



**UFAM**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL

JOÃO BATISTA DIAS DAMACENO

**ADSORÇÃO, CINÉTICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM  
GLEISSOLO HÁPLICO E LATOSSOLO AMARELO NA AMAZÔNIA  
CENTRAL**

MANAUS  
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL

JOÃO BATISTA DIAS DAMACENO

**ADSORÇÃO, CINÉTICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM  
GLEISSOLO HÁPLICO E LATOSSOLO AMARELO NA AMAZÔNIA  
CENTRAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Agronomia Tropical**, área de concentração **Produção Vegetal** (Propriedades e Manejo de Solos Tropicais).

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Franco Tucci  
COORDENADOR: Dr. Wellington Gomes da Silva

MANAUS  
2020

### Ficha Catalográfica

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

D154a	Damaceno , João Batista Dias Adsorção, Cinética e Disponibilidade de Fósforo em Gleissolo Háplico e Latossolo Amarelo na Amazônia Central / João Batista Dias Damaceno . 2020 94 f.: il. color; 31 cm.  Orientador: Carlos Alberto Franco Tucci Coorientador: Wellington Gomes da Silva Tese (Doutorado em Agronomia Tropical) - Universidade Federal do Amazonas.  1. Solos Amazônicos . 2. Isotermas de Adsorção . 3. Perdas de Fósforo . 4. Cinética de Adsorção . I. Tucci, Carlos Alberto Franco. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título
-------	---



Poder Executivo Ministério da  
Educação Universidade Federal do  
Amazonas Faculdade de Ciências  
Agrárias  
Programa de Pós Graduação em Agronomia Tropical



## ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 2 dias do mês de outubro de 2020 às 08:00h, Por transmissão de videoconferência, link [meet.google.com/azz-tgiv-ope](https://meet.google.com/azz-tgiv-ope), o discente **JOÃO BATISTA DIAS DAMACENO** (matrícula: 3170112) (CPF: 007.747.382-51) defendeu sua tese de doutorado, intitulada: "**ADSORÇÃO, CINÉTICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLO AMARELO E GLEISSOLO HÁPLICO NA AMAZÔNIA CENTRAL**", com a composição da banca examinadora como segue. De acordo com o Art.45 do Regimento Interno deste Programa e com o Regimento Geral da Pós Graduação da UFAM, esta defesa é parte dos requisitos para obtenção do título de **Doutor em Agronomia Tropical**. O prazo para o depósito da versão final da tese junto Coordenação do Programa é 30 (trinta) dias. Conforme Resolução nº 033/2014, § 3º- O descumprimento do prazo para depósito da versão definitiva do trabalho implicará a não aprovação do discente e conseqüente desligamento do programa. Após a apresentação e arguição pelos membros da Banca Examinadora, cada membro decidiu emitir o seguinte julgamento:

### Banca de Examinadores:

Membros	Julgamento	Assinatura
Prof. Dr. Carlos Alberto Franco Tucci/UFAM	(X) Aprovado ( ) Reprovado	
Dr. Newton Paulo de Souza Falcão/INPA	(X) Aprovado ( ) Reprovado	
Prof. Dr. Hedinaldo Narciso Lima/UFAM	(X) Aprovado ( ) Reprovado	
Prof. Dr. Francisco Adilson dos Santos Hara/UFAM	(X) Aprovado ( ) Reprovado	
Prof. Dr. José Rafael Mendez Baldeón/UFAM	(X) Aprovado ( ) Reprovado	

**Resultado Final:** Aprovado (X)  
Reprovado ( )

Manaus, 02 de outubro de 2020

Coordenadora do PGATR

Ciente:

João Batista Dias Damaceno



E tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração,  
como para o Senhor (Colossenses 3:23)

## AGRADECIMENTOS

AO MEU DEUS, acima de todas as coisas, pela vida;

A MINHA AMADA MÃE, Maria Madalena Dias Damaceno, pelos ensinamentos que moldaram meu caráter e me trouxeram até este momento. Minha Vida;

A TODA A MINHA FAMÍLIA, por acreditarem em mim durante toda esta trajetória, meu muito obrigado;

A TODOS OS AMIGOS, de todos os lugares por onde estive, por me encorajarem e incentivarem;

A UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS- UFAM, pela oportunidade de estar realizando o Doutorado em Agronomia Tropical;

A FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DO ESTADO DO AMAZONAS – FAPEAM, pelo indispensável auxílio financeiro através da bolsa de estudo;

AO MEU ORIENTADOR, Prof. Dr. Carlos Alberto Franco Tucci, por disponibilizar todos os meios necessários para que a finalização desta Tese de Doutorado se tornasse possível. Meu muito obrigado;

A TODOS OS MEUS PROFESSORES, por transferirem seus conhecimentos que moldaram os meus, em especial ao Prof. Dr. Hedinaldo Narciso Lima pelo apoio nas análises e ao Prof. Dr. Newton Paulo de Souza Falcão, por ter me iniciado nas pesquisas de Ciência do Solo;

A COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL - PPGATR, na pessoa da Profa. Dra. Sônia Maria Figueiredo Albertino, pela excelente gestão e dedicação ao discentes e docentes;

A TODOS OS TÉCNICOS E FUNCIONÁRIOS, pelo zelo e dedicação com que desenvolvem seus trabalhos que fizeram ser possível realizar este trabalho e

A CIÊNCIA DO SOLO, ao qual respeito e quero me dedicar continuamente aos avanços das pesquisas desta área magnífica.

## RESUMO GERAL

Compreender o comportamento do fósforo (P) em solos amazônicos tem sido o foco de muitos pesquisadores em ciência do solo na região. Reunir fatores complexos envolvidos na sorção do P nestes solos é essencial para subsidiar futuras recomendações de adubações fosfatadas para solos distintos da Amazônia Central. O objetivo da presente tese é contribuir com os conhecimentos de adsorção, disponibilidade e cinética de adsorção de P em solos da Amazônia. Foram selecionados dois perfis de solos: um solo hidromórfico (Gleissolo Háptico Ta - GXv) e um solo não-hidromórfico (Latosolo Amarelo distrófico - LAd) na região central da Amazônia, no estado do Amazonas, Brasil. Coletou-se amostras de solo em cinco profundidades: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Foram determinados atributos físicos, químicos, mineralógicos e morfológicos dos solos de acordo com procedimentos metodológicos descritos por Embrapa (2017), bem como avaliou-se a adsorção e disponibilidade de P, por meio das seguintes variáveis: P remanescente, P disponível, capacidade máxima de adsorção de P, Energia de Ligação de P e o Fator capacidade de P. Construiu-se isotermas de adsorção de Langmuir e foram estruturadas correlações entre as variáveis analisadas e os atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos. Para determinação das isotermas e da cinética de adsorção de fósforo, as diferentes amostras foram agitadas em solução 10 mmol L<sup>-1</sup> de CaCl<sub>2</sub> contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) pelos seguintes períodos de agitação 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 6; 12; 18; 24; 48; 72; 96; 120; 144; 168 e 192 horas. Ao final de cada período de agitação determinou-se a concentração de P na solução de equilíbrio e foram utilizadas equações gerais e lineares de cinética de adsorção, assim como o tempo de adsorção de porcentagens específicas de P e a velocidade específica de sorção de cada fase linear (I, II e III). Os resultados evidenciam que os teores de silte são mais elevados no GXv, ao passo que os de argila são mais elevados no LAd. Em ambos os solos, os teores de matéria orgânica diminuem em profundidade. Atributos como pH em H<sub>2</sub>O e KCl, ponto de carga zero e ΔpH foram similares entre os solos. O Al<sup>3+</sup> trocável, acidez potencial, CTC efetiva e potencial são mais elevadas no solo não hidromórfico. Em ambos os solos, as bases reduzem em subsuperfície (> 20 cm). Os teores de goethita (Gt) e hematita (Hm) são elevados em profundidade no solo não-hidromórfico diminuem no solo hidromórfico. Não houve diferenças entre o P-Disp entre os solos. O fósforo remanescente foi similar entre os solos na superfície, porém mais elevado na subsuperfície do GXv. A isoterma no LAd mostrou maior afinidade entre o adsorvente (solo) e o adsorvido (P) e diferenciou-se apenas na profundidade 40-60 cm do GXv. No LAd, a diminuição da matéria orgânica e aumento dos óxidos em profundidade podem explicar a adsorção de P. No GXv, a diminuição da matéria orgânica e a diminuição dos óxidos, devido a gleização, indicam o comportamento de sorção de P. Para descrever a cinética de adsorção, a equação de Kue e Lotse (1974) mostrou-se eficaz no processo de adsorção em solos Amazônicos. A cinética de adsorção no LAd é similar entre as profundidades e menos intensa na profundidade 40-60 cm no GXv. Cerca de 80% do P é adsorvido em 2,5 e 2,1 dias, respectivamente na superfície (< 20 cm) e na subsuperfície (> 20 cm) do LAd. Em 3,2 e 3,5 dias ocorre adsorção do P, respectivamente na superfície (< 20 cm) e na subsuperfície (> 20 cm) do GXv. Três fase de adsorção de P foram identificadas nas profundidades dos solos amazônicos. A fase I (rápida) ocorre entre 0-18 horas, a fase II (intermediária) entre 18-96 horas e a fase III (lenta) entre 96-192 horas em diante. A fase I de adsorção é respectivamente 35,2 e 238,6 vezes mais rápida do que as fases II e III no LAd. A fase I de adsorção é respectivamente 25,5 e 198,8 vezes mais rápida que as fases II e III no GXv. A diminuição da matéria orgânica e a diminuição dos óxi-hidróxidos em profundidade parecem explicar a relação do P com o solo, respectivamente no Latossolo Amarelo e no Gleissolo Háptico. As isotermas, a capacidade de adsorção e a energia de sorção sofrem influência da matéria orgânica e dos processos de redução de Fe. O tempo de adsorção de P é variável entre os dois solos e as cinco profundidades, indicando que diferentes manejos de P podem reduzir as perdas deste nutriente no solo.

**Palavras-Chaves:** Solos Amazônicos, Isotermas de Adsorção, Perdas de Fósforo, Cinética de Adsorção.

## GENERAL ABSTRACT

Understanding the behavior of phosphorus (P) in Amazonian soils has been the focus of many researchers in soil science in the region. Gathering complex factors involved in P sorption in these soils is essential to support future recommendations for phosphate fertilizers for different soils in Central Amazon. The objective of this thesis is to contribute with the knowledge of adsorption, availability and kinetics of adsorption of P in soils of the Amazon. Two soil profiles were selected: a hydromorphic soil (Haplic Gleysol Ta - GXv) and a non-hydromorphic soil (Dystrophic Yellow Oxisol - LAd) in the central region of the Amazon, in the state of Amazonas, Brazil. Soil samples were collected at five depths: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm. Physical, chemical, mineralogical and morphological attributes of the soils were determined according to methodological procedures described by Embrapa (2017), as well as the adsorption and availability of P were evaluated through the following variables: P remaining, P available, maximum capacity adsorption of P, binding energy of P and the capacity factor of P. Langmuir adsorption isotherms were constructed and correlations were structured between the variables analyzed and the physical, chemical and mineralogical attributes of the soils. To determine isotherms and phosphorus adsorption kinetics, the different samples were stirred in 10 mmol L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> solution containing 60 mg L<sup>-1</sup> of P (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) for the following stirring periods 0.25; 0.50; 1; 2; 4; 6; 12; 18; 24; 48; 72; 96; 120; 144; 168 and 192 hours. At the end of each stirring period, the concentration of P in the equilibrium solution was determined and general and linear equations of adsorption kinetics were used, as well as the adsorption time of specific percentages of P and the specific sorption speed of each phase. linear (I, II and III). The results show that silt contents are higher in GXv, while clay contents are higher in LAd. In both soils, the levels of organic matter decrease in depth. Attributes such as pH in H<sub>2</sub>O and KCl, zero charge point and ΔpH were similar between soils. Exchangeable Al<sup>3+</sup>, potential acidity, effective and potential CTC are higher in non-hydromorphic soil. In both soils, the bases reduce in subsurface (> 20 cm). The levels of goethite (Gt) and hematite (Hm) are high in depth in non-hydromorphic soil and decrease in hydromorphic soil. There were no differences between P-Disp between soils. The remaining phosphorus was similar among the soils on the surface, but higher in the GXv subsurface. The isotherm in the LAd showed greater affinity between the adsorbent (soil) and the adsorbed (P) and differed only in depth 40-60 cm from GXv. In LAd, the decrease in organic matter and the increase in oxides in depth may explain the adsorption of P. In GXv, the decrease in organic matter and the decrease in oxides, due to gleization, indicate the sorption behavior of P. To describe the adsorption kinetics, the Kue and Lotse (1974) equation proved to be effective in the adsorption process in Amazonian soils. The adsorption kinetics in LAd is similar between depths and less intense in depth 40-60 cm in GXv. About 80% of the P is adsorbed in 2.5 and 2.1 days, respectively on the surface (<20 cm) and on the subsurface (> 20 cm) of the LAd. In 3.2 and 3.5 days, P adsorption occurs, respectively on the surface (<20 cm) and subsurface (> 20 cm) of GXv. Three P adsorption phases were identified in the depths of Amazonian soils. Phase I (fast) occurs between 0-18 hours, phase II (intermediate) between 18-96 hours and phase III (slow) between 96-192 hours onwards. The adsorption phase I is respectively 35.2 and 238.6 times faster than phases II and III in the LAd. The adsorption phase I is respectively 25.5 and 198.8 times faster than phases II and III in GXv. The decrease in organic matter and the decrease in oxide hydroxides in depth seem to explain the relationship of P with the soil, respectively in the Yellow Latosol and Haplic Gleysol. Isotherms, adsorption capacity and sorption energy are influenced by organic matter and Fe reduction processes. The P adsorption time varies between the two soils and the five depths, indicating that different P managements can reduce the losses of this nutrient in the soil.

**Key-words:** Amazonian soils, adsorption isotherms, phosphorus losses, adsorption kinetics.



## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	1
REFERÊNCIAS .....	4
CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MORFOLÓGICA E MINERALÓGICA DE UM GLEISSOLO HÁPLICO E UM LATOSSOLO AMARELO NA AMAZÔNIA CENTRAL .....	8
RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUÇÃO .....	9
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
2.2. Procedimentos Específicos .....	13
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
3.1. Atributos Morfológicos e Físicos .....	16
3.2. Atributos Químicos .....	18
3.3. Atributos Mineralógicos .....	22
3.4. Correlação dos atributos e profundidade das camadas do solo .....	25
4. CONCLUSÕES .....	28
5. REFERÊNCIAS.....	29
CAPÍTULO II: ADSORÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO DE UM GLEISSOLO HÁPLICO E UM LATOSSOLO AMARELO DA AMAZÔNIA CENTRAL .....	35
RESUMO.....	35
ABSTRACT.....	35
1. INTRODUÇÃO .....	36
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	38
2.1. Descrição das Áreas de Estudo.....	38
2.2. Procedimentos Específicos .....	39
2.3. Análise Estatística .....	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
3.1. Adsorção e Disponibilidade de Fósforo.....	42
3.2. Correlação de Atributos com a Adsorção e Disponibilidade de P .....	48
4. CONCLUSÕES .....	53
5. REFERENCIAS.....	54
CAPÍTULO III: CINÉTICA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO DE UM GLEISSOLO HÁPLICO E UM LATOSSOLO AMARELO DA AMAZÔNIA CENTRAL .....	60

RESUMO.....	60
ABSTRACT.....	60
1. INTRODUÇÃO .....	61
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	63
2.1. Descrição das Áreas de Estudo.....	63
2.2. Procedimentos Específicos .....	64
2.3. Análise Estatística .....	67
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
3.1. Fósforo em Equilíbrio e Adsorção de P no Perfil do Solo .....	68
3.2. Cinética de Adsorção adaptada de Kue e Lotse (1974).....	71
3.3. Fases I, II e III de Adsorção de Fosfato .....	73
4. CONCLUSÕES .....	80
5. REFERÊNCIAS.....	81
ANEXO I- Tabelas de Análise de Variância - ANOVA.....	84

## INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo (P) é um dos macronutrientes mais utilizados na agricultura e estudados no mundo (FINK et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2018; OMARI et al., 2019). Responsável pelo, dentre outras funções, fornecimento de energia as plantas (ADP e ATP), participação na síntese de membranas e no metabolismo de açúcares, tendo relevante importância na produção e produtividade das plantas (TAIZ e ZEIGER, 2010; REETZ, 2017). Embora seja importante, em média representa apenas 0,2% da matéria seca das plantas, entretanto, após o nitrogênio (N) é o nutriente mais aplicado na forma de fertilizantes orgânicos e inorgânicos (MARSCHNER, 2012; AZIZ et al., 2014).

Atualmente, o Brasil é o 4º maior consumidor de fertilizantes fosfatados no mundo e importa elevadas quantidades desses produtos, já que suas reservas representam em torno de 3,5% das reservas mundiais de fosfatos (CONAB, 2019; DNPM, 2019). O intenso uso do P nos solos tem sido associado a projeções futuras de esgotamento dessas reservas. Mantendo-se o ritmo atual de uso, estima-se que até o final deste século (CORDELL et al., 2009) ou em aproximadamente dois séculos (USGS, 2017) ocorrerá o esgotamento das reservas conhecidas atualmente. Independentemente das reais projeções, é fato que tal esgotamento terá forte implicação da produção de alimentos, levando ao aumento gradativo dos preços além da constante busca por novas fontes fosfatadas (ANDA, 2016; WITHERS et al., 2017).

Os estudos dos últimos anos têm dispensado tempo para propor novas tecnologias de aplicação, alternativas de utilização e a compreensão dos fenômenos interativos entre o solo e a molécula de P (ELSER et al., 2014; BARBOSA, 2017; DAMACENO et al., 2019). A interação dos íons fosfatados com os diversos solos é a principal causa do efeito contraditório no uso deste elemento: uso de elevadas quantidades, porém com baixa necessidade relativa pelas plantas. Segundo Novais et al. (2007) e Raji (2011), este efeito é explicado pela forte retenção dos íons fosfatados com o solo, principalmente os tropicais, que adsorvem aproximadamente 80% do que é adicionado, comprometendo a eficiência de utilização de fertilizantes.

Solos de regiões tropicais, como os do Brasil, assemelham-se nos processos de gênese, acelerada devido condições comuns de alta pluviosidade e temperatura, promovendo alta intemperização destes solos e, conseqüentemente, no aparecimento de atributos físicos, químicos e mineralógicos específicos que promovem maiores retenções e menores disponibilidade de P (SANCHEZ et al., 1982). Dentre esses atributos, destaca-se a predominância de argilas 1:1, como a caulinita, que retém fosfato devido cargas variáveis positivas, a presença de óxi-hidróxidos de ferro (Fe) e Alumínio (Al), e elevada acidez devido a remoção de bases do solo (GATIBONI et al., 2013; SZARA et al., 2019).

Na Amazônia, especialmente na Amazônia Central, onde há predominância de materiais pedogenéticos sedimentares pobres em P, intensa lixiviação de bases devido à alta pluviometria e temperaturas elevadas atribuem condições ainda mais desafiadores com relação a retenção de P no solo (FALCÃO e SILVA, 2004). Estima-se que ao combinar estes multifatores, a adsorção de P na Amazônia pode ultrapassar 85% do que é adicionado (SINGH et al., 1983; GÉRARD, 2016), podendo ultrapassar

90% (CRAVO et al., 2012) e cerca de 96% dos solos são extremamente deficientes em P, com teores disponíveis na maioria das vezes abaixo de  $2 \text{ mg dm}^{-3}$  (SANCHEZ e SALINAS, 1981). No estado do Amazonas, que compreende boa parte da porção central da Amazônia Brasileira, é estimado que 83% dos solos apresentam teores inferiores a  $5 \text{ mg dm}^{-3}$  (MOREIRA e GONÇALVES, 2006), com exceção de solos modificados antropicamente (Terras Pretas de Índio) (FALCÃO e BORGES, 2006) e aqueles sob influência dos rios barrentos da região (LIMA, 2001).

