entre os óxidos de ferro, alumínio e cálcio. Em LAd1 e LAd4, as correlações foram menos expressivas, indicando que outros fatores, como mineralogia do solo e matéria orgânica, podem estar controlando a disponibilidade de fósforo nesses sistemas.

Tabela 10. Correlação entre as frações inorgânicas de fósforo ligado a alumínio (P-A), a ferro (P-Fe) e a cálcio (P-Ca) com a disponibilidade de P (P-resina) em LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4.

Variáveis	LAd1			LAd2			LAd3			LAd4		
	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-Al	P-Fe	P-Ca
P-Fe	0,08 ^{ns}			0,56 ^{**}			0 ^{ns}			0,20 ^{ns}		
P-Ca	0,12 ^{ns}	0,65 ^{**}		0,42 [*]	0,50 ^{**}		0 ^{ns}	0,57 ^{**}		-0,32 ^{ns}	0,41 ^{ns}	
P-resina	0,12 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,31 ^{ns}

LAd1 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4), LAd2 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1), LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3), LAd3 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2) e LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4), LAd4 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1). ^{ns} = não significativo; (**), (*) significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

4 DISCUSSÃO

4.1 Fracionamento das formas inorgânicas de P no solo

A dinâmica das frações inorgânicas de fósforo (P) no solo é influenciada pela mineralogia, a textura e o tempo de contato com o fertilizante fosfatado. No presente estudo, observamos que, de maneira geral, as frações inorgânicas de P ligadas ao alumínio (P-Al), ferro (P-Fe) e cálcio (P-Ca) apresentaram pouca variação ao longo do tempo, enquanto a disponibilidade de P (P-resina) foi substancialmente reduzida com o passar dos dias (Tabela 9).

Os valores de P-Al foram baixos em todos os solos analisados (LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4), sugerindo uma baixa afinidade do P com os óxidos de Al presentes nesses Latossolos. A literatura demonstra que a adsorção de P por Al ocorre predominantemente em solos com maiores teores de gibbsita (Schaefer; Fabris; Ker, 2008), o que pode não ser o caso dos solos estudados. Além disso, a ausência de variação significativa ao longo do tempo reforça a ideia de que o Al não desempenha um papel central na adsorção do P nesses solos.

Nossos resultados demonstram que a quantidade de P-Al durante o período de incubação foi baixa, em todos os experimentos (LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4). Esse resultado pode ser atribuído a dois fatores principais: (1) a provável reação do P aplicado com o Ca proveniente do calcário, reduzindo a disponibilidade de P associada ao Al (P-Al); (2) a ausência de gibbsita $[Al(OH)_3]$ nas amostras de solo analisadas (Barbosa, 2017), uma vez que esse mineral poderia contribuir para o aumento dos teores de P ligado ao Al. Foram detectados apenas picos de caulinita $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$, e, embora esse seja um dos principais constituintes da fração argilosa, em solos tropicais altamente intemperizados, seu papel na dinâmica das frações inorgânicas de P é limitado. Devido à sua estrutura cristalina e baixa área de superfície específica, a capacidade da caulinita de adsorver P é consideravelmente menor quando comparada a minerais como goethita e hematita, que apresentam áreas de superfície muito maiores e maior afinidade pela adsorção de P (Cessa et al., 2009).

A fração P-Fe, por outro lado, apresentou os maiores valores em todas as amostras, com uma tendência de redução progressiva ao longo do tempo (Tabela 9). Esse padrão de resposta é típico de solos com elevada concentração de óxidos de Fe, onde o P inicialmente adsorvido pode sofrer redistribuição para outras frações ou ser liberado para a solução do solo. A redução da fração P-Fe pode ser explicada pelo fenômeno de dessorção lenta, em que o P ligado a sítios de alta energia nos óxidos de Fe se torna gradualmente disponível à solução do solo. Esse processo é particularmente relevante para a nutrição das plantas, pois sugere que parte do P previamente adsorvido possa ser liberada para solução do solo.