Nos solos, o P divide-se em dois grandes grupos: P inorgânico e P orgânico. As formas de P orgânicas representam aquelas ainda nos materiais sob mineralização, enquanto que as formas inorgânicas aquelas as quais as plantas conseguem absorver, mais frequentemente as formas ortofosfáticas mono ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) e bivalentes ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) (GIAVENO et al., 2010; GLEBER et al., 2014). Há, no entanto, condições distintas de disponibilidade do P orgânico, P-lábil, aquele constantemente em troca com a solução do solo, P- não lábil, aquele aderido de maneira quimicamente fraca nos minerais do solo e o “P- fixado”, o que está retido de maneira forte nos minerais. A maior parte do P encontra-se como “P-fixado”, adsorvido na superfície positivas dos minerais de argilas e dos óxidos amorfos e cristalinos de Fe e Al do solo, e seu retorno a solução é praticamente irreversível (NOVAIS et al., 2007).

Em solos da Amazônia Central, é comum que a retenção de P seja por complexos de esfera interna, ou seja, direta na superfície dos minerais por meio de ligações covalentes, o que implica em perdas maiores de P, com reversões ou dessorções mínimas e rápida retenção (SZARA et al., 2019). Segundo Meurer (2010), a medida que o tempo avança ocorre um “envelhecimento” das ligações P x solo, tornando-as mais estáveis, passando de ligações monodentadas, onde um oxigênio (O) da molécula fosfatada liga-se ao metal, para bidentadas, com dois oxigênios ligados e por fim binucleadas, onde há dois oxigênios do fosfato aderido covalentemente a dois átomos do metal.

Além da adsorção, outras formas de perda de P podem ocorrer em solos tropicais, porém menos prejudiciais do ponto de vista das perdas. Dentre elas, pode-se citar a precipitação de P que é uma reação lenta e dependente da variação do pH do solo. Em condições de pH baixo, ocorre a formação de compostos de baixa solubilidade (precipitados) não absorvidos pelas plantas. Abaixo de pH 4,0 predominam fosfato de ferro ( $\text{FePO}_4$ ), enquanto que entre 4,0 – 6,0, os fosfatos de alumínio ( $\text{AlPO}_4$ ) são mais comuns (SIMONSSON et al. 2018). A dissolução, reação a qual a precipitação é revertida, ocorre à medida que o pH aumenta nas ligações de P com o Fe e Al. Normalmente, a faixa de pH entre 5,5 e 6,8 proporcionam as menores precipitações com o P, apesar de ocorrerem (HAVLIN et al., 2005; NOVAIS et al., 2007).

A variedade de solos sob condições distintas na Amazônia Central pode criar igualmente diferentes condições de adsorção e disponibilidade de P nos solos. É muito comum na região referir-se a dois ambientes distintos: terra firme e várzea (TEIXEIRA et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2010). De maneira geral, os solos de terra firme compreendem Latossolos e Argissolos e apresentando boa drenagem durante o ano e podem ser classificados como não-hidromórficos, enquanto os solos de várzea ou hidromórficos são conhecidos por terem drenagem deficiente em algum período do ano e são bem

representados por Gleissolos Háplicos e Neossolos Flúvicos (TEIXEIRA et al., 2007; GUIMARÃES et al., 2013).

Estima-se que apenas no estado do Amazonas, cerca de 17% dos solos apresentam algum tipo de hidromorfismo ou gleização (TEIXEIRA et al., 2010), processo em que o déficit de O<sub>2</sub> promove a redução de compostos de ferro e sua saída do sistema solo, ocasionando mudanças químicas, mineralógicas e algumas visíveis, como a coloração mais acinzentada (GUIMARÃES et al., 2013; SCHAEFER et al., 2017). Muitos destes sofrem influência do Rio Solimões, que por carrear sedimentos Andinos, dá origem a solos mais férteis e com minerais menos intemperizados (2:1). Já os solos de terra firme, que representam cerca de 71% desses solos, tendem ser mais ácidos, com predomínio de argilas caulínicas e pouco férteis (TEIXEIRA et al., 2010; SCHAEFER et al., 2017).

Alguns estudos na região apontam que adsorção e disponibilidade de P podem sofrer influências dessas variações de solo (TUCCI, 1991; LIMA, 2001; FALCÃO E SILVA, 2004, BARBOSA, 2017) e sofrem elevada influência do tipo de manejo que se adota no solo (DAMACENO et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2019). Poucos estudos na região têm se focado em entender as diferenças de adsorção de P entre as classes de solo mais presentes e bem como dado atenção se os fenômenos de adsorção são iguais ou distintos em diferentes profundidades do solo, assim como nos estudos observados por Lima (2001) em solos de ambientes distintos.

É provável que devido à baixa mobilidade de P no perfil do solo, as perdas podem ser atenuadas ou aumentadas a depender do local de aplicação, o que remete que as perdas são localizadas (BERTOL et al., 2010). Em um dos poucos estudos a respeito deste tema, Lima (2001) evidenciou que nas camadas inferiores de um Latossolo Amarelo (Bw), a adsorção é mais elevada que em horizontes superficiais (A) e que em Gleissolos e Neossolos Flúvicos, típicos de várzea, a adsorção é menor em subsuperfície que nos horizontes superficiais. De acordo com o autor, estes comportamentos podem estar associados a matéria orgânica em superfície, com a presença de óxidos de Fe de baixa cristalinidade que influenciam e promovem maior adsorção superficial, porém sem aprofundamento adequando a respeito do tema, fato proposto por este trabalho.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar um Gleissolo Háptico e um Latossolo Amarelo, descrever o processo de adsorção de fósforo através de isotermas de adsorção e contribuir com o avanço dos conhecimentos a respeito da cinética de adsorção de fósforo na superfície e na subsuperfície de solos com processos pedoambientais distintos.

## REFERÊNCIAS

ANDA. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2016. 10p.

AZIZ, T.; SABIR, M.; FAROOQ, M.; MAQSOOD, M. A.; AHMAD, H. R.; WARRAICH, E. A. **Phosphorus Deficiency in Plants: Responses, Adaptive Mechanisms, and Signaling**. Plant signaling: In: K. R HAKEEM, R. U REHMAN and I TAHIR, editors. Plant signaling: Understanding the molecular crosstalk. India: Springer. 133–148, 2014.

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.

BERTOL, J. O.; RIZZI, N. E.; FAVARETTO, N.; LANA, M. C. Phosphorus loss by surface runoff in no-till system under mineral and organic fertilization. **Scientia Agrícola**, v.67, p.71-77, 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Séries Históricas Relativas às Safras 1998 a 2017 de Culturas de Verão**, 2019.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, p. 292-305, 2009.

CRAVO, M.S.; SMYTH, T.J.; BRASIL, E.C. Calagem em Latossolo amarelo distrófico da Amazônia e sua influência em atributos químicos do solo e na produtividade de culturas anuais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 895-907, 2012.

DAMACENO, J. B. D.; LOBATO, A. C. N.; GAMA, R. T.; OLIVEIRA, D. M.; FALCÃO, N. P. S. Biochar as Phosphorus Conditioner in Substrate for Brazil Nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.) Seedling Production in the Central Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 383-393, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Sumário da produção mineral do ano 2014**, 2019, 152p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SA 20- Manaus**. Volume 17. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro: MME/DNPM, 1978, 554p.

ELSER, J.J; ELSER, T.J; CARPENTER, S.R; BROCK, W.A. Regime Shift in Fertilizer Commodities Indicates More Turbulence Ahead for Food Security. **PLoS One**, v. 9, p. 93998, 2014.

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.

FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão havaí (*Carica papaya* L.). **Acta Amazonica**, v. 36, p. 401-406, 2006.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil Till. Res.** v 155, p. 62-68, 2016.

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.

GEBLER, L.; BERTOL, I.; BIASI, L. R.; RAMOS, R. R.; LOUZADA, J. A. S. Transferência superficial de fósforo reativo potencialmente contaminante por chuvas simuladas intensas. **Eng Sanit Ambient.** v. 19, p. 393-399, 2014.

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.

GIAVENO, C.; RICHARDSON, A.; SIMPSON, R.; BARBERIS, E. Interaction of phytases with minerals and availability of substrate affect the hydrolysis of inositol phosphates. **Soil Biology and fertility of soils**, v. 49, p.491-498, 2010.

GUIMARÃES, S. T.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; NEVES, A. F.; SILVA, F. W. R.; MACEDO, R. S.; SOUZA, K. W. Caracterização e Classificação de gleissolos da Várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 317-326, 2013.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers: na introduction to nutrient management.** Pearson Education, New Jersey, 2005, 215 p.

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.

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

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo.** 4da ed. Evangraf, Porto Alegre, 2010, 280p.

MOREIRA, A.; GONÇALVES, J.R.P. Available phosphorus and potassium status of soils of Amazonas State. **Better Crops with Plant Food**, v. 90, p.30-32, 2006.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. **Fósforo.** In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais, p. 471-550, 2007.

OLIVEIRA, D. M.; DAMACENO, J. B. D.; LOBATO, A. C. N.; GUIMARÃES, R. S.; JÚNIOR, J. L.; GUERRINI, I. A.; FALCÃO, N. P. S. Biochar of Bamboo Influencing the Availability of P From Different Phosphate Sources in Dystrophic Yellow Oxisol of Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 242-251, 2019.

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.

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

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.

SANCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G. Low input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, v. 34, p. 280-406, 1981.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F.

**Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.

SCHAEFER, C. E. G. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; VALE JUNIOR, J. F.; SOUZA, K. W.; CORREIRA, G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; AMARAL, E. F.; CAMPOS, M. C. C.; RUIVO, M. L. **Solos da Amazônia.** In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds). *Pedologia – Solos dos Biomas Brasileiros.* Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo., p. 111-176, 2017.

SIMONSSON, M.; ÖSTLUND, A.; RENFJÄLL, L.; SIGTRYGGSSON, C.; BÖRJESSON, G.; KÄTTERER, T. Pools and solubility of soil phosphorus as affected by liming in long-term agricultural field experiments. **Geoderma**, v. 315, p. 208-219, 2018.

SINGH, R.; MOLLER, M.R.F.; FERREIRA, W.A. Cinética de sorção de fósforo em solos dos trópicos úmidos da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 227-231, 1983.

SZARA, E.; SOSULSKI, T.; SZYMAŃSKA, M. Impact of long-term liming on sandy soil phosphorus sorption properties. **Soil Science Annual**, v. 70, p. 13-20, 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology.** 5<sup>da</sup> ed. Sinauer Associates, Sunderland, 2010, 34p.

TEIXEIRA, J. B. S.; SOUSA, R. O.; VALE, M. L. C. Phosphorus adsorption after drainage in two soil classes. **Revista Ceres.** v. 65, p. 196-203, 2018.

TEIXEIRA, W. G.; ARRUDA, W.; SHINZATO, E.; MACEDO, R. S.; MARTINS, G. C. LIMA, H. N.; RODRIGUES, T. E. **Solos do Estado do Amazonas.** In: MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L., eds. *Geodiversidade do Estado do Amazonas.* Manaus, CPRM, p.71-86, 2010.

TEIXEIRA, W.G.; CRUZ, M.E.G.; LIMA, H.N.; CORREIA, M.R.D.; SOARES, C.B. **Mapa de Solos do Município de Iranduba** (Escala 1: 200.000). In: *Mapas Pedológicos de Municípios do Médio Solimões: Área de Estudo do Piatam-Embrapa, UFAM, SIPAM.* Manaus, EDUA, 2007.

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.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Mineral commodity summaries.** Reston: USGS, 2017. 202p.

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.





JOÃO BATISTA DIAS DAMACENO

## CAPÍTULO I

# **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MORFOLÓGICA E MINERALÓGICA DE UM GLEISSOLO HÁPLICO E UM LATOSSOLO AMARELO NA AMAZÔNIA CENTRAL**

MANAUS  
2020

## **CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MORFOLÓGICA E MINERALÓGICA DE UM GLEISSOLO HÁPLICO E UM LATOSSOLO AMARELO NA AMAZÔNIA CENTRAL**

**RESUMO:** Os solos amazônicos possuem algumas diferenças físicas, químicas e mineralógicas, entender as diferenças é importante para compreender o comportamento dos nutrientes no solo, principalmente o de fósforo. O estudo foi realizado em dois tipos de solos: um perfil de solos hidromórfico e um perfil de solo não-hidromórfico na região da Amazônia Central do Brasil, localizado na zona metropolitana de Manaus. Foram estudadas cinco profundidades: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Estudaram-se atributos físicos, químicos, mineralógicos e morfológicos de ambos os solos. A exceção da argila, os teores de areia e silte mantiveram-se estáveis em profundidade. Os teores de matéria orgânica diminuem gradativamente em profundidade. O pH em água e em KCl,  $\Delta$ pH, ponto de carga zero, foram similares entre os solos em superfície e subsuperfície. O  $Al^{3+}$  trocável, H+Al, CTC efetiva, CTC potencial e atividade da argila foram similares no solo não-hidromórfico e aumentam em superfície (< 20 cm) e se estabilizam em subsuperfície (> 20 cm). Em ambos os solos, as bases reduzem em subsuperfície (> 20 cm). O alumínio e ferro oxalato reduzem com maior expressividade no solo não hidromórfico. O alumínio e ferro ditionito apresentam o mesmo comportamento. Os teores de goethita (Gt) e hematita (Hm) são elevados em profundidade no solo não-hidromórfico diminuem no solo hidromórfico. Houve distinções entre alguns atributos dos solos estudados, devido as condições edafoclimáticas impostas, principalmente nos atributos mineralógicos.

**Palavras-Chaves:** Latossolo, Gleissolo, Solos Amazônicos, Fertilidade.

**ABSTRACT:** Amazonian soils have some physical, chemical and mineralogical differences, understanding the differences is important to understand the behavior of nutrients in the soil, especially phosphorus. The study was carried out in two types of soils: a hydromorphic soil profile and a non-hydromorphic soil profile in the Central Amazon region of Brazil, located in the metropolitan area of Manaus. Five depths were studied: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm. Physical, chemical, mineralogical and morphological attributes of both soils were studied. With the exception of clay, the levels of sand and silt remained stable in depth. The levels of organic matter gradually decrease in depth. The pH in water and in KCl,  $\Delta$ pH, point of zero load, were similar between the surface and subsurface soils. Exchangeable  $Al^{3+}$ , H + Al, effective CEC, potential CEC and clay activity were similar in Non-Hydromorphic soil and increase in surface (<20 cm) and stabilize in subsurface (> 20 cm). In both soils, the bases are reduced in subsurface (> 20 cm). Aluminum and iron oxalate reduce with greater expressiveness in non hydromorphic soil. Aluminum and dithionite iron exhibit the same behavior. The levels of goethite (Gt) and hematite (Hm) are high in depth in the non-hydromorphic soil and decrease in the Hydromorphic soil. There were distinctions between some attributes of the studied soils, due to the edaphoclimatic conditions imposed, mainly in the mineralogical attributes.

**Keywords:** Oxisol, Gleysol, Amazonian soils, Fertility.

## 1. INTRODUÇÃO

Os solos da Amazônia, principalmente aqueles da Amazônia Central, são predominantemente formados pelo intemperismo de rochas sedimentares. As características do material de origem aliadas a ação edafoclimática intensa e típica da região da origem a solos, no geral, profundos e sem importantes impedimentos físicos, entretanto quimicamente pobres que, em parte, representam barreira ao desenvolvimento agrosilvopastoril local (SANCHEZ et al., 1982; FALESI, 1984; LIMA, 2001). Não sendo um processo estático, a formação dos solos está sujeita a variações impostas pelo ambiente, de forma que solos com origem pedomorfológica similares podem ser influenciados pelos ambientes nos quais estão inseridos, promovendo características químicas, físicas e mineralógicas distintas (MOREIRA e VASCONCELOS, 2007; VALE JÚNIOR et al., 2011).

Tipicamente na Amazônia Central, os solos são subdivididos como presentes em duas condições: solos de terra firme e solos de várzea. Nas várzeas, principalmente do Rio Solimões, há predomínio de solos que apresentam restrição de drenagem natural durante parte ou todo o ano, conhecidos também como solos hidromórficos (LIMA, 2001; TEIXEIRA et al., 2010). De acordo com Teixeira et al. (2019), os Gleissolos representam cerca de 7% dos solos da Amazônia Legal (350.803 km<sup>2</sup>), no entanto aproximadamente 89% dos solos de várzea são classificados como Gleissolos. De acordo com os estudos de Lima et al. (2006) e Guimarães et al. (2013), os solos das várzeas amazônicas tem forte influência dos sedimentos andinos e subandinos, o que gera potencial agrícola, devido ao caráter predominantemente eutrófico, baixos teores relativos de  $Al^{3+}$  trocável e presença de minerais 2:1 que conferem alta CTC (LIMA et al., 2006; SILVA et al., 2011; GUIMARÃES et al., 2013).

Os solos de terra firme, que apresentam nenhuma ou baixas restrições de drenagem, também conhecidos como solos não hidromórficos, são amplamente distribuídos na Amazônia Central principalmente Latossolos e Argissolos (RODRIGUES, 1996). Em contraste com os solos mal drenados da várzea, os solos de Terra firme geralmente são mais ácidos, possuem maior concentração de  $Al^{3+}$  trocável, predominantemente distróficos e com baixa CTC devido principalmente a minerais menos ativos como a caulinita (LIMA, 2001; TEIXEIRA et al., 2010; SCHAEFER et al., 2017).

Os solos brasileiros são notadamente carentes em fósforo (P), devido características do material de origem e a forte interação deste com os componentes do solo (FARIAS et al., 2016). A carência referida é constatada quando a eficiência de recuperação de P, ou seja, o que retorna à produção vegetal, está entre 5 a 25% do que é aplicado (YANG et al., 2013). Este fato justifica as grandes quantidades de fertilizantes fosfatados utilizados nos solos brasileiros (TELES et al., 2017). Na porção Central da Amazônica, especialmente, os processos de adsorção tendem a ser mais brandos que em outras regiões do país, devido aos menores conteúdos de óxidos, ao passo que a disponibilidade de P tende a ser menor especialmente devido as condições do material de origem sedimentar pobre presente na região (NOVAIS et al., 2007; MELO e ALLEONI, 2009; CRAVO et al., 2012).

Os fatores que influenciam a adsorção e disponibilidade de P podem variar horizontalmente, de acordo com a classe de solo, por processos de formação específicos, como a plintização e a gleização e podem variar verticalmente no perfil do solo, segundo as composições das camadas (TEIXEIRA et al., 2018). Dentre os fatores que podem determinar o comportamento do P no perfil do solo estão a quantidade de matéria orgânica, de argila, pH e os teores e tipos de óxidos de Fe e Al. De acordo com Gérard (2016), a mineralogia quantitativa e qualitativa e as quantidades e tipos de argilas são determinantes no processo de adsorção de P.

A matéria orgânica pode atuar de maneira bivalente na adsorção de P no solo, uma vez que pode tanto bloquear os sítios de sorção presentes nas argilas e óxidos de Fe e Al, como adsorver de forma direta as moléculas de fosfato (TIRLONI et al.; 2009; SANTOS et al., 2014). O principal processo da ação da matéria orgânica no aumento da disponibilidade de P está na formação de ácidos orgânicos (humus) ao redor dos óxidos de Fe e Al carregados positivamente na superfície (MATIAS, 2010). Em contrapartida, a formação de pontos metálicos com o fosfato pode atuar elevando a fixação de P no solo. (GUPPY et al. 2005).

O potencial Hidrogeniônico (pH) do solo atua de maneira paralela da indisponibilidade de P nos solos com os fenômenos de adsorção. A depender da faixa de pH que o solo apresente há a ocorrência de formação de compostos de baixa solubilidade, chamados precipitados, com o Fe (Fe-P) em pH abaixo de 5, com o Al (Al-P) em faixas de pH entre 4 e 7 e com o Ca (Ca-P) em faixas de pH de 6 e 9. Ao contrário do que ocorre nos fenômenos de adsorção das moléculas de P, a precipitação é um fenômeno lento e reversível, conforme as mudanças de pH ocorrem (SOUZA; LOBATO, 2003; SANDIM, 2012).

Tanto os teores quanto as quantidades de argila presentes nos solos podem influenciar diretamente na capacidade de retenção de P de um solo, principalmente devido a alta área superficial específica (NOVAIS & SMYTH, 1999). Solos mais argilosos e normalmente mais imtemperizados como Latossolos e Argilosos tendem a apresentar maiores quantidades de sítios de adsorção da molécula fosfatada. Em relação a natureza coloidal da argila, solos com argilas mais ativas no complexo de troca (tipo 2:1) como vermiculitas e micas podem apresentar maiores taxas de sorção de P do que em argilas como a caulinita (tipo 1:1) (BAHIA FILHO, 1982).

A maior parte da fixação do fósforo nos solos é causada pela retenção superficial nos óxidos de Fe e Al, devido as formas irregulares e porosas destes que facilitam a entrada das moléculas de P na estrutura (GAMA, 2002). O elevado PCZ, normalmente entre pH 6,0 e 8,5, também contribui com a predominância de cargas positivas de superfície e, conseqüentemente, maior retenção. A fixação na superfície dos óxidos pode ocorrer de forma não específica (esfera externa), onde a molécula fosfatada liga-se de maneira indireta e eletrostaticamente a superfície ou de forma específica (esfera interna), no qual as ligações são diretas e covalentes (MEURER, 2010).

Apesar da diferenciação entre solos Hidromórficos e Não hidromórficos, poucos estudos se propuseram a identificar similaridades ou discrepâncias entre as primeiras camadas do solo (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20cm) e as camadas mais profundas (>20 cm), e a relação das mudanças químicas, físicas e

mineralógicas impostas com o aprofundamento do perfil do solo podem e influenciam o comportamento de nutrientes importantes no solo, como as moléculas ortofosfáticas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , quanto a sua adsorção e disponibilidade nas principais profundidades do solo, como já demonstrado por Lima (2001), parecer haver distinção no comportamento destas em superfície e subsuperfície.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é descrever e caracterizar os atributos físicos, químicos, mineralógicos e morfológicos nas camadas superficiais (< 20 cm) e superficiais (>20 cm) de um Gleissolo Háptico e um Latossolo Amarelo na Amazônia Central.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Descrição das Áreas de Estudo

Foram selecionadas duas áreas no limite da Formação Sedimentar do Solimões com a Formação Alter do Chão na porção Noroeste do Estado do Amazonas-Brasil. A primeira área configura-se como inundável em boa parte do ano típica de várzea, dada o perfil do lençol freático mais elevado nos meses mais chuvosos e a segunda área configura-se como mais elevada típica de áreas de terra firme do estado do Amazonas. As informações geodésicas, climatológicas e locais são descritas na Figura 1 e Tabela 1 e Figura 2.

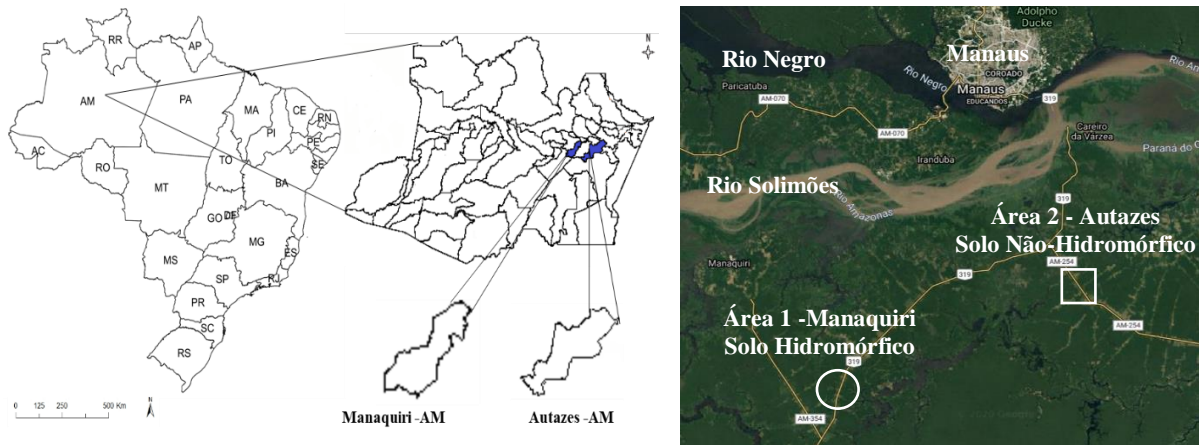


Figura 1. Localização das Áreas de Estudo e Coleta de Solo (Autor, 2020)

Tabela 1. Caracterização Geodésica e Climatológica das Áreas de Estudo (CPRM, 2010)

Município	Coordenadas		Localização	Altitude (m)	Precipitação (mm)
	Latitude	Longitude			
Manaquiri - AM	3°45'03.78"S	60°17'36.01"O	BR-319 Km 101	22,0	2218
Autazes - AM	3°29'14.38"S	59°50'47.89"O	AM-254 Km 10,5	35,0	2230

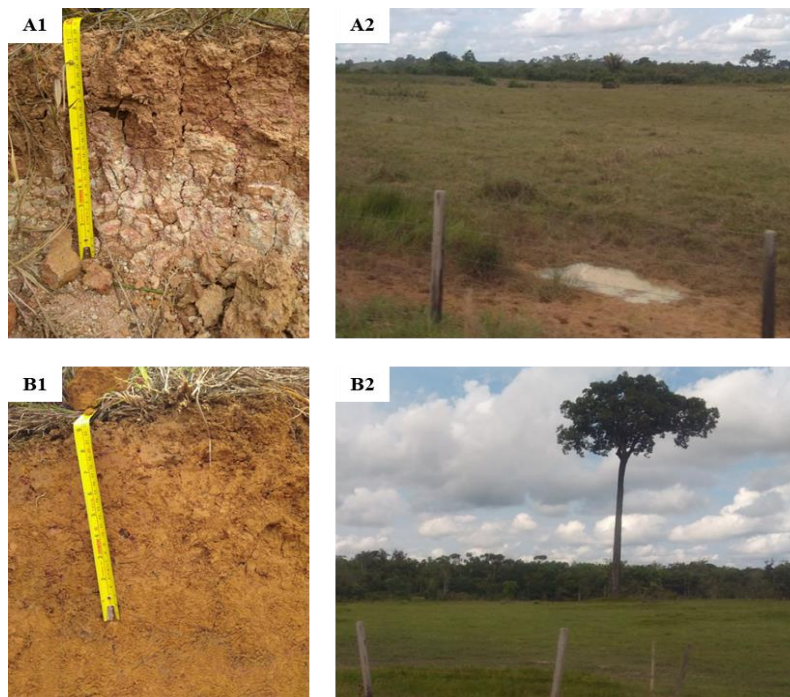


Figura 2. Gleissolo Háptico Ta distrófico (A1); área associada ao Gleissolo (A2), Latossolo Amarelo distrófico típico (B1) e área associada ao Latossolo (B2) (Autor, 2020).

## **2.2. Procedimentos Específicos**

### **2.2.1. Seleção dos Perfis e Coletas de Solo**

Foram selecionados dois perfis de solos com características que atendessem os seguintes critérios: serem modais, ou seja, solos mais representativos de cada classe e de ambientes distintos, um mal drenado (Gleissolo Háplico) e outro com boa drenagem (Latossolo Amarelo). Por se tratar de um estudo de caso, as informações não refletem com exatidão as características de outros perfis de solos semelhantes, mas é possível depreender que sob tais condições sejam similares. Os solos foram classificados segundo a metodologia do Manual de Coleta e Descrição de Solo em Campo (SANTOS et al., 2015), Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SANTOS et al., 2018) e mapas de solos da região (DNPM, 1978).

Para o estudo de adsorção, disponibilidade e caracterização dos solos foram selecionadas cinco (05) profundidades de coleta: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm, de modo a identificar possíveis alterações físicas, químicas e mineralógicas ligadas a retenção de fósforo no solo. Para tal, a camada arável (0-20 cm) foi estratificada em três níveis: 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm e a subsuperfície (20-60) em dois níveis de identificação: 20-40 cm e 40-60 cm. Sob cada perfil e em cada profundidade estudada, foram coletadas 10 subamostras com aproximadamente 100 g de solo em multipontos para cada profundidade, de modo a perfazer uma amostra composta (1 kg). Para garantir a idoneidade das amostras, a coleta ocorreu sobre perfil reconhecidamente não alterado antropicamente. Posteriormente a coleta, as amostras foram devidamente identificadas e armazenadas em saco transparente limpo. Em local apropriado, foram destorroadas, homogeneizadas, submetidas a secagem a sombra em temperatura ambiente até que toda a umidade fosse retirada. Após, foram passadas peneira de inox com malha de 2,00 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

### **2.2.2. Caracterização Morfológica e Física do Solo**

A caracterização morfológica dos solos foi realizada de acordo com os critérios do Manual de Coleta e Descrição de Solo em Campo (SANTOS et al., 2015) e foram avaliados seguintes aspectos: cor, estrutura e as consistências seca, úmida e molhada, sendo esta última subdividida em plasticidade e pegajosidade. A caracterização física foi realizada segundo a metodologia da Embrapa (2017), sendo avaliados: Granulometria, identificando as proporções de areia total, silte e argila. Com base dos dados obtidos da granulometria, identificou-se a classe textural de cada profundidade do solo estudada (USDA, 2011; SANTOS et al., 2018).

### **2.2.3. Caracterização Química do Solo**

A caracterização química foi realizada segundo a metodologia da Embrapa (2017), sendo avaliadas as seguintes características: matéria orgânica do solo; potencial hidrogeniônico (pH) em água (H<sub>2</sub>O) e em cloreto de potássio (KCl) pelo métodos do eletrodo imerso em suspensão na relação 1 : 2,5;

acidez potencial (H+Al) e Alumínio Trocável (Al<sup>3+</sup>) por meio de determinação por acetato de cálcio Ca (Ca<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>) 20,5 mol L<sup>-1</sup> e KCl a 1 mol L<sup>-1</sup>, respectivamente e determinação por titulometria com hidróxido de sódio NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>; Teores de Calcio (Ca<sup>2+</sup>), Magnésio (Mg<sup>2+</sup>) trocáveis extraídos por solução de KCl a 1 mol L<sup>-1</sup> e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; Teores de fósforo (P), potássio (K) extraídos por solução Mehlich 1 (HCl 0,05 M+H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 M), sendo o P determinado pelo método azul de molibdato e por espectrofotometria (λ=660 nm) e o K por fotômetro de chama; o fósforo remanescente (P-Rem) determinado através da adição de 50 ml de solução de equilíbrio de 0,01 mol L<sup>-1</sup> de CaCl<sub>2</sub>, contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) para 5,0 g de TFSA. Posteriormente, as amostras foram agitadas por 30 minutos a 150 rpm, deixando-as em repouso no pernoite, por cerca de 16 horas. A determinação foi realizada na solução foi determinado pelo método colorimétrico (ALVAREZ et al., 1999).

De posse dos dados analíticos laboratoriais, foram estimados os seguintes atributos: Delta pH (ΔpH) pela diferença entre os valores de pH em H<sub>2</sub>O e KCl, através da seguinte fórmula: ΔpH= (pH H<sub>2</sub>O- pH KCl), fornecendo estimativas das cargas líquidas superficiais dos minerais do solo (TAN, 1982); ponto de carga zero (PCZ) estimado pela fórmula: PCZ= (2pH KCl – pH H<sub>2</sub>O), de acordo com a metodologia de Uehara (1979); soma de bases (SB) estimada através da fórmula: SB= Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); capacidade de troca de cátions efetiva (t) e capacidade de troca de cátions potencial (T) estimados através das fórmulas: t= SB + Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e T= SB + (H+Al) (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), respectivamente; saturação por bases (v%) e saturação por alumínio (m) estimados pelas fórmulas: v(%)=(SB/T)\*100 e m(%)=(Al/t)\*100, respectivamente. atividade da fração argila (Ta) estimada através da fórmula: Ta= T x 1000/ g.kg<sup>-1</sup> de argila (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>).

#### 2.2.4. Caracterização Mineralógica do Solo

A caracterização mineralógica foi realizada de acordo com a metodologia da Embrapa (2017) e outras metodologias específicas (MEHRA; JACKSON, 1960; SCHWERTMANN, 1964). A partir da fração argila proveniente da granulometria, as amostras foram centrifugadas e dispostas em lâmina de vidro para identificação dos componentes da fração mineral. Os minerais foram caracterizados em difratômetro de raios-X (DRX) com velocidade de varredura de 1° 2θ min<sup>-1</sup> utilizando MiniFlex Rigaku II (20mA, 30 kV), equipado com radiação Cu Kα (SCHWERTMANN, 1964).

De posse dos dados obtidos da difratometria foram analisados os seguintes atributos: Identificação dos picos dos principais minerais dos solos amazônicos e as porcentagens de goethita (Gt) e de hematita (Hm) foram calculadas alocando-se a diferença entre os teores de ferro ditionito (Fed) e oxalato (FeO) em relação a estes óxidos (SCHULZE e SCHWERTMANN, 1984). A substituição isomórfica, ou a substituição do Fe pelo Al foi estimada pela fórmula: (Al<sub>oFe</sub>/27)/ [(Al<sub>oFe</sub>/27) + (Fe<sub>c</sub>/56)], em que Al<sub>oFe</sub> = Al<sub>d</sub> – Al<sub>o</sub> e Fe<sub>c</sub> = Fe<sub>d</sub> – Fe<sub>o</sub> (SCHWERTMANN et al., 1979). As determinações dos óxidos de Ferro (Fed) e Alumínio (Ald) na forma cristalina, amostras de TFSA foram submetidas a extração em solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) (MEHRA; JACKSON, 1960). Para



as determinações dos óxidos de baixa cristalinidade para Ferro ( $Fe_o$ ) e Alumínio ( $Al_d$ ), as extrações foram realizadas com solução de oxalato de amônio a  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 3,0, no escuro (SCHWERTMANN, 1964). Os teores de óxidos de ferro solubilizados foram determinados por absorbância no espectrofotômetro (Espectrofotômetro Micronal® modelo B-580) em comprimento de onda de 518 nm, enquanto os óxidos de alumínio em comprimento de onda de 555 nm. A partir dos dados obtidos, foram avaliados a relação Alumínio Oxalato e Ditionito ( $A_o/A_d$ ) e Ferro Oxalato e Ditionito ( $Fe_o/Fe_d$ ).

### **2.2.5. Correlação dos Atributos com a profundidade do solo**











Para construção da análise de correlação linear de Pearson, foram considerados as médias obtidas nas análises físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas em cada profundidade. Na consideração de atributos quantitativos de correlação, para cada profundidade foram adotados valores padronizados de maneira a representar o aprofundamento do perfil da seguinte forma: 0-5 cm (2,5), 5-10 cm (7,5), 10-20 cm (15), 20-40 cm (30) e 40-60 cm (50), sendo correlacionados com os respectivos atributos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Atributos Morfológicos e Físicos

Nos atributos morfológicos verificou-se uma mudança gradativa da cor com o aprofundamento da seção dos solos estudados (LAd e GXv) (Tabela 2). Embora haja esta mudança, os motivos foram distintos. A cor do solo oferece uma gama de informações a respeito da drenagem, minerais de ferro e matéria orgânica (SPANNER et al., 2014), podendo inferir que os processos que afetam a disponibilidade e retenção do fósforo (P) possam ser distintos nas camadas estratificadas.

**Tabela 2.** Características morfológicas estratificadas em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) de um Latossolo Amarelo Distrófico Típico (LAd) e um Gleissolo Háptico Ta Distrófico (GXv) na Amazônia Central.

Latossolo Amarelo Distrófico Típico (LAd)					
Profundidades	0 – 5 cm	5 – 10 cm	10 – 20 cm	20 – 40 cm	40 – 60 cm
Amostras <sup>(1)</sup>					
Cor <sup>(2)</sup>	10 YR 5/4	10 YR 6/6	10 YR 7/8	10 YR 7/8	10 YR 8/8
Estrutura <sup>(3)</sup>	ft/gn/ag /sb/pq	md/gn/ag /sb/pq/md	md/gn/ag /sb/pq/md	fr/gn/ag /sb/pq/md	fr/gn/ag /sb/pq/md
Consistência Seca	L. Dura	L. Dura	Macia	Macia	Macia
Consistência Úmida	Firme	Friável	Friável	Friável	Friável
Cons. <sup>(4)</sup> Plastic.	L. Plástica	Plástica	Plástica	Plástica	Plástica
Molhada Pegajos.	L. Pegajosa	L. Pegajosa	L. Pegajosa	Pegajosa	Pegajosa
Gleissolo Háptico Ta Distrófico (GXv)					
Profundidades	0 – 5 cm	5 – 10 cm	10 – 20 cm	20 – 40 cm	40 – 60 cm
Amostras					
Cor	5 YR 5/8	5 YR 6/8	5 YR 7/8	5 YR 7/4	5 YR 8/2
Estrutura	md/gn/ag /sb/pq	fr/gn/ag /sb/pq/md	fr/gn/sb /pq/md	fr/gn/sb /pq/md	fr/gn/sb /pq/md
Consistência Seca	Lig. Dura	Macia	Macia	Macia	Macia
Consistência Úmida	Friável	M. Friável	M. Friável	M. Friável	M. Friável
Cons. Plastic.	Plástica	Plástica	Plástica	Plástica	Plástica
Molhada Pegajos.	Pegajosa	Pegajosa	Pegajosa	Pegajosa	M. Pegajosa

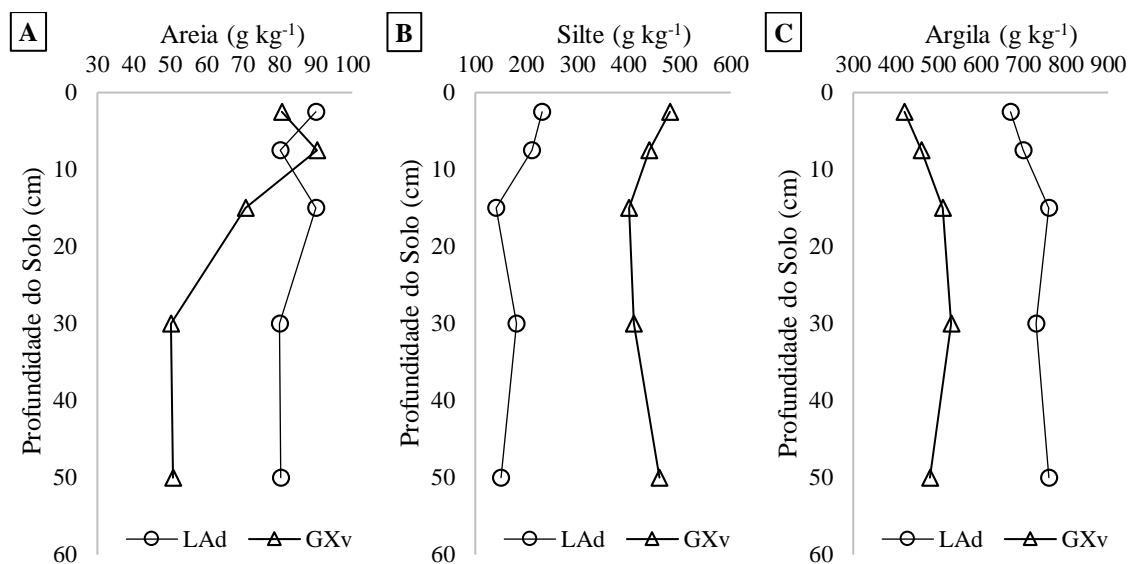
<sup>(1)</sup>Amostras em TFSA; <sup>(2)</sup>Cor do solo segundo Munsell; <sup>(3)</sup>Estrutura: Forte (ft), Fraca (fr), Granular (gn), Angular (ag), Subangular (sb), Pequena (pq), Média (md), <sup>(4)</sup> Consistência: Plasticidade (Plastic.), Pegajosidade (Pegajos.), Ligeiramente (L.).

No Latossolo Amarelo Distrófico Típico (LAd), a alteração se dá pela diminuição da matéria orgânica na direção dos horizontes subsuperficiais, transacionando-se a cor de Marrom-amarelado (10 YR 5/4) a Amarelado (10 YR 8/8), evidenciando a prevalência do mineral de ferro goethita (FeOOH) em relação ao ferro hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e indicando boa drenagem (SPANNER et al., 2014). No Gleissolo Háptico Ta Distrófico (GXv), a coloração é modificada de 5 YR 5/8 (Vermelho-amarronzado) a 5 YR

8/2 (Branco-acinzentado), devido ao processo de gleização, na qual há redução química e dos minerais de Fe na ausência de oxigênio (O<sub>2</sub>) por determinado período e, conseqüentemente, a saída deste da seção do solo (SCHAEFER et al., 2017).