Os resultados do fracionamento de P estão em conformidade com aqueles comumente observados em solos ácidos brasileiros, caracterizados pelo predomínio da fração P-Fe, o que reflete o avançado estágio de intemperismo desses solos (Motta et al., 2002). À medida que os solos se tornam mais ácidos, devido à remoção de sílica e bases trocáveis, há um aumento na atividade de Fe e Al, promovendo a conversão das formas solúveis de P-Ca em P-Fe e P-Al (Chang; Jackson, 1958). Esse processo resulta em altas taxas de conversão do P adicionado ao solo para formas menos disponíveis, destacando a importância da mineralogia oxidada na adsorção de P em solos altamente intemperizados (Barbosa-Filho; Kinjo; Muraoka, 1987).

A predominância da fração P-Fe nesses solos se intensifica com o aumento do tempo de contato entre o fosfato e os minerais do solo, favorecendo a estabilização do P na forma P-Fe (Silva et al., 2003). Essa resposta pode ser atribuída às elevadas quantidades de goethita (3,62 a 59,7 g kg⁻¹) e hematita (3,35 a 53,4 g kg⁻¹) verificadas nos solos (Tabela 8), uma vez que esses óxidos de Fe apresentam alta seletividade pelo fosfato em detrimento de outros ânions concorrentes (Wendling et al., 2013). Esse efeito se deve à forte adsorção do P pelos óxidos de Fe, que pode afetar até 60% dos solos altamente intemperizados, levando à formação de compostos de baixa labilidade (Roy et al., 2016; Falcão; Silva, 2004).

Conforme demonstrado na Tabela 3, os Latossolos avaliados apresentam elevada Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), com 80% das amostras exibindo valores classificados como altos (500 a 1.000 mg kg⁻¹) ou muito altos (> 1.000 mg kg⁻¹) (Guilherme et al., 2000). Esse padrão está diretamente associado a características intrínsecas dos solos, como teor de argila, mineralogia, grau de cristalinização dos minerais, teor de matéria orgânica e pH, que influenciam a fixação de P ao potencializar a disponibilidade de sítios de adsorção. Esses fatores afetam não apenas a CMAP, mas também a energia de adsorção (EA) e o Fator de Capacidade Máxima de Fósforo (FCP-máx), destacando o papel da mineralogia e das propriedades físico-químicas do solo na retenção e disponibilidade de P (Motta et al., 2002).

Avaliando o efeito de diferentes proporções e modos de aplicação de misturas de superfosfato triplo com fosfato natural reativo de Arad nas frações inorgânicas (P-Al, P-Fe e P-Ca) de um Latossolo Amarelo Distrófico de textura muito argilosa, com predomínio de minerais, goethita (3,62 g kg⁻¹) e hematita (26,39 g kg⁻¹). Monteiro (2021) identificou maiores concentrações na fração P-Fe, seguidas por P-Ca e, por fim, P-Al, resposta compatível com as obtidas neste estudo. As elevadas quantidades de goethita e hematita encontradas nos solos estudados explicam as altas concentrações de P associadas à fração P-Fe, uma vez que os óxidos de Fe apresentam alta seletividade pelo fosfato em comparação com ânions concorrentes.

O P-Ca apresentou valores intermediários e pouca variação ao longo do tempo, indicando que os solos estudados possuem baixa reatividade com o Ca para a formação de compostos fosfatados. Essa estabilidade sugere que a precipitação de P como fosfato de Ca não é um processo dominante nesses solos, possivelmente devido ao pH ácido característico dos Latossolos analisados. A formação de fosfatos de Ca é mais expressiva em solos calcários ou com teores elevados de Ca solúvel, condições que não se aplicam à maioria dos Latossolos da região amazônica.

O resultado da fração P-Ca, pode ser atribuído a práticas de manejo, como a calagem, que eleva o pH do solo. Com o aumento do pH, ocorre uma maior liberação de formas de P mais facilmente disponíveis, como o P-Ca (Barbosa-Filho; Kinjo; Muraoka, 1987). No entanto, o P presente nessa fração só se torna disponível para as plantas caso haja uma diminuição no pH ou nos teores de P e Ca em solução (Smiley, 1974). Valores superiores de P-Ca em relação ao P-Al também foram obtidos por Monteiro (2021), ao avaliar o fracionamento de P em Latossolo Amarelo no estado do Amazonas.

A fração P-resina, que representa o P potencialmente disponível para as plantas, diminuiu de forma significativa ao longo dos 120 dias de incubação. Essa resposta reflete a adsorção gradualmente progressiva do P aplicado aos constituintes do solo, especialmente os óxidos de Fe e Al. Os solos mais argilosos (LAd2 e LAd3) apresentaram as maiores reduções no P-resina, o que corrobora a hipótese de que solos com maior teor de argila possuem maior capacidade de adsorção de P devido à presença de um maior número de sítios de adsorção específicos.

A redução na disponibilidade de P ao longo do tempo pode impactar diretamente a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados, uma vez que a fixação do P pelo solo reduz sua disponibilidade no solo para a absorção pelas plantas. A dinâmica de P no solo é substancialmente influenciada pela concentração e pelo tempo de contato de P com o solo (Gonçalves et al., 1985). Normalmente, estima-se que mais de 90% do P aplicado ao solo passa para formas menos disponíveis nas primeiras horas de contato P-solo, podendo esse processo se estender por vários dias ou semanas, ocorrendo em primeiro instante uma reação rápida e em seguida uma reação mais lenta (Gonçalves et al., 1985).

O estudo demonstra que os solos LAd1, LAd2 e LAd3 apresentaram maior taxa de recuperação de P ao final dos 120 dias de incubação (40%), em comparação com o solo LAd4 (25%). A maior recuperação foi observada nos solos de textura argilosa e muito argilosa (Tabela 8), evidenciando a influência da textura na dinâmica do fósforo. Esse padrão de resposta pode estar relacionado às doses de P aplicadas, que foram de 320, 455, 385 e 185 mg dm⁻³ para os

solos LAd1, LAd2, LAd3 e LAd4, respectivamente. Dessa forma, verifica-se que os elevados teores de P recuperados estão diretamente associados às doses de P aplicadas. Um comportamento semelhante foi observado por Broggi et al. (2010), ao avaliarem a recuperação de P por diferentes extratores em função do tempo de contato fosfato-solo. Os autores verificaram que, aos 90 dias de incubação, a taxa de recuperação do P variou de 2% a 51% do P aplicado, dependendo das características do solo, resultado compatível com os obtidos neste estudo.

A correlação positiva entre P-Fe e P-Ca nos solos LAd1 ($r = 0,65^{**}$) e LAd2 ($r = 0,50^{**}$) indica que parte do P associado ao Ca pode estar sendo redistribuído para formas mais lábeis ou prontamente adsorvido pelos óxidos de Fe. Essa resposta pode estar relacionado à dissolução parcial de fosfatos de Ca e à subsequente adsorção do P pelos óxidos de Fe e Al, fenômeno amplamente descrito em solos altamente intemperizados (Sanchez et al., 1997; Fink et al., 2016).

No solo LAd2, a correlação significativa entre P-Al e P-Fe ($r = 0,56^{**}$) sugere um processo sinérgico de adsorção entre óxidos de Fe e Al, reforçando a hipótese de que, nesse solo, a dinâmica do P é fortemente controlada pela mineralogia oxidica. Estudos anteriores demonstram que, em solos tropicais, a formação de complexos binários e ternários entre P, Fe e Al reduz a disponibilidade do nutriente na solução do solo, especialmente em condições de pH ácido (Barrow, 2017).

A correlação entre P-Fe e P-Ca também foi significativa em LAd3 ($r = 0,57^{**}$), sugerindo que, além da adsorção nos óxidos de Fe, pode haver a coexistência de mecanismos secundários de retenção de P por fosfatos de cálcio remanescentes ou neoformados. Esse efeito pode ser mais pronunciado em solos com aporte de P via fertilizantes fosfatados ou materiais de origem contendo Ca (Roy et al., 2016).

A ausência de correlações significativas entre P-resina e as frações inorgânicas de P na maioria dos solos analisados sugere que a disponibilidade de P não é explicada apenas pela redistribuição entre essas frações, mas também por fatores como mineralogia do solo, matéria orgânica e dinâmica de desorção. Essa observação reforça a ideia de que, em solos altamente intemperizados, a disponibilidade de P pode ser mais fortemente influenciada por características de adsorção irreversível e pela lenta conversão entre frações lábeis e não lábeis (Novais & Smyth, 1999).