Nos atributos físicos, os teores de areia (grossa + fina) representam menos de 10% da granulometria dos solos observados. O comportamento de diminuição da areia em profundidade também foi observado por outros autores em solos Amazônicos (MACEDO, 2009; GUIMARÃES et al., 2013) (Figura 3A). Em ambos os solos, os teores de silte apresentaram diminuição até 20 cm e leve estabilização em profundidade (> 20 cm) (Figura 3B). Observou-se que enquanto no Latossolo os teores de silte alcançam no máximo 25% da granulometria, no Gleissolos chega a próximo de 50%. Em seu trabalho de caracterização, Lima (2001) observou o mesmo comportamento nos Gleissolos, majoritariamente siltosos e relação provável com a baixa pedogênese de ambientes hidromórficos em relação aos de terra firme.

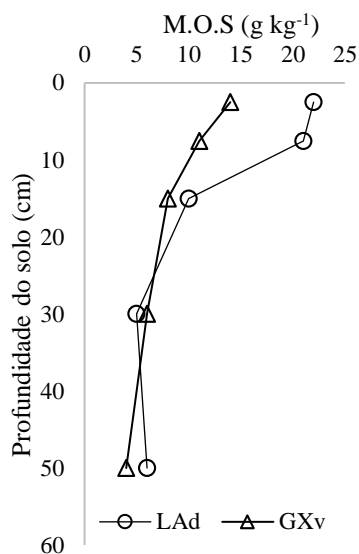
Em relação aos teores de argila, notou-se elevação crescente nos primeiros 20 cm em ambos os solos, porém com teores mais elevados para o Latossolo, devido à alta intemperização em seu processo pedogenético (SCHAEFER et al., 2017) (Figura 3C). Segundo Novais et al. (2007), o teor de argila de um solo, bem como o tipo de argila presente tem forte relação com os íons ortofosfáticas carregados negativamente e segundo estudos de Falcão e Silva (2004) em alguns solos Amazônicos, a correlação entre a argila e a capacidade de adsorção de fósforo (P) apresentam alta afinidade. De acordo com Bahia Filho et al. (1983), a relação argila e adsorção de P nem sempre é sinérgica, podendo variar com sua característica.



**Figura 3.** Teores de areia (A) silte (B) e argila (C) de um Gleissolo Háptico (GXv) e um Latossolo Amarelo (LAd) em profundidade (0-60 cm) na Amazônia Central.

Em ambos os solos ocorre a diminuição gradativa dos teores de matéria orgânica do solo (M. O. S.), de forma mais intensa no Latossolo Amarelo (LAd) (Figura 4). De forma prática, a diminuição da M.O.S das camadas inferiores do solo tem relação direta com a modificação da cor do LAd e atua de forma similar no Gleissolo Háptico (GXv) e isso se dá pela diminuição das fontes orgânicas em

profundidade, promovendo modificações estruturais e químicas do solo (BUNEMANN, 2015). A matéria orgânica pode atuar de formas distintas na adsorção de P no solo, podendo elevar o processo, através de pontes de cátions com o Fe e Al, por exemplo, ou pode atuar diretamente no bloqueio dos sítios de adsorção presentes na superfície das argilas e dos óxidos (AQUINO, 2004; YAN et al., 2016).

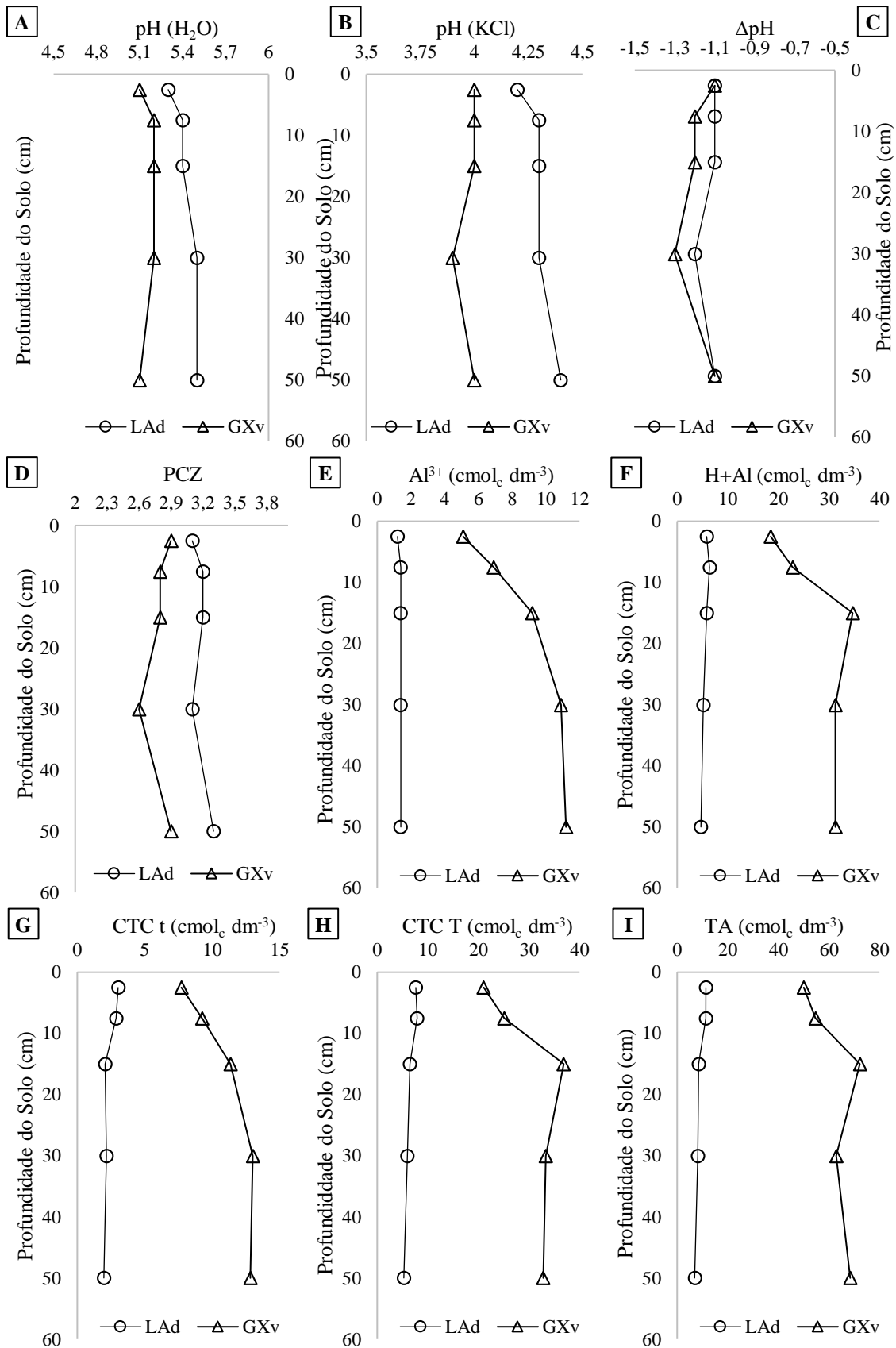


**Figura 4.** Teores de matéria orgânica de um Gleissolo Háplico (GXv) e um Latossolo Amarelo (LAd) em profundidade (0-60 cm) na Amazônia Central.

### 3.2. Atributos Químicos

O pH em água (H<sub>2</sub>O) e em cloreto de potássio (KCl) apresentaram tendência de aumento em ambos os solos estudados com a profundidade (Figura 5A e 5B). Apesar do pH água dos solos com valores entre 5,1 e 5,5, o pH normalmente verificado para solos da Amazônia está abaixo dos 4,5 na maioria dos casos, como observados por Lima (2001), Falcão e Silva (2004) e Oliveira et al., (2019). O pH do solo pode ter dupla influência na disponibilidade e adsorção de fósforo (P) no solo. Por um lado, a elevação do pH reduz a formação de precipitados estáveis, principalmente com Fe e Al. Por outro lado, as cargas variáveis dos minerais tornam-se mais negativas, promovendo a repulsão das moléculas fosfatadas e a superfície, conseqüentemente diminuindo os processos de fixação (BARROW, 1985; CUNHA et al., 2014).

Os valores obtidos de ΔpH entre -1,1 e -1,3, determinados a partir da diferença entre o pH (KCl) – pH (H<sub>2</sub>O), indicam uma carga superficial líquida negativa do solo, o que em resumo significa que a capacidade de trocar cátions do solo (CTC) supera a capacidade de trocar ânions (CTA), como o H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> e o HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, em pH natural nestes solos (CUNHA et al., 2014) (Figura 5C). Os valores encontrados neste trabalho corroboram pelos encontrados por Ferreira e Botelho (1999), entre -1,1 e -1,2 em 12 solos da Amazônia Central. Segundo Kiehl (1979), a presença de ΔpH negativo representa a predominância de argilas silicatadas em detrimento de óxidos e hidróxidos.



**Figura 5.** Teores de pH em água (A) e em KCl (B), Delta pH (C), ponto de carga zero (D), alumínio trocável (E), acidez potencial (F), capacidade de troca de cátions efetiva (G), capacidade de troca de cátions potencial (H), atividade da argila (I) de um Gleissolo Háptico (GXv) e um Latossolo Amarelo (LAd) em profundidade (0-60 cm) na Amazônia Central.

Assim como o  $\Delta\text{pH}$ , o ponto de carga zero (PCZ) foi similar entre os solos estudados (Figura 5D). O PCZ é um importante fator na determinação das cargas variáveis da superfície dos minerais (BALDOTTO e VELLOSO, 2014). O PCZ entre os minerais é distinta; enquanto o PCZ da caulinita situa-se em torno de pH 3,5-4,0, dos minerais de Fe (Hematita e Goethita) entre 8,0-8,5, dos minerais de Al (Gibbsita) entre 6,0-6,5 e a M.O.S abaixo de 2,0 (DEMATTE, DEMATTE, 1993, ALLEONI, 2017). De forma geral, os valores de PCZ tendem a elevar-se em profundidade, devido a diminuição da matéria orgânica do solo, elevando a adsorção de P (ALLEONI, 2017).

Os teores de alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) apresentaram-se praticamente constantes no Latossolo Amarelo (LAd) e menos elevados em relação ao Gleissolo Háplico (GXv) (Figura 5E). Apesar disso, teores de  $\text{Al}^{3+}$  trocável acima de  $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  é considerado elevado em solos amazônicos por Cravo et al., (2007). Ao estudar dez Latossolos Amarelos na Amazônia Central, Barbosa (2017) verificou teores de  $\text{Al}^{3+}$  entre 0,80 e  $1,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , corroborando com os encontrados neste trabalho. No GXv, os teores de  $\text{Al}^{3+}$  trocável diferem dos encontrado em Gleissolos da Amazônica por Guimarães et al. (2013), que verificaram máximos de  $4,71 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Em Plintossolos, solos que passam por algum processo de hidromorfização, Lima (2001) verificou teores acima de  $10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Em geral, solos com maior  $\text{Al}^{3+}$  trocável, têm maior propensão a formação de precipitados de cátions livres de Al com o P ( $\text{AlPO}_4$ ), diminuindo a disponibilidade (GATIBONI et al., 2013).

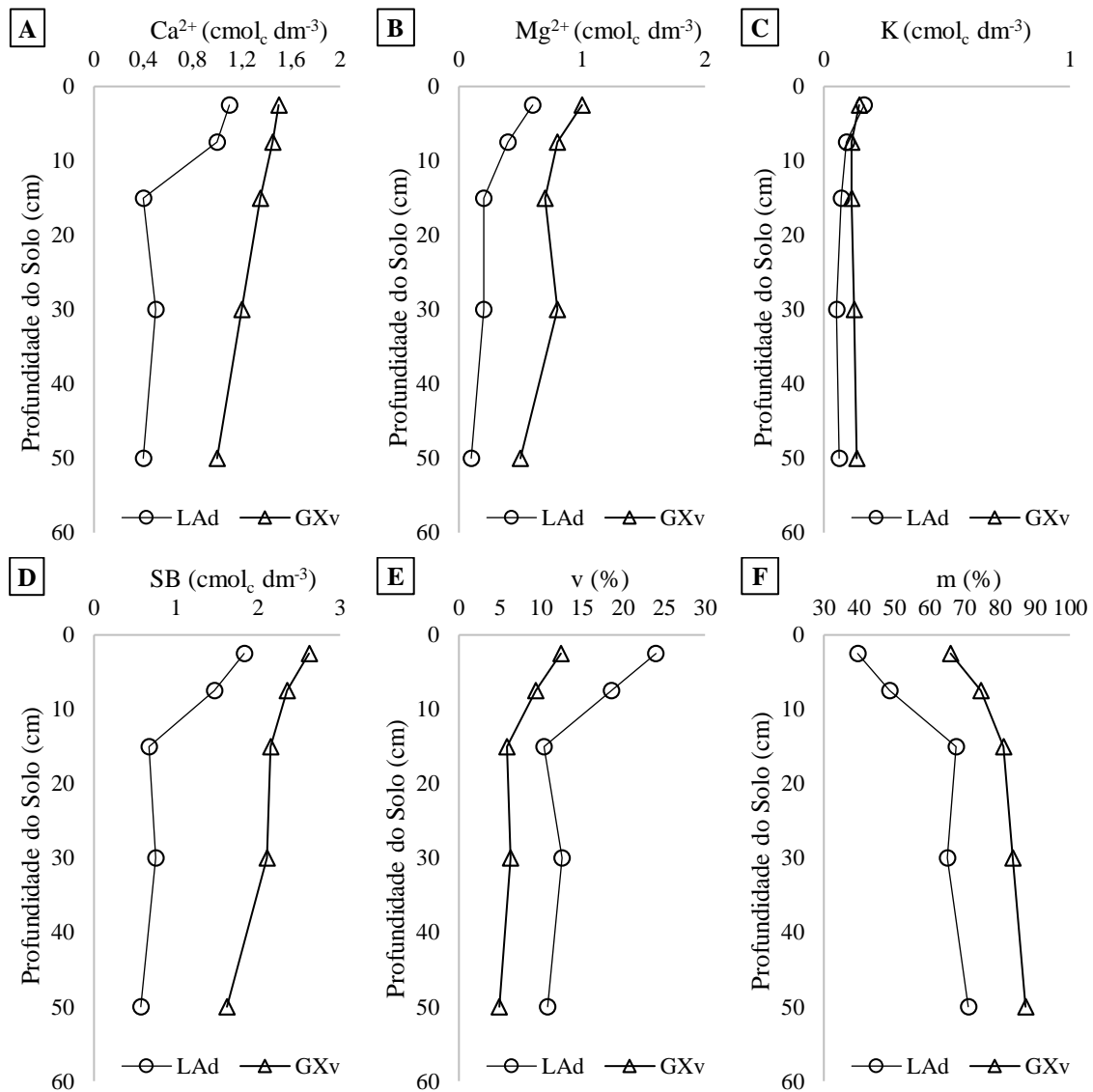
A acidez potencial (H+Al) variou de 4,7 a  $6,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  no Latossolo, diminuindo em profundidade e de 18,5 a  $34,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  no Gleissolo, elevando em profundidade (Figura 5F). Segundo CFSFMG (1999), teores de H+Al acima de  $9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  são considerados muito altos e refletem um poder tampão elevado do solo (HUSNI et al., 1995). De acordo com Guilherme et al. (2000), nos Gleissolos, os altos valores de H+Al estão diretamente relacionados com o aumento da adsorção de P, pois há um aumento da retenção de  $\text{Fe}^{2+}$  e consequente geração de cargas negativas, o que após a drenagem, este pode ser oxidado, levando a maior adsorção.

Tanto a CTC efetiva (t) quanto a CTC potencial (T) foram mais elevadas no Gleissolo Háplico do que no Latossolo Amarelo e com tendência de aumento em profundidade (Figura 5G e 5H). Os maiores valores de CTC no Gleissolos indica a presença de minerais de argila com alta atividade, como os minerais 2:1, conferindo a estes solos alta CTC (GUIMARÃES et al., 2013). Em geral, nos Latossolos são verificados CTC's inferiores a  $10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , como os verificados por Tucci (1991) e Falcão e Silva (2004) na Amazônia Central. Em síntese, o aumento da CTC parece ter pouca influência na adsorção de fósforo no solo, tendo em vista as moléculas ortofosfáticas serem negativamente carregadas, gerando menor aderência nas superfícies coloidais carregadas negativamente (NOVAIS et al., 2007).

Em relação a atividade da argila (A.A), enquanto no Latossolo apresenta em todas as profundidades baixa atividade ( $< 27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), no Gleissolo a atividade é alta ( $> 27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em todas as profundidades (SANTOS, 2018). Na Amazônia, em um Latossolo Amarelo distrófico Típico, Lima (2001) observou valores de atividade de argila de  $21,04 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  em superfície diminuindo para abaixo de  $7,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  em profundidade, porém corroborando com a predominância de argilas de

baixa atividade em Latossolos (Figura 5I). Este mesmo autor, ao analisar um Gleissolo Háplico Ta eutrófico verificou máxima acima de  $74,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nas camadas superiores, corroborando igualmente com os resultados aqui obtidos.

Apesar do Gleissolo Háplico apresentar teores de nutrientes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}$ ) mais elevados que o Latossolo Amarelo, os teores tendem a diminuir em profundidade em ambos os solos, devido a diminuição da matéria orgânica (Figura 6A, 6B e 6C). De acordo com a classificação de nutrientes de Cravo et al. (2007), os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}$  encontrados em ambos os solos são classificados como baixos, característica inerente a formação e lixiviação de nutrientes na Amazônia. Os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  ligeiramente superiores no Gleissolo podem ter relação a materiais recentemente depositados ou com menor exposição ao intemperismo (RODRIGUES, 1996).



**Figura 6.** Teores de cálcio (A), magnésio (B), potássio (C), soma de bases (D), saturação por bases (E) e saturação por alumínio (F) de um Gleissolo Háplico (GXv) e um Latossolo Amarelo (LAd) na Amazônica Central.