Dessa forma, os resultados deste estudo ressaltam a complexidade da dinâmica do P em solos altamente intemperizados, com implicações diretas para o manejo da fertilização em sistemas agrícolas tropicais. A compreensão detalhada das interações entre as frações de P e os

constituintes do solo é essencial para o desenvolvimento de práticas que aumentem a eficiência do uso do P, reduzindo a necessidade de insumos externos e promovendo maior sustentabilidade no sistema de produção.

5 CONCLUSÃO

- Não há efeito significativo do tempo de contato em dias sobre as frações inorgânicas de P no solo.
- O P adicionado ao solo tem como principal destino a fração P-Fe, seguida por uma pequena parte na fração P-Ca e apenas uma baixíssima quantidade fica associada a fração P-Al.
- Os solos que promoveram a maior disponibilidade de P-resina foram aqueles que receberam as maiores doses de P.
- A maior disponibilidade de P-resina foi observada no menor tempo de contato fosfato-solo.
- Práticas de manejo, como a calagem, podem influenciar a dinâmica e disponibilidade de P, mas a mineralogia do solo desempenha um papel crucial na fixação do nutriente.
- Assim, estratégias de adubação como a aplicação fracionada de fertilizantes fosfatados e o uso de fontes de P de liberação gradual devem ser consideradas para otimizar o uso de fertilizantes fosfatados em contextos de solos tropicais.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa, MG: SBCS, 32p. 2000 (Boletim informativo, 25).

ALVAREZ, V. V. H. e FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios de casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 48-55, 1990.

BAHIA FILHO, A. F. C.; VASCONCELLOS, C. A.; SANTOS, H. L.; MENDES, J. F.; PITTA, G. V. E.; OLIVEIRA, A. C. Formas de fósforo inorgânico e fósforo disponível em um Latossolo Vermelho-Escuro, fertilizado com diferentes fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, n. 1, p. 99-104, 1982.

BARBOSA, T. M. B. **Mineralogia e disponibilidade de fósforo em solos de terra firme da Amazônia Central**. Tese (Doutorado em Agronomia Tropical). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017, 85p.

BARBOSA, T.M.B.; SANTOS, J.Z.L.; TUCCI, C.A.F. Eficiência de diferentes extratores em solos do Estado do Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. Anais...:Florianópolis: UFSC, 2013. 1.CD-ROM.

BARBOSA-FILHO, M. P.; KINJO, T. MURAOKA, T. Relações entre fósforo "extraível", frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 147-155, 1987.

BARROW, N. J. The effects of soil properties on the sorption of phosphorus. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 60-70, 2017. DOI: 10.1111/ejss.12415.

BASTOS, T. X. **O estado atual do conhecimento das condições climáticas da Amazônia brasileira**. In: ZONEAMENTO Agrícola da Amazônia. Belém, PA: IPEAN, 1972. p. 68-122. (IPEAN. Boletim técnico, 54).

BATISTA, I. M. P. **Recomendação de calagem para alguns solos do Estado do Amazonas**. Tese (Doutorado em Agronomia Tropical). Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2014. 37f.

BOUYOUCOS, G. J. The hydrometer method improved for the mechanical analysis of soil. **Soil Science**, v. 23, p. 343-353, 1927.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RadamBrasil: folha S.A 21 Santarém – geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1976.

BROGGI, F.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 32-38, jan. 2010.

CARVALHO, M. A. **Eficiência de dispersantes na análise textural de materiais de solos com horizontes B Latossólico e B textural** (Dissertação). Escola Superior de Agricultura de Lavras Lavras, 1985.

CESSA, M. A. *et al.* Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p. 1153-1162, 2009.

CHANG, S C; JACKSON, M L. Soil phosphorus fractions in some representative soils, **Journal of Soil Science**, v. 9, n. 1, p. 109-111, 1957.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of Soil Phosphorus. **Soil Science**, v. 84, n. 2, p. 133-144, 1957.

CHEN, R. F.; ZHANG, F. L.; ZHANG, Q. M.; SUN, Q. B.; DONGA, X. Y.; SHENA, R. F. Aluminium-phosphorus interactions in plants growing on acid soils: does phosphorus always alleviate aluminium toxicity? **Journal of the science of food and agriculture**, v. 92 (5), p. 995-1000, 2012.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Chapter 8 - Recent Developments of Fertilizer Production and Use to Improve Nutrient Efficiency and Minimize Environmental Impacts. In: *Advances in Agronomy*: Academic Press, 2009. v. 102, p. 267-322.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F.; CURTI, N. Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente Tabuleiros Costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, n. 5, p. 1857-1872, 2008.

CURI, N. (Org.); KER, J.C.; NOVAIS, R.F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. *Pedologia - Solos dos Biomas Brasileiros*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2017. ISSN 978-85-86504-22-8.

DUNN, L. E. Lime requirement determination of soils by means of titration curves. *Soil Science*, v. 56, p. 341-351, nov. 1943.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, Informação Tecnológica. 2009. 627p.

FALCÃO, N. P. S. e SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 337-342, jul/set. 2004.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; TIECHER, T.; BARRÓN, V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 369-379, 2016. DOI: 10.1590/1413-70542016404027016.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 8, p.141-187, 2013.

GONÇALVES, J. L. M.; FIRME, D. J.; NOVAIS, R. F.; RIBEIRO, A. C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 9, p. 107-111, 1985.

GUILHERME, L. R. G.; CURTI, N.; SILVA, M. L. N.; RENÓ, N. B.; MACHADO, R. A. F. Adsorção de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 27-34, 2000.

IRION, G. Soil fertility in the Amazonian rainforest. **Naturwissenschaften**, v. 65, p. 515-519, 1978.

KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L., et al. (Ed.). **Methods of Soil Analysis Part 3 - Chemical Methods** (SSSA Book Series). Madison, WI: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1996. p. 869-919. ISBN 978-0- 89118-866-7.

LEVENE, H. Robust testes for equality of variances. In: OLKIN, I (Ed.). *Contributions to Probability and Statistics*. Palo Alto, CA: Stanford University Press, 1960. p. 278- 292.

MAIA, M. A. M. e MARMO, J. L. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. CPRM, Manaus, 2010, 275 p.

MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3ª edição, Elsevier, 2012, 643 p.

MEHRA, O. P. E. e JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v. 7, p. 317- 327, 1960.

MONTEIRO, P O. **Adubação fosfatada e frações inorgânicas de fósforo em um Latossolo do Trópico Úmido**. Dissertação (Mestrado Agronomia Tropical, área de concentração: Produção Vegetal) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, 2021. 52 p.

MOTTA, P E F et al. Adsorção e formas de fósforo em latossolos: Influência da mineralogia e histórico de uso. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 349-359, 2002.

MURPHY, J. e RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, Oxford, v.27, p.31-36, 1962.

NEUFELDT, H.; SILVA, J. E.; AYARZA, M. A.; ZECH, W. Land- use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin/Heidelberg, v. 31, n. 1, p. 30-37, 2000. ISSN 0178-2762.

NORRISH, K. e TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. **European Journal of Soil Science**, v. 12, p. 294-306, set. 1961.

NOVAIS, R. F. e SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Phosphorus supplying capacities of previously heavily fertilized soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:931-935, 1978.

PANDOLFO, C. **A floresta amazônica brasileira: enfoque econômico-ecológico**. Belém: SUDAM, 1978. 118 p.

PEREIRA, D.S.; COSTA, L. M. CARMO, D. L.; ROCHA, A C. T. Availability and fractionation of phosphorus in soils with different physicochemical characteristics. *Revista Agro@ambiente On-line*, v. 14, 2020.

QUESADA, C. A. et al. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. **Biogeosciences**, v. 9, n. 6, p. 2203-2246, 2012.

RAIJ, B. V. Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: YAMADA, T. e ABDALLA, S. R. S. (Eds). *Fósforo na agricultura brasileira*. Piracicaba-SP: Potafos, 2004. p.106- 114.

RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. International Plant Nutrition Institute, Piracicaba, 2011, 142 p.

RAIJ, B.V; FEITOSA, C.T. Correlação entre o fósforo extraído de solos por diversos extratores químicos e o absorvido pelo milho. **Bragantia**, v. 39, p. 51-57, 1980.

RANNO, S. K.; SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C.; RHODEN, A. C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 21- 28, 2007.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo, **Pesq. Agropec. Bras.** 2001; 36:151-60. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000100019>

RODRIGUES, T. E.; PEREIRA, L. C.; GAMA, J. R. N. F; REGO, R. S.; HENRIQUE, L. M. Uso e Ocupação do Solo da Amazônia Brasileira. In: *Anais do Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação de Solo*, VIII; 1996; Londrina, Paraná: Londrina, 1996. p. 145-191.