### 3.3. Atributos Mineralógicos

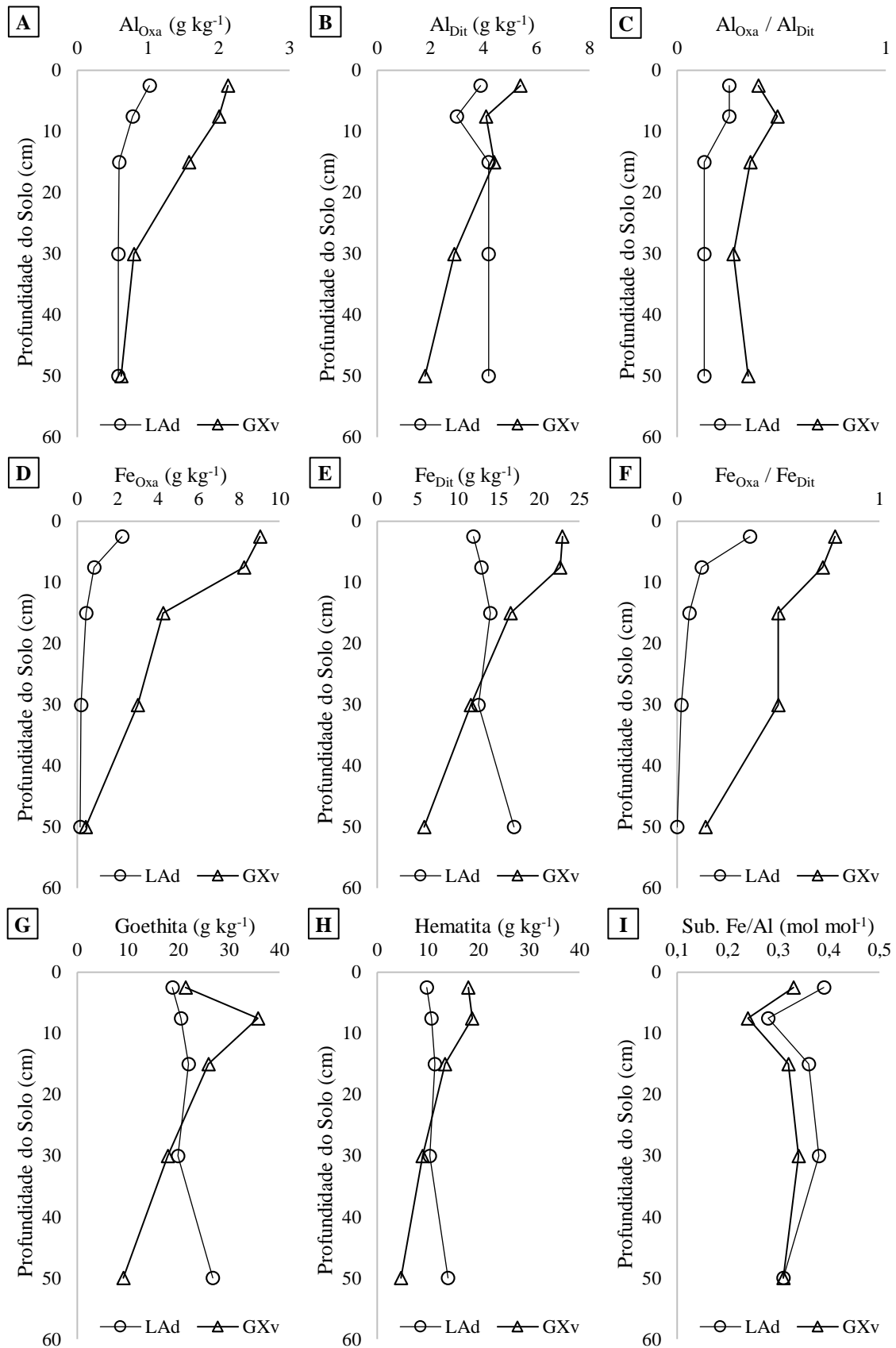
Para o Latossolo Amarelo (LAd), os teores de Alumínio Oxalato (mal cristalizado) variaram de 1,02 g kg<sup>-1</sup> em superfície (0-5 cm) para 0,58 g kg<sup>-1</sup> em subsuperfície (40-60 cm), enquanto no Gleissolo Háptico (GXv) variou de 2,13 para 0,62 g kg<sup>-1</sup> nas mesmas condições. Apesar do mesmo comportamento tenha sido observado por Lima (2001) para solos semelhantes e em estratos distintos, os teores encontrados foram menores dos observados por ele. Comportamento semelhante foi observado para os teores de Ferro Oxalato, sendo para o LAd de 2,21 para 0,42 g kg<sup>-1</sup> e para o GXv de 9,03 para 0,62 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente em superfície e em subsuperfície (Figura 7A e 7D).

A redução dos teores dos minerais mal cristalizados deve-se possivelmente ao efeito de inibição da matéria orgânica nas camadas superiores e especificamente no Gleissolo, os períodos de inundação contribuem mais fortemente para a não cristalização das formas de Al e Fe (SCHWERTMANN, 1966). Em dez Latossolos na Amazônia Central, Barbosa (2017) verificou teores de Fe mal cristalizados entre 0,14 e 0,31 g kg<sup>-1</sup>, inferiores aos observados neste trabalho.

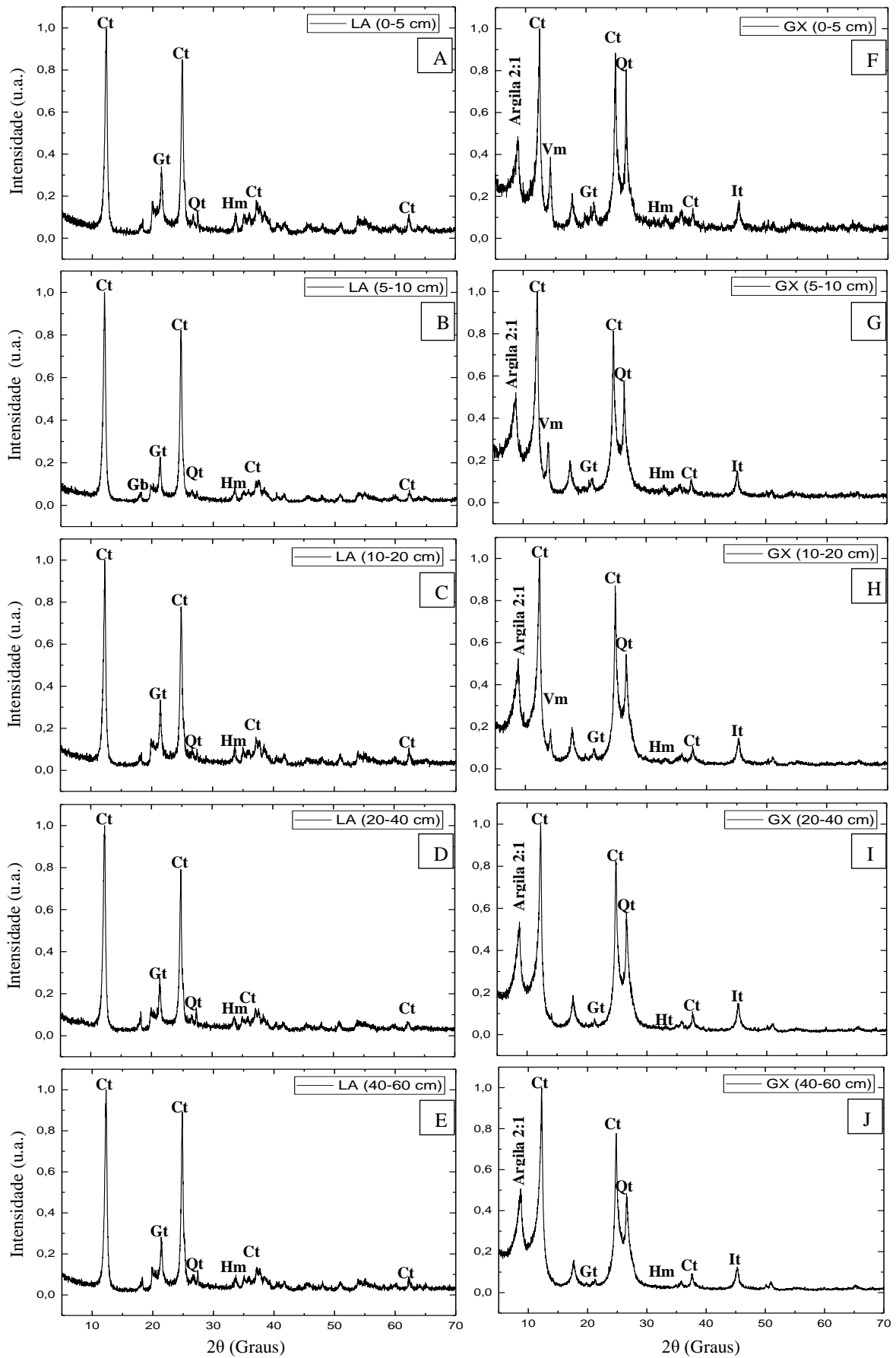
Nas formas cristalinas de Ferro e Alumínio (Fe<sub>Dit</sub> e Al<sub>Dit</sub>), obteve-se comportamento similar ao mal cristalizados (Figura 7B e 7E). No GXv, há forte redução dos minerais de Fe e Al da superfície para a subsuperfície, respectivamente de 22,9 para 5,8 g kg<sup>-1</sup> e de 5,4 para 1,8 g kg<sup>-1</sup>. Em contrapartida, ambos os teores foram elevados em subsuperfície no LAd. As condições de subsuperfície encontradas no Latossolo, como baixa matéria orgânica e ambiente drenado podem ter influência no envelhecimento dos óxidos de Ferro, enquanto nas condições subsuperficiais do Gleissolo, o ambiente reduzido em períodos prolongados modificam a estrutura dos minerais, retirando-os do sistema e/ou dificultando sua perfeita cristalização (SCHWERTMANN, 1966; KÄMPF e CURI, 2000; LIMA, 2001).

Tanto na relação Al<sub>oxalato</sub>/Al<sub>ditionito</sub> quanto na relação Fe<sub>oxalato</sub>/Fe<sub>ditionito</sub>, o Gleissolo Háptico apresentou maior quantidade de minerais mal cristalizados em relação ao Latossolo Amarelo, em decorrência da sua condição redox (Figura 7C e 7F; Figura 8). De forma geral, as maiores relações na superfície de ambos os solos já eram esperadas, tendo em vista que a presença da matéria orgânica na superfície dificulta a cristalização dos óxidos em relação a subsuperfície (LIMA, 2001). A redução dos minerais amorfos e mal cristalizados podem ter influência direta na adsorção de fósforo, uma vez que segundo Gerard (2016), a capacidade de sorção dos óxidos de Fe e Al aumenta proporcionalmente com o aumento da sua superfície específica, criando mais pontos de contato com o H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>4-</sup> e o HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.





**Figura 7.** Teores de alumínio oxalato (A), alumínio ditionito (B), relação alumínio oxalato : alumínio ditionito (C), ferro oxalato (D), ferro ditionito (E), relação alumínio oxalato : alumínio ditionito (F), goethita (G), hematita (H) e substituição isomórfica (I) de um Gleissolo Háplico (GXv) e um Latossolo Amarelo (LAd) em profundidade (0-60 cm) na A4mazônica central.



**Figura 8.** Difratometria de Raios-X de um Gleissolo Háplico (GXv) e um Latossolo Amarelo (GXv) na Amazônia Central nas profundidade 0-5 cm (A-F), 5-10 cm (B-G), 10-20 cm (C-H), 20-40 cm (D-I) e 40-60 cm (E-J).

Proporcionalmente aos teores de Fe ditionito e oxalato, o comportamento dos teores de Goethita-Gt ( $\text{FeOOH}$ ) e Hematita-Hm ( $\text{Fe}_3\text{O}_2$ ) foram similares. No Latossolo Amarelo, houve aumento em profundidade de 18,8 para 26,8  $\text{g kg}^{-1}$  de Gt e de 9,8 para 14,8  $\text{g kg}^{-1}$  de Hm, respectivamente na superfície (0-5 cm) para subsuperfície (40-60 cm). Em iguais condições, no Gleissolo Háplico, houve diminuição de 21,4 para 9,1  $\text{g kg}^{-1}$  de Gt e de 18,5 para 4,7  $\text{g kg}^{-1}$  de Hm (Figura 7G e 7H). Para solos da Amazônia central, Barbosa (2017) observou teores de Goethita entre 3,62 e 59,74  $\text{g kg}^{-1}$  e de Hematita entre 3,35 e 53,37  $\text{g kg}^{-1}$ . De forma prática, a diminuição dos teores destes óxidos de ferro no Gleissolos pode ser confirmada pela mudança gradativa na coloração das camadas.

De forma geral, os valores de substituição isomórfica de Fe por Al foram similares entre o Gleissolo e o Latossolo, variando de 0,39 e 0,31 e entre 0,33 e 0,24  $\text{mol mol}^{-1}$  (Figura 7I). Os valores observados foram mais elevados do que os observados por Moller (1991), Lima (2001) e similares aos obtidos por Barbosa (2017) em solos Amazônicos. As substituições no Latossolo e principalmente em superfície são mais elevadas do que no Gleissolo, o que provavelmente está relacionados a maior mobilidade de Fe deste do que naquele (FITZPATRICK e SCHWERTMANN, 1982).

Qualitativamente, observando os difratogramas da fração argila, é possível observar que há picos muito similares as cinco profundidades estudadas do Latossolo Amarelo, onde há predominância de minerais como caulinita, goethita, hematita, quartzo e traços de gibbissita (Figura 7A, 7B, 7C, 7D e 7E). No Gleissolo Háplico foram observados picos de minerais de Caulinina, Goethita, Hematita, Quartzo, Vermiculita, Ilita e outros minerais do tipo 2:1 (Mica, Esmectita) (Figura 7F, 7G, 7H, 7I e 7J). De acordo com Teixeira et al. (2010), nos Latossolos da Amazônia, há predominância de minerais de argila 1:1, como a caulinita e de óxidos de Ferro (Goethita e Hematita). Analisando uma Toposequência na Amazônia Central, Lima et al. (2006) verificou minerais parecidos em solos com algum grau de hidromorfismo, não observando diferenças expressivas dos minerais encontrados na superfície ou subsuperfície desses solos.

O predomínio da caulinita na fração argila já foi relatada em outros trabalhos em solos Amazônicos (LIMA et al., 2006; GARCIA et al., 2013; BARBORA, 2017). Segundo Marques et al. (2010), a natureza caulínica deve-se a longos períodos de intemperismo químico e físico, tornando-as abundantes e estáveis em solos amazônicos. De acordo com Sombroek (1966), as caulinitas podem compor até 80% dos minerais da fração argila, contudo, segundo Gérard (2016), as caulinitas podem apresentar taxas de sorção de fósforo menores que os demais minerais devido sua menor superfície específica e o baixo PCZ. Em contrapartida, os minerais de Fe comuns em solos tropicais intemperizados, por possuírem maior superfície específica e maior PCZ, a sorção tende a ser mais elevada. Segundo Fox e Sedarle (1978), a sorção de P obedece a uma sequência em que há preferência nos óxidos amorfos de Fe e Al > óxidos Cristalinos de Fe e Al e Argila 1:1.

### **3.4. Correlação entre atributos e profundidade das camadas do solo**

Na Tabela 3 estão inseridos os coeficientes de correlação linear de Pearson (R) em relação ao aprofundamento do perfil (de 0 a 60 cm) e os principais atributos físicos, químicos e mineralógicos do Latossolo Amarelo distrófico (LAd) e o Gleissolo Háptico Ta (GXv). Os atributos com correlação negativa (-) significam que com o aumento da profundidade os atributos tendem a diminuir, ao contrário, nas correlações positivas (+), os atributos aumentam com o aumento da profundidade do solo (Tabela 3).

**Tabela 3.** Correlação Linear de Pearson (R) entre as profundidades (0-60 cm) e os atributos físicos, químicos e mineralógicos de um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) e um Gleissolo Háptico Ta (GXv) na Amazônia Central, Brasil.

Atributos do Solo	Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (R)	
	Latossolo Amarelo distrófico	Gleissolo Háptico Ta
Atributos químicos x Aprofundamento do solo (0-60 cm)		
Potencial hidrogeniônico em água (pH H <sub>2</sub> O)	0.87*	-0.24ns
Potencial hidrogeniônico em KCl (pH KCl)	0.87*	-0.26ns
Delta pH ( $\Delta$ pH)	-0.26ns	0.02ms
Ponto de carga zero (PCZ)	0.59ns	-0.07ns
Matéria orgânica do solo (M.O.S)	-0.85**	-0.93**
Alumínio trocável (Al <sup>3+</sup> )	0.53ns	0.89*
Acidez potencial (H+Al)	-0.90*	0.63ns
Cálcio disponível (Ca <sup>2+</sup> )	-0.76ns	-0.99**
Potássio disponível (K <sup>+</sup> )	-0.78ns	0.24ns
Magnésio disponível (Mg <sup>2+</sup> )	-0.84*	-0.84*
Capacidade de troca de cátions efetiva (CTC-t)	-0.80*	0.86*
Capacidade de troca de cátions potencial (CTC-T)	-0.93**	0.60ns
Atividade da argila (TA)	-0.91*	0.63ns
Soma de bases (SB)	-0.80*	-0.95**
Saturação por bases (v%)	-0.71ns	-0.80*
Saturação por alumínio (m%)	0.79ns	0.88*
Atributos físicos x Aprofundamento do solo (0-60 cm)		
Areia Total	-0.57ns	-0.87*
Silte	-0.66ns	-0.08ns
Argila	0.73ns	0.49ns
Atributos mineralógicos x Aprofundamento do solo (0-60 cm)		
Alumínio oxalato (Al <sub>o</sub> )	-0.73ns	-0.95**
Alumínio ditionito (Al <sub>d</sub> )	0.54ns	-0.95**
Ferro oxalato (Fe <sub>o</sub> )	-0.74ns	-0.95**
Ferro ditionito (Fe <sub>d</sub> )	0.81*	-0.98**
Goethita (Gt)	0.82*	-0.80*
Hematita (Hm)	0.83*	-0.97**
Relação alumínio oxalato : ditionito (Al <sub>o</sub> /Al <sub>d</sub> )	-0.75ns	-0.59ns
Relação ferro oxalato : ditionito (Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub> )	-0.71ns	-0.96**
Substituição isomórfica de Fe por Al (S. Fe/Al)	-0.20ns	0.25ns

(\*\*) significativo a 1 % (p < 0,01); (\*) significativo a 5% (< 0,05); (ns) não significativo pelo Teste t de probabilidade. (1)

Nos atributos químicos, o pH do solo (0.87\*) em água e KCl (0.87\*) e saturação por alumínio (m%) (0.81\*) aumenta em profundidade no Latossolo Amarelo. No Gleissolo, a saturação por alumínio (m%) e o Al<sup>3+</sup> trocável eleva-se com o aprofundamento do perfil. Em ambos os solos, o aumento da concentração de alumínio em profundidade pode elevar a precipitação de P nas camadas inferiores (NOVAIS et al, 2007). A acidez potencial (H+ Al) (-0.90\*), Mg<sup>2+</sup> (-0.84\*), CTC efetiva (CTC-t) (-

0.80\*), CTC potencial (CTC-T) (-0.93\*\*), atividade de argila (Ta) (-0.91\*) e soma de bases (SB) (-0.80\*) tendem a diminuir em profundidade no Latossolo Amarelo. No Gleissolo Háplico, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  (-0.99\*\*),  $\text{Mg}^{2+}$  (-0.84\*), SB (-0.95\*\*) e saturação por bases (v%) (-0.80\*) diminuem em profundidade. De forma geral, a diminuição dos atributos de fertilidade pode contribuir com o aumento da adsorção de P à medida que aumenta, visto que as condições desses são amplamente conhecidas (SANCHEZ et al., 1982; NOVAIS et al., 2007; GUIMARÃES et al., 2013).

Com relação aos atributos físicos, a matéria orgânica diminui em profundidade no Latossolo (-0.85\*) e no Gleissolo (-0.93\*\*). Segundo Novais et al. (200), a diminuição da matéria orgânica em profundidade pode aumentar a adsorção de P em profundidade. Houve correlação significativa entre o aprofundamento do Gleissolo e os teores de areia (-0.87\*), indicando que o Latossolo se torna mais siltoso e/ou argiloso em profundidade. Nos atributos mineralógicos, no Latossolo, o ferro ditionito (cristalino) (0.81\*), teores de goethita (Gt) (0.82\*) e teores de hematita (Hm) (0.83\*) correlacionaram positivamente com o aprofundamento do solo, indicando o aumento dos óxidos em profundidade. Segundo Parfit et al. (1975), o aumento de teores de minerais de Fe amorfos e cristalinos tem correlação direta com a adsorção de P no solo, devido principalmente à superfície positiva destes.

No Gleissolo, os teores de alumínio e ferro oxalato (amorfos) (-0.95\*\*), os teores de alumínio e ferro ditionito (-0.95\*\* e -0.98\*\*), teores de goethita e hematita (-0.80\* e -0.97\*\*) e a relação Fe oxalato/Fe ditionito (-0.96\*\*) correlacionaram significativamente com o aumento da profundidade. Segundo Fernandez et al. (2008), a diminuição da quantidade destes minerais indica o forte processo de hidrólise promovido pelo alagamento em períodos do ano, favorecendo a diminuição de pontos de ligação de P com os óxidos, diminuindo consequentemente a adsorção de P.

#### 4. CONCLUSÕES

1. O alto desenvolvimento pedogenético confere teores maiores de argila no Latossolo Amarelo enquanto o ambiente parcialmente reduzido torna o Gleissolo Háptico mais siltoso.

2. As cores obtidas nas camadas do Gleissolo Háptico evidenciam o fenômeno do hidromorfismo. A plasticidade e pegajosidade em ambos os solos refletem as características da matriz caulínica de solos amazônicos.