ROY, E. D. et al. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, n. 5, p. 16043, 2016. DOI: 10.1038/nplants.2016.43.

SANCHEZ, P. A. et al. Soil fertility replenishment in Africa: an investment in natural resource capital. In: BURESH, R. J.; SANCHEZ, P. A.; CALHOUN, F. (Eds.). *Replenishing soil fertility in Africa*. Madison: Soil Science Society of America, 1997. p. 1-46.

SANCHEZ, P. A. Soils. In: LIETH, H. e WERGER, M. J. A. *Tropical Rain Forest Ecosystems: Biogeographical and Ecological Studies*. Elsevier, Amsterdam. 1989. pp. 73-88.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. Rev. Ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, J. Z. L.; NETO, A. E. F.; RESENDE, A. V.; CURTI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, n. 32, p. 705-714, 2008.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, n. 1, p. 137-154, mar. 2008.

SHAPIRO, S.; WILK, M. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, n. 52 (3/4), p. 591-611. 1965. DOI: 10.2307/2333709.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. (Update on Phosphorus Dynamics in the Soil- Plant Continuum) (Report). *Plant Physiology*, v. 156, n. 3, p. 997, 2011.

SILVA, F. C. e RAIJ, B.van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, p.267-288, 1999.

SILVA, M. A. *et al.* Frações de fósforo em Latossolos. **Pesq. agropec. bras**, v. 38, n. 10, p. 1197–1207, 2003.

SOUZA JÚNIOR, R. F. de S.; DE OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; DE ARRUDA, J. A. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159–169, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 5da ed. Sinauer Associates, Sunderland, 2017, 34p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2017, 574 p.

THOMAS, G.W.; PEASLEE, D. E. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. (Eds.). *Soil testing and plants analysis*. Madison: Soil Science Society of America, 1973. p.115-129.

WANG, Y.; SHEN, A.; NIU, J.; LIU, R. Adsorption of phosphorus on sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the relation with sediment compositions. **Journal of Hazardous Materials**, 162, p. 92-98, 2009.

WITHERS, P. J. A.; HODGKINSON, R. A.; ROLLETT, A.; DYER, C.; DILS, R.; COLLINS, A. L.; BILSBORROW, P. E.; BAILEY, G.; SYLVESTER-BRADLEY, R. Reducing soil phosphorus fertility brings potential long-term environmental gains: A UK analysis. **Environ. Res. Lett**, v. 12, p. 1-10, 2017.

4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os resultados deste estudo demonstram que a adsorção e dessorção de fósforo (P) em Latossolos do bioma amazônico são fortemente influenciadas pela mineralogia do solo, teor de argila e P remanescente (P-rem). O modelo de Langmuir descreveu de forma satisfatória a adsorção de P, evidenciando sua aplicabilidade para os solos estudados. A ampla variação na Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), energia de adsorção (EA) e Fator de Capacidade Máxima de Fósforo (FCP-máx) entre os solos ressalta a complexidade da dinâmica do P na região, com solos ricos em goethita e hematita apresentando elevada CMAP e baixa dessorção, limitando a disponibilidade do nutriente para as plantas.

A predominância da fração P-Fe como principal reservatório do P adicionado indica forte interação entre o nutriente e óxidos de ferro, reduzindo a eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados. A maior disponibilidade de P-resina foi observada em solos com menor CMAP e no menor tempo de contato fosfato-solo, sugerindo que a aplicação fracionada de fertilizantes pode otimizar a eficiência do P. Além disso, práticas de manejo, como a calagem, podem influenciar a disponibilidade do nutriente, mas a mineralogia continua sendo o fator determinante na fixação do P.

Diante dessas evidências, estratégias de manejo devem considerar as características específicas de adsorção e dessorção do P em solos tropicais. A adoção de fertilizantes de liberação gradual e a calibração de doses conforme a CMAP e a mineralogia dos solos são essenciais para mitigar perdas por fixação, reduzir impactos ambientais e melhorar a sustentabilidade do uso de fósforo na agricultura tropical.