3. As condições de fertilidade mais elevadas Gleissolo Háptico são decorrentes da influência da inundação do rio Solimões e em ambos os solos a diminuição da matéria orgânica dos solos em profundidade promovem diminuição da fertilidade.

4. A intensa diminuição das formas amorfas e cristalinas de Fe e Al no Gleissolo Háptico denotam a forte influência do ambiente reduzido sobre estes minerais. A presença de minerais 2:1 evidenciam a relação do ambiente com as características dos solos.

5. A diminuição da matéria orgânica e a diminuição dos óxi-hidróxidos em profundidade explicam a relação do P com o solo, respectivamente no Latossolo Amarelo e no Gleissolo Háptico

## 5. REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L. R.; CERRI, C. E.; REGITANO, J. B. **Química e Fertilidade do Solo**. Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”- ESALQ. Departamento de Ciência do solo, UFV: Viçosa, 2017, 116 p.
- ALVAREZ, V.H.V.; RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H.V. (eds). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação**. Viçosa. p. 43-60, 1999.
- AQUINO, B. F. **Conceitos fundamentais em fertilidade do solo**. Fortaleza: UFC, 2004,182p.
- BAHIA FILHO, A. F. C. **Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 1982. 179p.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A.C. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos do Planalto Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 221-226, 1983.
- BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, C. X. Eletroquímica de solos modais e de sua matéria orgânica em ambientes tropicais. **Revista Ceres**, v. 61, p. 1012-1021, 2014.
- 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. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, v. 3, p. 183-230, 1985.
- BÜNEMANN, E. K. Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus – a review. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 89, p. 82-98, 2015.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ed., Lavras. 1999. 359p.
- COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. (eds), Curitiba, 2010, 282p.
- CRAVO, M.S.; SMYTH, T.J.; BRASIL, E.C. Calagem em Latossolo amarelo distrófico da Amazônia e sua influência em atributos químicos do solo e na produtividade de culturas anuais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 895-907, 2012.
- CRAVO, M.S.; VEIGAS, I.J.M.; BRASIL, E.C. **Recomendações de Adubação e calagem para o estado do Pará**. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 2007, 262 p.
- CUNHA, J.C.; RUIZ, H.A.; BETÂNIA, M., V, V.H.A.; BRAGANÇA, R.; FERNANDES, A., 2014. Quantification of permanent and variable charges in reference soils of the state of Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1162–1169, 2014.
- DEMATTÊ, J. L. I.; DEMATTÊ J. A. M. Comparações entre as propriedades químicas de solos das regiões da floresta amazônica e do cerrado do Brasil central. **Scientia Agricola**, v. 50, p. 272-286, 1993.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SA 20- Manaus.** Volume 17. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro: MME/DNPM, 1978, 554p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo.** 3. ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro, 2017, 573p.

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

FALESI, I. C. **Estado atual de conhecimentos de solos da Amazônia brasileira.** In: 1º Simpósio do trópico úmido; Belém. Belém: Embrapa Trópico Úmido, p. 161-198, 1984.

FARIAS, S. C. C.; SILVA, M. L.; RUIVO, M. L. P.; RODRIGUES, P. G.; MELO, V. S.; COSTA, A. R.; SOUZA, J. C. Phosphorus Forms in Ultisol Submitted to Burning and Trituration of Vegetation in Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-12, 2016.

FERNÁNDEZ, I.E.; NOVAIS, R.F.; NUNES, F.N.; KER, J.C. Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiológica e química: II., extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 2307-2317, 2008.

FERREIRA, W. A.; BOTELHO, S. M. **Efeito da inundação sobre as propriedades de um gleissolo sálico sódico de várzea do rio dos Morcegos no município de Rimavera, PA.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental. 1999, 24p.

FITZPATRICK, R. W.; SCHWERTMANN, U. Al-substituted goethite – na indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma**, v. 27, p. 335-347, 1982.

FOX, R. L. e SIDARLE, P. G. E. Phosphate adsorption by soils of the tropics. In: DROSDOFF, M., ed. Diversity of soils in the tropics. **American Society of Agronomy**, v. 1, p.97-119, 1978.

GAMA, M. A. P. **Dinâmica do fósforo em solo submetido a sistemas de preparo alternativos ao de corte e queima no nordeste paraense.** Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002. 96 p.

GARCIA, C. H. P.; LIMA, H. N.; SILVA, F. W. R.; JUNIOR, N.; FERREIRA, A.; TEIXEIRA, W. G.; MACEDO, R. S.; TAVARES, S. G. Chemical properties and mineralogy of soils with plinthite and petroplinthite in Iranduba (AM), Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 936-946, 2013.

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.

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.

GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; BRENÓ, N.B.; MACHADO, R.A.F. Adsorção de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 27-34, 2000.

GUIMARÃES, S. T.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; NEVES, A. F.; SILVA, F. W. R.; MACEDO, R. S.; SOUZA, K. W. Caracterização e Classificação de gleissolos da Várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 317-326, 2013.



GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; MOODY, P.W.; BLAMEY, F.P.C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.43, p.189-202, 2005.

HUSNI, M. H. A.; DEVI, S.; MANAS, A. R.; ANUAR, A. R.; SHAMSHUDDIN, J. Chemical variables affecting the lime requirement determination of tropical peat soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 26, p. 2111-2122, p. 1995.

KÄMPF, N.; CURI, N. **Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: Tópicos em Ciência do Solo.** NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 107-138, 2000.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relações solo – planta.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

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.

LIMA, H.N.; MELLO, J.W.V.; SCHAEFER C.E.G.R.; KER, J.C.; LIMA, A.M.N. Mineralogia e química de três solos de uma topossequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 59- 68, 2006.

MACEDO, R.S. **Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) em área de várzea do rio Solimões,** AM. Dissertação (Mestrado em Agronomia Tropical). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009. 73p. ]

MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; JUNIOR, O. F. C.; BATISTA, S. M.; AFONSO, M. A. C. B. Atributos químicos, físico-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas: Serra de Parintins. **Acta Amazonica**, v. 40, p. 1-12, 2010.

MATIAS, G. C. S. **Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados em solos com diferentes capacidades de adsorção de fósforo e teores de matéria orgânica.** Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2010. 174 p.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: Clays & Clay Mineral Conference. **Proceedings**, v.7, p.317-327, 1960.

MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo.** Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.2 nd, p.381-447, 2009.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo.** 4<sup>ed</sup>. Porto Alegre: Evangraf, 2010, 280p.

MÖLLER, M.R.F. **Substituição isomórfica em óxidos de ferro de Latossolos da Amazônia e suas implicações na sorção de fósforo.** ESALQ, Piracicaba, 1991. 70p.

MOREIRA, M. L. C.; VASCONCELOS, T. N. N. **Mato Grosso: solos e paisagens.** Cuiabá/MT: Entrelinhas, 2007. 272 p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. **Fósforo.** In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Minas Gerais, p. 471-550, 2007.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, J.T. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais.** Vicoso: UFV, DPS, 1999. 399 p.

OLIVEIRA, D. M.; DAMACENO, J. B. D.; LOBATO, A. C. N.; GUIMARÃES, R. S.; JÚNIOR, J. L.; GUERRINI, I. A.; FALCÃO, N. P. S. Biochar of Bamboo Influencing the Availability of P From Different Phosphate Sources in Dystrophic Yellow Oxisol of Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 242-251, 2019.

PARFITT, R.L.; ATKINSON, R.J.; SMART, R.C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. **Soil Science Society American Journal**, v. 39, p. 837-841, 1975.

RODRIGUES, T.E. **Solos da Amazônia**. In: ALVAREZ, V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p.19-60, 1996.

SANCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G. Low input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, v. 34, p. 280-406, 1982.

SANDIM, A. S. **Disponibilidade de fósforo em função da aplicação de calcário e silicatos em solos oxidicos**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, 2012, 99 p.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, L.S. et al. Efeito do grau de moagem, do tipo de frasco e do volume vazio sobre a variabilidade analítica do Fósforo extraído pelos métodos mehlich-1 e mehlich-3. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1478-1486. 2014.

SANTOS, R. D. dos; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7ª ed. revista e ampliada. Viçosa: SBCS, 2015, 102p.

SCHAEFER, C. E. G. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; VALE JUNIOR, J. F.; SOUZA, K. W.; CORREIRA, G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; AMARAL, E. F.; CAMPOS, M. C. C.; RUIVO, M. L. **Solos da Amazônia**. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds). *Pedologia – Solos dos Biomas Brasileiros*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo., p. 111-176, 2017.

SCHWERTMANN, U. et al. The influence of aluminum on iron oxides. Part II. Preparation and properties of Al-substituted hematites. **Clay Miner**, v.27, p.105-112, 1979.

SCHWERTMANN, U. Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxide. **Nature**, v. 212, p. 645-646, 1966.

SCHWERTMANN, U. The differentiation of iron oxide in soil by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde**, v.105, p.104-201, 1964.

SCHWERTMANN, U. The influence of aluminium on iron oxides: IX. Dissolution of Al-goethites in 6M HCl. **Clay Minerals**, v.19, p.9-19, 1984.

SILVA, F.W.R.; LIMA, H.N.; TEIXEIRA, W.G.; MOTTA, M.B.; SANTANA, R.M. Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (Terra Pretas de Índio) na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 673-681, 2011.

SOMBROEK, W.G. **Amazon Soils- A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region.** Center for Agriculture Publications and Documentation, Wageningen, 1966, 330p.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado.** Informações Agronômicas, Planaltina, v. 102, 2003, p. 1-16.

SPANNER, G. C.; NEVES, É. S. das; NASCIMENTO, J. C. DO; MILÉO, J. A. C.; SILVA, S. A. S. da. Determinação dos aspectos morfológicos do Solo e dendrológicos da vegetação em uma topossequência, em Altamira-PA. **Revista Agrarian Academy**, v. 1, p. 37-46, 2014.

TAN, K. H. **Principles of soil chemistry.** New York: Marcel Dekker, 1982, 267 p.

TEIXEIRA, W. G.; LIMA, H. N.; PINTO, W. H. A.; SOUZA, K. W.; SHINZATO, E.; SCHROTH, G. **O Manejo dos Solos das Várzeas da Amazônia.** In: BERTOL, I; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. S., eds. Manejo e Conservação do Solo e da Água. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p. 703-729, 2019.

TEIXEIRA, J. B. S.; SOUSA, R. O.; VALE, M. L. C. Phosphorus adsorption after drainage in two soil classes. **Revista Ceres.** v. 65, p. 196-203, 2018.

TEIXEIRA, W. G.; ARRUDA, W.; SHINZATO, E.; MACEDO, R. S.; MARTINS, G. C. LIMA, H. N.; RODRIGUES, T. E. **Solos do Estado do Amazonas.** In: MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L., eds. Geodiversidade do Estado do Amazonas. Manaus, CPRM, p.71-86, 2010.

TEIXEIRA, W.G.; CRUZ, M.E.G.; LIMA, H.N.; CORREIA, M.R.D.; SOARES, C.B. **Mapa de Solos do Município de Iranduba** (Escala 1: 200.000). In: Mapas Pedológicos de Municípios do Médio Solimões: Área de Estudo do Piatam-Embrapa, UFAM, SIPAM. Manaus, EDUA, 2007.

TELES, A. P. B; RODRIGUES, M; BEJARANO HERRERA, W. F; et al. Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil Use and Management**, v. 33, p. 34-44, 2017.

TIRLONI, C.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; TIRLONI, D.; COIMBRA, D. S. Disponibilidade de fósforo em função das adições de calagem e de um bioativador do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 977-984, 2009.

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. 142 p.

UEHARA, G. **Mineralo-chemical properties of Oxisols.** In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 2., Bangkok. Anais. Bangkok, Soil Survey Division, Land Development Department, 1979.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Keys to Soil Taxonomy.** 11<sup>th</sup>ed, 2011, 345 p.

VALE JÚNIOR, J. F. et al. Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. **Revista Agro@mbiente**, v. 5, p. 158-165, 2011.

YAN, J.; JIANG, T.; YAO, Y.; LU, S.; WANG, Q.; WEI, S. Preliminary investigation of phosphorus adsorption onto two types of iron oxide-organic matter complexes. **Journal of Environmental Sciences**, v. 42, p 152-162, 2016.

YANG, X.; POST, W. M.; THORNTON, P. E.; AND JAIN, A.: The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling. **Biogeosciences**, v. 10, p. 2525–2537, 2013.



**UFAM**

JOÃO BATISTA DIAS DAMACENO

## **CAPÍTULO II**

# **ADSORÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO DE UM GLEISSOLO HÁPLICO E UM LATOSSOLO AMARELO NA AMAZÔNIA CENTRAL**

MANAUS-AM  
2020

## CAPÍTULO II: ADSORÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO DE UM GLEISSOLO HÁPLICO E UM LATOSSOLO AMARELO DA AMAZÔNIA CENTRAL

**RESUMO:** A adsorção e a disponibilidade de fósforo (P) na Amazônia podem variar entre as diversas classes de solo e entre a superfície (< 20 cm) e a subsuperfície (> 20 cm). Compreender a relação do P com o solo pode subsidiar a fertilização fosfatada na região. O estudo foi realizado em dois tipos de solos: um perfil de solo Hidromórfico (Latosolo Amarelo - LAd) e um perfil de solo Não-hidromórfico (Gleissolo Háptico- GXv) na Amazônia Central do Brasil. Foram estudadas cinco profundidades: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Foi realizada a caracterização física, química e mineralógica de ambos os solos e as profundidades. Nos atributos de adsorção e disponibilidade de P foram avaliados: P remanescente (P-Rem), P disponível (P-Disp), capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), Energia de Ligação de P (EA) e o Fator capacidade de P (FCP). Adicionalmente construiu-se isotermas de adsorção de P de Langmuir e estruturadas correlações entre os principais fatores de adsorção e os atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo. Não houve diferenças entre o P-Disp entre os solos. O P-Rem foi similar entre os solos na superfície, porém mais elevado na subsuperfície do GXv. O comportamento da isoterma de Langmuir foi similar entre as profundidades do LAd e diferente no GXv apenas na profundidade 40-60 cm. A menor CMAP foi menor em profundidade do GXv e menos na subsuperfície do LAd. A EA foi mais elevada no GXv. O FCP foi maior no GXv que no LAd em profundidade. No solo não hidromórfico, a diminuição da matéria orgânica e maior concentração dos óxidos de Fe em com o aprofundamento do perfil parecem explicar a adsorção de P. No solo hidromórfico, a diminuição da matéria orgânica e a menor concentração dos óxidos, devido a gleização, indicam o comportamento de sorção de P.

**Palavras-Chaves:** Isoterma, Langmuir, CMAP, Perdas de P, Solos Amazônicos.

**ABSTRACT:** The adsorption and availability of phosphorus (P) in the Amazon may vary between different classes of soil and between the surface (<20 cm) and the subsurface (> 20 cm). Understanding the relationship of P to the soil can subsidize phosphate fertilization in the region. The study was carried out in two types of soils: a hydromorphic soil profile (Dystrophic Yellow Oxisol - LAd) and a non-hydromorphic soil profile (Haplic Gleysol - GXv) in the Central Amazon of Brazil. Five depths were studied: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm. Physical, chemical and mineralogical characterization of both soils and depths was carried out. In the attributes of adsorption and availability of P, the remaining P (P-Rem), available P (P-Disp), maximum P adsorption capacity (CMAP), P binding energy (EA) and the Factor P (FCP). Additionally, Langmuir P adsorption isotherms were constructed and structured correlations between the main adsorption factors and the physical, chemical and mineralogical attributes of the soil. There were no differences between P-Disp between soils. P-Rem was similar among the soils on the surface, but higher on the GXv subsurface. The behavior of the Langmuir isotherm was similar between the depths of the LAd and different in the GXv only at a depth of 40-60 cm. The smallest CMAP was smaller in depth of GXv and less in the subsurface of the LAd. EA was higher in GXv. The FCP was higher in GXv than in LAd in depth. In non-hydromorphic soil, the decrease in organic matter and a higher concentration of Fe oxides, with the deepening of the profile, seem to explain the adsorption of P. In hydromorphic soil, the decrease in organic matter and the lower concentration of oxides due to gleization, indicate the sorption behavior of P.

**Keywords:** Isotherm, Langmuir, CMAP, P losses, Amazonian soils.

## 1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre a adsorção e disponibilidade de fósforo (P) em solos da Amazônia, apesar de não muito intensos, são frequentes e importante (SINGH et al., 1983, TUCCI, 1991, LIMA, 2001; FALCÃO e SILVA, 2004; NOVAIS et al., 2007; BARBOSA, 2017; MATOS et al., 2017; DAMACENO et al., 2019). Como demonstrado por vários destes autores, a capacidade de adsorção e os fenômenos que envolvem o processo complexo de retenção do P em solos da Amazônia são distintos entre as mais diversas classes de solos e entre profundidades, porém com estudos que propiciam o aprofundamento dos conhecimentos sobre este elemento.

Ambientes típicos e distintos da Amazônia promovem o surgimento de solos com características físicas, químicas e mineralógicas. É comum na região a distinção entre solos de “Terra firme” e solos de “Varzea”, que respectivamente apresentam características não-hidromórficas e hidromórficas (LIMA et al., 2006; TEIXEIRA et al.; 2010; GUIMARÃES et al., 2013; SCHAEFER et al. 2017). De forma geral, atributos de classes de solos em ambas as condições podem geral comportamento igualmente particular na sorção de P, como já evidenciado nos trabalhos na Amazônia Central por Tucci (1991), Lima (2001) e Falcão e Silva (2004).

Em ambientes de “terra firme”, onde predominam Latossolos, os solos normalmente apresentam altos teores de argila, minerais 1:1 (caulinita) na fração argila, elevada acidez, baixa fertilidade e presença de óxidos e hidróxidos de Fe e Al. Em ambientes de “varzea”, onde os Gleissolos apresentam maior relevância, os solos são mais siltosos, frequentemente minerais 2:1 estão presentes, a fertilidade é normalmente mais elevada e há perda ou dissolução de parte dos minerais de Fe presentes (LIMA et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2010; CAMPOS et al., 2016; SCHAEFER et al., 2017).

Devido essas condições, frequentes em solos tropicais (SANCHEZ et al., 1982), a adsorção e a disponibilidade do P são diretamente afetadas. Segundo estudos de Singh et al. (1983), os solos da Amazônia adsorvem 85% do P aplicado, no entanto segundo Alcarde et al. (1991), essas perdas podem alcançar 95%. Em relação a disponibilidade, devido as condições do material de origem, acredita-se que 90% dos solos da Amazônia Central sejam deficiente em P, como teores menos que  $2 \text{ mg dm}^{-3}$ , salvo os solos hidromórficos sobre influencia andina (LIMA et al., 2006) e aqueles antropicamente modificados (FALCÃO et al., 2003; MARQUES, 2016).

Segundo Novais et al. (2007), o processo de sorção de P envolve processos distintos e complementares: Adsorção e Precipitação. O primeiro ocorre de forma mais rápida e pode ser caracterizado pela retenção das moléculas de P na superfície dos óxidos de Fe e Al, das argilas silicatadas e da matéria orgânica. O segundo ocorre de forma mais lenta e representa a formação de compostos estáveis (precipitados) de P com o Fe (P-Fe), Al (P-A) e Mn (P-Mn) (SINGH et al., 1983; HAVLIN et al., 2005).

Em solos da Amazônia, são múltiplos os fatores que controlam cada processo de sorção ou “perdas” de P para o solo. De forma geral, o pH, as quantidades e qualidade dos minerais de argila, o

PCZ, o conteúdo de Al, Fe e Mn livres, conteúdo de matéria orgânica e a natureza eletroquímica dos óxidos de Fe e Al parecem ter relação direta com a adsorção de P no solo (SINGH et al., 1983, TUCCI, 1991, LIMA, 2001; FALCÃO e SILVA, 2004; NOVAIS et al., 2007; BARBOSA, 2017; MATOS et al., 2017; DAMACENO et al., 2019).

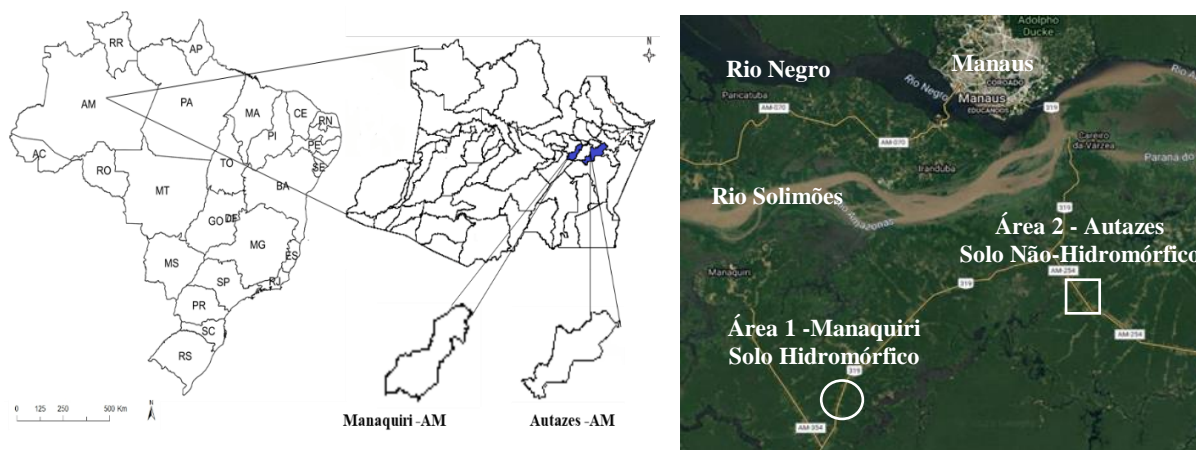
Além dos fatores intrínsecos dos solos, condições específicas podem aumentar a adsorção de P. Segundo Ponnamperna (1972) e Fernandez et al. (2008), condições de inundação, muito comuns em boa parte do ano na Amazônia Central podem promover o aumento da disponibilidade de P com a consequente redução da adsorção. Segundo esses autores, os precipitados de Fe e Al com são hidrolisados, os P ligado as argilas silicatadas são mais facilmente liberados e a redução dos óxidos de Fe facilita a liberação do P ocluso. No entanto, segundo demonstrado nos estudos de Falcão e Silva et al. (2004) em solos Amazônicos, a condição de inundação a depender do tempo e da intensidade podem promover efeito contrário, elevando a retenção de P, como demonstrando em Plintossolo por ambos os autores.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é analisar a adsorção e a disponibilidade de fósforo e a sua correlação com os principais atributos físicos, químicos, mineralógicos e morfológicos nas camadas superficiais (< 20 cm) e superficiais (>20 cm) de um Gleissolo Háptico e um Latossolo Amarelo na Amazônia Central.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Descrição das Áreas de Estudo

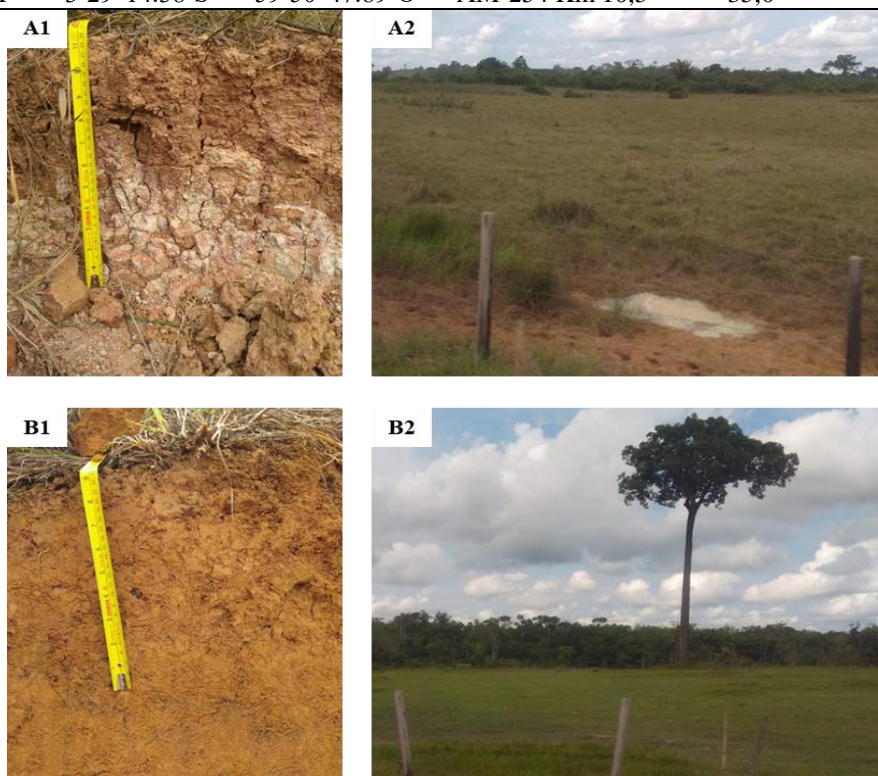
Foram selecionadas duas áreas no limite da Formação Sedimentar do Solimões com a Formação Alter do Chão na porção Noroeste do Estado do Amazonas-Brasil. A primeira área configura-se como inundável em boa parte do ano típica de várzea, dada o perfil do lençol freático mais elevado nos meses mais chuvosos e a segunda área configura-se como mais elevada típica de áreas de terra firme do estado do Amazonas. As informações geodésicas, climatológicas e locais são descritas na Figura 1, Tabela 1 e Figura 2.



**Figura 1.** Localização das Áreas de Estudo e Coleta de Solo (Autor, 2020).

**Tabela 1.** Caracterização Geodésica e Climatológica das Áreas de Estudo (CPRM, 2010)

Município	Coordenadas		Localização	Altitude (m)	Precipitação (mm)
	Latitude	Longitude			
Manaquiri – AM	3°45'03.78"S	60°17'36.01'O	BR-319 Km 101	22,0	2218
Autazes – AM	3°29'14.38"S	59°50'47.89'O	AM-254 Km 10,5	35,0	2230



**Figura 2.** Gleissolo Háplico Ta distrófico (A1); área associada ao Gleissolo (A2), Latossolo Amarelo distrófico típico (B1) e área associada ao Latossolo (B2).



## 2.2. Procedimentos Específicos

### 2.2.1. Seleção dos Perfis e Coletas de Solo

Foram selecionados dois perfis de solos com características que atendessem os seguintes critérios: serem modais, ou seja, solos mais representativos de cada classe e de ambientes distintos, um mal drenado (Gleissolo Háptico) e outro com boa drenagem (Latossolo Amarelo). Por se tratar de um estudo de caso, as informações não refletem com exatidão as características de outros perfis de solos semelhantes, mas é possível depreender que sob tais condições sejam similares. Os solos foram classificados segundo a metodologia do Manual de Coleta e Descrição de Solo em Campo (SANTOS et al., 2015), Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SANTOS et al., 2018) e mapas de solos da região (DNPM, 1978).

Para o estudo de adsorção, disponibilidade e caracterização dos solos foram selecionadas cinco (05) profundidades de coleta: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm, de modo a identificar possíveis alterações físicas, químicas e mineralógicas ligadas a retenção de fósforo no solo. Para tal, a camada arável (0-20 cm) foi estratificada em três níveis: 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm e a subsuperfície (20-60) em dois níveis de identificação: 20-40 cm e 40-60 cm. Sob cada perfil e em cada profundidade estudada, foram coletadas 10 subamostras com aproximadamente 100 g de solo em multipontos para cada profundidade, de modo a perfazer uma amostra composta (1 kg). Para garantir a idoneidade das amostras, a coleta ocorreu sobre perfil reconhecidamente não alterado antropicamente. Posteriormente a coleta, as amostras foram devidamente identificadas e armazenadas em saco transparente limpo. Em local apropriado, foram destorroadas, homogeneizadas, submetidas a secagem a sombra em temperatura ambiente até que toda a umidade fosse retirada. Após, foram passadas peneira de inox com malha de 2,00 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

### 2.2.2. Caracterização Física, Química e Mineralógica

A caracterização morfológica dos solos foi realizada de acordo com os critérios do Manual de Coleta e Descrição de Solo em Campo (SANTOS et al., 2015), e foram avaliados seguintes aspectos: cor, estrutura e as consistências seca, úmida e molhada, sendo esta última subdividida em plasticidade e pegajosidade. A caracterização física foi realizada segundo a metodologia da Embrapa (2017), sendo avaliados: matéria orgânica e granulometria, identificando as proporções de areia total, silte, argila e classe textural (Tabela 2).

A caracterização química foi realizada segundo a metodologia da Embrapa (2017), sendo avaliadas as seguintes características: pH em água, pH em KCl, Acidez potencial (H+Al), alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ), teores de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , K, fósforo disponível, delta pH ( $\Delta pH$ ) ( $\Delta pH = pH H_2O - pH KCl$ ), ponto de carga zero (PCZ) ( $PCZ = 2pH KCl - pH H_2O$ ), soma de bases ( $SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K$ ), capacidade de troca de cátions efetiva (t) ( $t = SB + Al^{3+}$ ) e capacidade de troca de cátions potencial (T) ( $T = SB + (H+Al)$ ), saturação por bases ( $v = (SB/T) * 100$ ), saturação por alumínio ( $m (\%) = (Al/t) * 100$ ) e atividade da argila ( $Ta = T \times 1000 / g \text{ kg}^{-1} \text{ de argila}$ ) (Tabela 2).

A caracterização mineralógica foi realizada segundo a metodologia da Embrapa (2017) e outras metodologias específicas (MEHRA; JACKSON, 1960; SCHWERTMANN, 1964). Foram analisados os seguintes atributos: Difractometria de Raios-X (DRX) (20mA, 30 kv), ferro e alumínio ditionito (cristalinos) e ferro e alumínio oxalato (baixa cristalinidade), relação alumínio oxalato e Ditionito ( $A_o/A_d$ ) e ferro oxalato e ditionito ( $Fe_o/Fe_d$ ), teores de goethita (Gt) e de hematita (Hm) e a Substituição Isomórfica ( $Al_{oFe}/27$ ) / [( $Al_{oFe}/27$ ) + ( $Fe_o/56$ )], em que  $Al_{oFe} = Al_d - Al_o$  e  $Fe_c = Fe_d - Fe_o$  (Tabela 2).

**Tabela 2.** Atributos físicos, químicos e mineralógicos em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) de um Latossolo Amarelo (LAd) e um Gleissolo Háptico (GXv) da Amazônia Central, Brasil.

Atributos do Solo	Latosolo Amarelo Distrófico (LAd)					Gleissolo Háptico Ta (GXv)				
	0-5	5-10	10-20	20-40	40-60	0-5	5-10	10-20	20-40	40-60
<b>Profundidade do solo (cm)</b>										
<b>Atributos físicos do solo</b>										
Areia ( $g\ kg^{-1}$ )	90,0	80,2	90,0	80,0	80,4	80,60	90,30	70,70	50,20	50,80
Silte ( $g\ kg^{-1}$ )	230,8	210,4	140,8	180,2	150,6	480,8	440,7	400,9	410,4	460,0
Argila ( $g\ kg^{-1}$ )	670,2	700,4	760,2	730,8	760,0	420,6	460,0	510,4	530,4	480,2
Classe Textural	Muito Argilosa					Argila Siltosa				
<b>Atributos químicos do solo</b>										
P- Disp ( $mg\ dm^{-3}$ )	1,19	1,08	1,16	0,93	0,78	1,19	0,93	0,87	0,93	0,81
pH ( $H_2O$ )	5,3	5,4	5,4	5,5	5,5	5,1	5,2	5,2	5,2	5,1
pH (KCl)	4,2	4,3	4,3	4,3	4,4	4,0	4,0	4,0	3,9	4,0
$\Delta pH$	-1,1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,1	-1,1	-1,2	-1,2	-1,3	-1,1
PCZ	3,1	3,2	3,2	3,1	3,3	2,9	2,8	2,8	2,6	2,9
M.O.S ( $g\ kg^{-1}$ )	22,0	21,0	10,0	5,0	6,0	14,0	11,0	8,0	6,0	4,0
Al ( $cmol_c\ dm^{-3}$ )	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	5,1	6,9	9,2	10,9	11,2
H+Al ( $cmol_c\ dm^{-3}$ )	5,8	6,4	5,8	5,2	4,7	18,5	22,8	34,7	31,3	32,3
Ca ( $cmol_c\ dm^{-3}$ )	1,1	1,0	0,4	0,5	0,4	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0
Mg ( $cmol_c\ dm^{-3}$ )	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1	1,0	0,8	0,7	0,8	0,5
K ( $cmol_c\ dm^{-3}$ )	0,08	0,04	0,03	0,02	0,03	0,07	0,05	0,05	0,06	0,06
SB ( $cmol_c\ dm^{-3}$ )	1,78	1,44	0,63	0,72	0,53	2,57	2,25	2,05	2,06	1,56
CTC t ( $cmol_c,\ dm^{-3}$ )	3,0	2,8	2,0	2,1	1,9	7,7	9,2	11,3	13,0	12,8
CTC T ( $cmol_c,\ dm^{-3}$ )	7,6	7,9	6,4	5,9	5,2	21,0	25,1	36,8	33,3	32,8
Ta ( $cmol_c,\ dm^{-3}$ )	11,3	11,2	8,5	8,1	6,9	50,1	54,6	72,7	62,9	68,4
v (%)	24,0	18,6	10,3	12,5	10,8	12,4	9,3	5,8	6,3	4,9
m (%)	39,6	48,7	67,6	65,1	71,0	66,6	74,5	81,0	83,7	87,3
<b>Atributos mineralógicos do solo</b>										
Al oxalato ( $g,\ kg^{-1}$ )	1,02	0,78	0,59	0,58	0,58	2,13	2,00	1,58	0,80	0,62
Al ditionito ( $g,\ kg^{-1}$ )	3,9	3,0	4,2	4,2	4,2	5,4	4,1	4,4	2,9	1,8
Fe oxalato ( $g,\ kg^{-1}$ )	2,21	0,84	0,44	0,19	0,14	9,03	8,25	4,25	2,99	0,42
Fe ditionito ( $g,\ kg^{-1}$ )	11,9	12,9	14,0	12,5	16,9	22,9	22,6	16,5	11,6	05,8
$Al_{Oxalato} / Al_{Ditionito}$	0,25	0,25	0,13	0,13	0,13	0,39	0,48	0,35	0,27	0,34
$Fe_{Oxalato} / Fe_{Ditionito}$	0,18	0,06	0,03	0,01	0,01	0,39	0,36	0,25	0,25	0,07
Goethita ( $g,\ kg^{-1}$ )	18,8	20,5	22,0	19,9	26,8	21,4	35,7	25,9	17,9	09,1
Hematita ( $g,\ kg^{-1}$ )	09,8	10,7	11,4	10,4	14,0	18,0	18,8	13,4	09,0	04,7
Sub Fe/Al ( $mol\ mol^{-1}$ )	0,39	0,28	0,36	0,38	0,31	0,33	0,24	0,32	0,34	0,31
Minerais fração argila - DRX	caulinita, goethita, hematita e quartzo					caulinita, goethita, hematita, quartzo, ilita e minerais 2:1				

### 2.2.3. Análises da Adsorção e Disponibilidade de Fósforo

A adsorção e disponibilidade de fósforo (P) foi estimada considerando os teores de P disponível, sendo aquele ainda assimilável pelas plantas e o P Remanescente, representando o potencial de sorção do solo (Isoterma de Ponto Único). O Fósforo Remanescente (P-Rem) – Foi determinado através da adição de 50 ml de solução de equilíbrio de  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{CaCl}_2$ , contendo  $60 \text{ mg L}^{-1}$  de P ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) para 5,0 g de TFSA. Posteriormente, as amostras foram agitadas por 30 minutos a 150 rpm, deixando-as em repouso no pernoite, por cerca de 16 horas. A determinação foi realizada na solução foi determinado pelo método colorimétrico (ALVAREZ et al., 2000). As avaliações específicas de sorção de P nos solos estudados foram obtidas através das análises de Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (P) (CMAP), Energia de Adsorção (EA) e Fator Capacidade de P Máximo (FCP<sub>máx.</sub>). Para determinação da CMAP, foram utilizados 2,5 g de TFSA, agitados por 24 horas com 25 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$  0,01M, contendo respectivamente: 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 e  $140 \text{ mg L}^{-1}$  de P na forma de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (Fosfato de Potássio Monobásico). Após a agitação, a suspensão foi centrifugada a 3000 rpm e filtrada.

Posteriormente, alíquotas do sobrenadante foram usadas na determinação de fósforo usando o ácido ascórbico como redutor (BRAGA e DEFELIPO, 1974). O P adsorvido foi calculado pela diferença entre as quantidades adicionadas e as encontradas na solução de equilíbrio após agitação. Foram, portanto, construídas isotermas de adsorção de Langmuir, plotando-se as quantidades adsorvidas na ordenada e a concentração em equilíbrio na abcissa. A forma de Langmuir é dada pela equação:  $x/m = (a \cdot b \cdot C)/(1 + a \cdot C)$ , em que  $x/m$  representa a quantidade adsorvida,  $b$  a CMAP do solo ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $C$  a concentração de P no sobrenadante ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e  $a$  é a constante de adsorção do P no solo ( $\text{mg L}^{-1}$ ) (OLSEN e WATANABE, 1957). Para estimar as constantes  $a$  e  $b$ , a equação de Langmuir foi transformada em forma linear, correspondente a:  $C/(x/m) = 1/(a \cdot b) + (1/b) \cdot C$ . A CMAP ( $b$ ) foi determinada pelo valor inverso da declividade da reta; A EA ( $a$ ) foi determinada entre a declividade da reta e a interseção da mesma com o eixo das ordenadas e o FCP<sub>máx.</sub> pelo produto entra a CMAP e a EA, de acordo com Bahia Filho et al. (1983) e Novais e Smyth (1999).

### 2.3. Análise Estatística

Para análise estatística, considerou-se o delineamento fatorial  $2 \times 5$ , sendo duas classes de solos e em cinco profundidades distintas (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm). As amostras foram submetidas a análise de variância e aquelas com resposta significativa para o teste F, foram realizados o teste de comparação de médias ao nível de 5% (Tukey). Adicionalmente, foram realizados testes de regressão Linear e de Correlação Linear de Pearson entre todos os atributos do solo e os principais dados que descrevem a adsorção e disponibilidade de P no solo. Para isso foram utilizados os programas estatísticos SPSS 2.0 e o STATISTA 10.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Adsorção e Disponibilidade de Fósforo

##### 3.1.1. Parâmetros de Adsorção de Disponibilidade

Na superfície de ambos os solos (< 20 cm), não houve diferença significativa nos valores de fósforo remanescente (P-Rem), ao passo que na subsuperfície (> 20 cm), o Gleissolo Háplico (GXv) apresentou maiores valores de P-Rem. Segundo Novais et al. (2007), quanto maiores os valores de P-Rem, menor é a adsorção de fósforo (P) no solo, o que indica que as condições reduzidas do GXv diminuem a adsorção de P em subsuperfície. É possível observar que os maiores valores de P-Rem se encontram na camada superior da superfície (0-5 cm) no Latossolo Amarelo (LAd), de maneira inversa, no GXv, esse comportamento é observado na profundidade de 40-60 cm (Tabela 3).

**Tabela 3.** Atributos de Adsorção e Disponibilidade de P em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) de um Latossolo Amarelo (LAd) e um Gleissolo Háplico (GXv) da Amazônia Central, Brasil.

Prof.	P-Rem (mg L <sup>-1</sup> ) <sup>(4)</sup>		P-Disp (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(5)</sup>	
	LAd <sup>(2)</sup>	GXv <sup>(3)</sup>	LAd	GXv
0-5	15,15 Aa	16,85 Ab	1,19 Aa	1,19 Aa
5-10	13,63 Aab	14,64 Ac	1,08 Aa	0,93 Aa
10-20	12,70 Ab	14,09 Ac	1,16 Aa	0,87 Aa
20-40	11,22 Bb	16,79 Ab	0,93 Aa	0,93 Aa
40-60	11,52 Bb	20,72 Aa	0,78 Aa	0,81 Aa
P	< 0,01		> 0,05	
D.M.S <sup>(6)</sup>	2,12		0,72	

As médias seguidas por letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1% (<0,01) e a 5% (<0,05). <sup>(1)</sup>Profundidade; <sup>(2)</sup>LAd: Latossolo Amarelo distrófico; <sup>(3)</sup>GXv: Gleissolo Háplico Ta; <sup>(4)</sup>P-Rem: Fósforo Remanescente; <sup>(5)</sup>P-Disp: Fósforo Disponível extraído por Mehlich-1; <sup>(6)</sup>D.M.S.: Diferença Mínima Significativa

Analisando Latossolos da Amazônia Central, Barbosa (2017), obteve valores de P-rem entre 5,79 e 22,22 mg L<sup>-1</sup>, logo os valores encontrados neste trabalho, encontram-se dentro do que já foi relatado. Segundo a classificação de sorção de P para solos da Amazônia indicados por Wadt e Silva (2011), a faixa encontrada em ambos os solos (GXv e LAd) classificam-se entre médio a alto poder de adsorção de P, entre 9 e 36 mg L<sup>-1</sup>.

Em solos toposequenciais da Amazônia Central, Lima (2001) identificou padrões similares aos aqui encontrados. Em um Latossolo Amarelo, este autor encontrou em superfície teores de 31,84 mg L<sup>-1</sup>, porém com redução para 14,05 mg L<sup>-1</sup> em subsuperfície. Efeito contrário foi visto em um Gleissolo Háplico, com valores de 18,60 mg L<sup>-1</sup> e 38,56 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente em superfície e subsuperfície. De forma geral, ao maiores teores observados na subsuperfície (>20 cm) no GXv podem ter forte relação com os processos de redução do minerais de Ferro, que são fortes adsorventes de P no solo, implicando inferir que solos que passam por algum processo de hidromorfização natural são menos propensos a retenção de P no solo (GUIMARÃES et al., 2013; SCHAEFER et al., 2017).

Não houve diferenças significativas nos teores de fósforo disponível (P-Disp) entre os solos ou entre as profundidades avaliadas (Tabela 3). Os baixos valores de P-Disp (0,78 a 1,19 mg dm<sup>-3</sup>) já era esperado, tendo em vista que a maior porção dos solos da Amazônia Central possuem teores de P

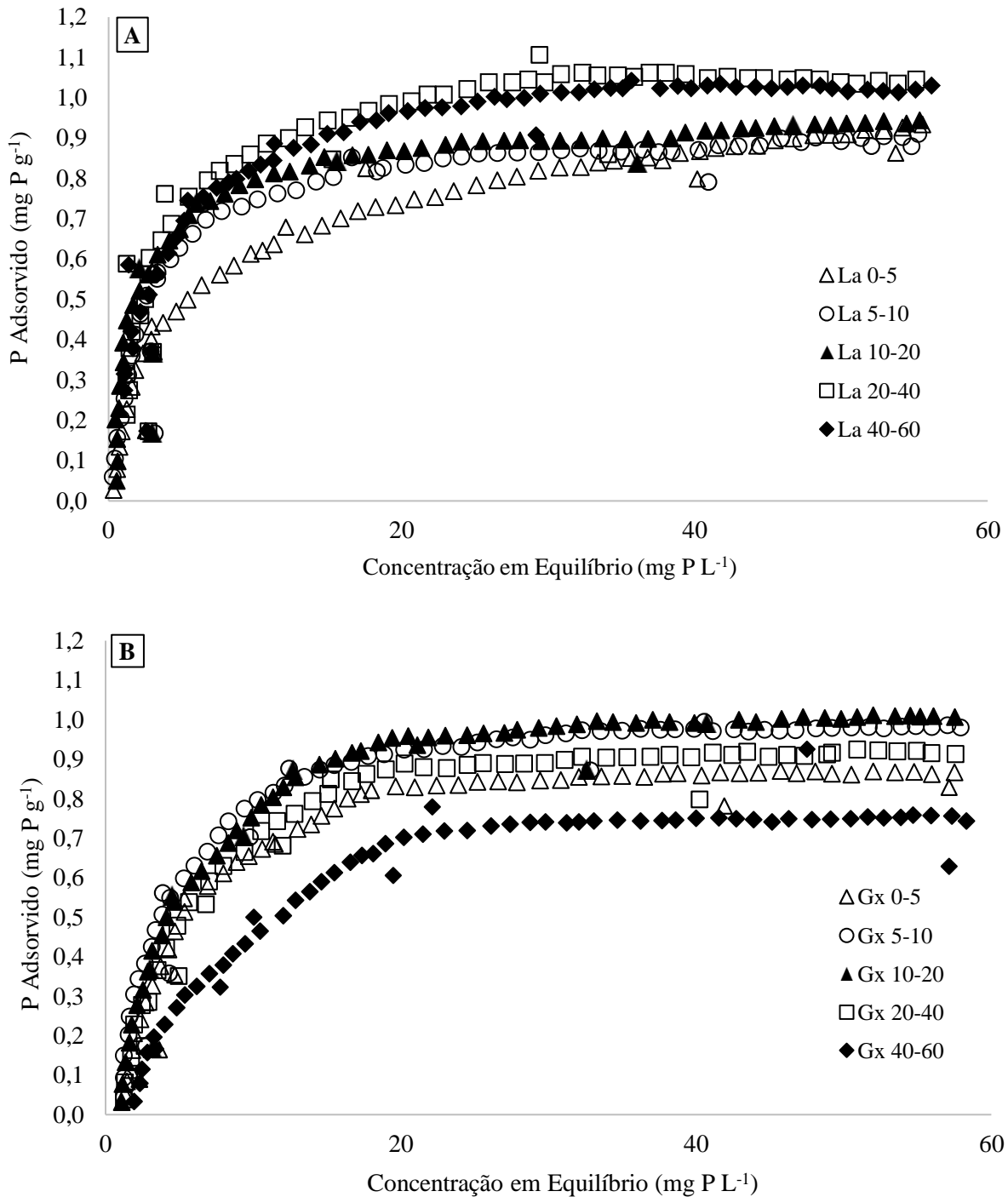
inferiores a  $2 \text{ mg dm}^{-3}$  devido principalmente a natureza sedimentar e pobre dos materiais de origem presentes (SANCHEZ et al., 1982). Tucci (1991), em solos da Amazônia Central também encontrou baixos valores de P extraído por Mehlich-1 para Latossolos ( $1,6$  e  $2,1 \text{ mg dm}^{-3}$ ), entretanto identificou teores mais elevados em um Gleissolo Pouco Húmico ( $6,4 \text{ mg dm}^{-3}$ ). De forma geral, os baixos valores de P disponível também foram verificados por Barbosa (2017) e Oliveira et al. (2019) em solos da Amazônia central.

Os baixos teores de P disponível encontrados do Gleissolo Háplico contradizem os altos teores encontrados por Lima (2001) ( $33,0$  a  $69,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e Guimarães et al. (2013) ( $47,0$  a  $79,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ). É possível que o local de localização do perfil de Gleissolo estudado neste trabalho difira dos estudados por estes autores, os quais estão de maneira próxima de rios barrentos da região, que sob influência dos andes carregam quantidades elevadas de sedimentos ricos em P, fertilizando estes solos (RODRIGUES, 1996; SCHAEFER et al., 2017). Analisando as principais formas de fósforo em solos na Amazônia, Nunes (2014) identificou que em Latossolos Amarelos, o P está preferencialmente ligado ao Alumínio (Al) e predominantemente ligado ao Ferro (Fe) nos Gleissolos Háplicos. De forma similar, Tucci (1991), ao analisar solos da Amazônia Central, identificou preferência de ligação do P com o Fe (P-Fe) em detrimento de outras ligações como P-Al e P-Ca.

### **3.1.2. Isotermas de Adsorção de P**

As isotermas de Langmuir de ambos os solos estudados (Latossolo e Gleissolo) e em ambas as profundidades indicaram que os teores de fósforo (P) adsorvido aumentam proporcionalmente ao aumento da concentração de P em equilíbrio (Figura 3A e 3B). Tanto no Latossolo (LAd) quanto no Gleissolo (GXv), há padrões semelhantes de adsorção, em que na fase inicial, a adsorção ocorre de forma mais intensa por atração eletrostática e posteriormente por meio de troca de ligantes nos óxi-hidróxidos de Fe (BARROW, 1985; SANYAL e DE DATTA, 1991). O comportamento no LAd é uma fase inicial mais intensa à medida que se aprofunda no perfil do solo, porém com estabilização em concentrações superiores (Figura 3A e 3B).

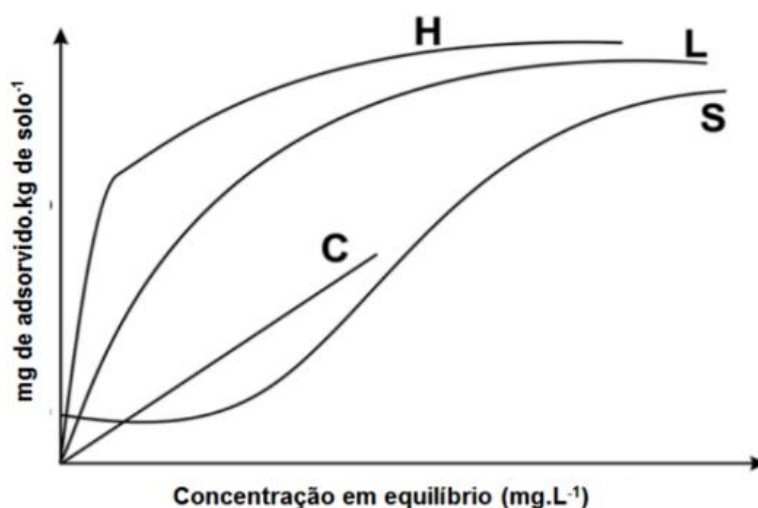
Em contrapartida, no GXv, a fase inicial de adsorção diminui com a profundidade do solo, indicando condições mais favoráveis a manutenção do P, no entanto apresenta o mesmo comportamento do LAd em concentrações maiores. Segundo a classificação de Giles et al. (1960), as isotermas podem ser classificadas em quatro categorias vistas na figura 4.



**Figura 3.** Isothermas de adsorção de fósforo de Langmuir em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) de um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (A) e um Gleissolo Háplico Ta (GXv) (B) na Amazônia Central, Brasil.

Observando as classes propostas por Giles et al. (1960), é possível observar que, independente da profundidade, o padrão de adsorção no Latossolo neste trabalho é comparável ao tipo H, em que há alta afinidade entre o adsorvente (solo) e o soluto (fósforo). Para o Gleissolo, o padrão indica adsorção próximas ao tipo L, em que existe uma afinidade do adsorvente com o soluto em baixas concentrações e diminuição da superfície livre do solo (SPARKS, 2001). Em solos da Amazônia Central, padrões de adsorção similares foram observados por Falcão e Silva (2004), Chaves et al. (2007) e Marques (2016). Assim como sugerido por Chaves et al. (2009) para solos da Paraíba, as diferenças observadas no padrão

das isotermas, por menos expressivas que possam ser apresentadas indicam que há variações substanciais, seja entre solos ou profundidades, o que indica que existem mudanças em profundidades pequenas (5 cm) ou em distancias maiores (10 ou 20 cm) entre uma camada e outra dos solos.



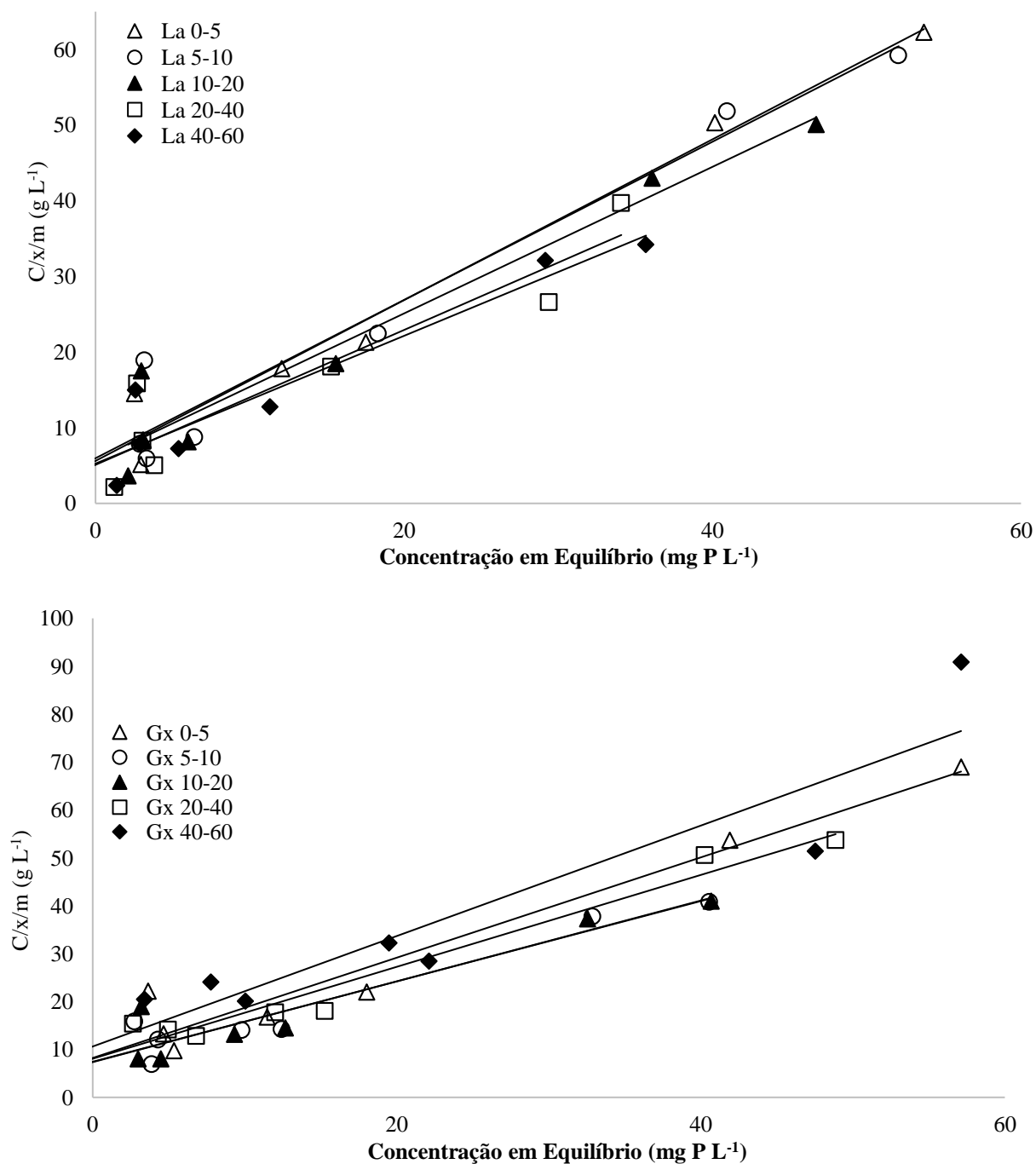
**Figura 4.** Modelos clássicos de isotermas de adsorção (Giles et al., 1960).

Na tabela 4 e figura 5 é possível observar a equação linearizada de Langmuir da adsorção de P. Todas as equações descrevem igualmente o aumento da sorção de P com o aumento da concentração em equilíbrio de P. As equações presentes foram altamente significativas, assim como as observadas por Falcão e Silva (2004) e Chaves et al. (2007).

**Tabela 4.** Equações linearizadas da isoterma de Langmuir e coeficientes de determinação em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (A) e um Gleissolo Háplico Ta (GXv) (B) na Amazônia Central, Brasil.

<b>Latossolo Amarelo Distrófico Típico (LAd)</b>		
<b>Prof. (cm)</b>	<b>Equação de regressão</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
0-5	Y= 5,6172+1,0627C	0,97**
5-10	Y= 5,9692+1,0461C	0,95**
10-20	Y= 5,7210+0,9692C	0,93**
20-40	Y=5,0960+0,8912C	0,87*
40-60	Y=5,2571+0,8445C	0,90*
<b>Gleissolo Háplico Ta Distrófico (GXv)</b>		
<b>Prof. (cm)</b>	<b>Equação de regressão</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
0-5	Y= 8,2288+1,0467C	0,94**
5-10	Y= 7,3585+0,8433C	0,92**
10-20	Y= 7,4384+0,8385C	0,89*
20-40	Y= 8,0717+0,9591C	0,96**
40-60	Y=10,625+1,1528C	0,87*

Y = C/x/m, em (mg L<sup>-1</sup>)/(mg g<sup>-1</sup>) = g L<sup>-1</sup>; X = C (concentração de equilíbrio), em mg L<sup>-1</sup> de P em solução. \*Significativo a 5% e \*\*Significativo a 1%



**Figura 5.** Isotermas de adsorção de fósforo de Langmuir linearizada em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (A) e um Gleissolo Háplico Ta (GXv) (B) na Amazônia Central, Brasil.

### 3.1.3. Capacidade Máxima e Energia de Adsorção de P

Observado os dados de Capacidade Máxima de Adsorção de P (CMAP), os resultados diferem entre as camadas do solo e as classes de solos. De forma geral, a CMAP aumento com a profundidade do solo no Latossolo (LAd), enquanto que no Gleissolo (GXv), ocorre aumento na superfície (0 a 20 cm) e diminuição correspondente na subsuperfície (>20 cm). Entre os solos, a CMAP não diferiu nas



profundidades 0-5 cm e 20-40 cm, entretanto no GXv, a CMAP é mais elevada nas camadas de 5-10 e 10-20 cm e no LAD é mais elevada na profundidade de 40-60 cm (Tabela 5).

**Tabela 5.** Capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), energia de adsorção e fator capacidade de P máximo (FCPmáx.) em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (A) e um Gleissolo Háptico Ta (GXv) (B) na Amazônia Central, Brasil.

Prof. (cm)	CMAP (mg g <sup>-1</sup> ) <sup>(9)</sup>		Energia de Adsorção (mg L <sup>-1</sup> ) <sup>(10)</sup>		FCP máx. (ml g <sup>-1</sup> ) <sup>(11)</sup>	
	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv
0-5	0,941 Ab	0,955 Abc	0,189 Aa	0,127 Ba	178,0 Aab	121,5 Ba
5-10	0,956 Bb	1,186 Aa	0,175 Aab	0,114 Ba	167,5 Ab	135,8 Ba
10-20	1,032 Bb	1,193 Aa	0,169 Aab	0,112 Ba	174,7 Aab	134,4 Ba
20-40	1,122 Aab	1,043 Ab	0,174 Aab	0,118 Ba	196,2 Aa	123,8 Ba
40-60	1,184 Aa	0,867 Bc	0,160 Ab	0,108 Ba	190,2 Aa	094,1 Bb
p	<0,05		< 0,05		< 0,01	
D.M.S	0,12		0,018		18,43	

As médias seguidas por letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1% (<0,01) e a 5% (<0,05). <sup>(1)</sup>Profundidade; <sup>(2)</sup>LAd: Latossolo Amarelo distrófico; <sup>(3)</sup>GXv: Gleissolo Háptico Ta; <sup>(8)</sup>D.M.S.: Diferença Mínima Significativa; <sup>(9)</sup>CMAP: Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo; <sup>(10)</sup>Energia de Adsorção de Fósforo; <sup>(11)</sup>FCP máx.: Fator de Capacidade de Fósforo máximo.

Os resultados gerais de CMAP variando de 0,867 a 1,193 mg g<sup>-1</sup> encontrados em ambos os solos estão de acordo com os resultados Tucci (1991), ao qual ao estudar a disponibilidade de P em solos na Amazônia Central, identificou CMAP inferiores a 1,00 mg. g<sup>-1</sup>, que segundo Curi et al. (1998) é uma CMAP baixa e é presente na maioria dos solos. Em solos do Acre, Marques (2016) verificou valores médios acima de 2,00 mg g<sup>-1</sup>. Em geral, os resultados obtidos de CMAP são superiores aos encontrados por Falcão e Silva (2004), que encontraram valores entre 297 e 888 mg g<sup>-1</sup>. Analisando o comportamento da CMAP em profundidade Lima (2001) verificou menores valores em superfície (0,500 mg g<sup>-1</sup>) do que em subsuperfície de um Latossolo (0,800 mg.g<sup>-1</sup>). Para um Gleissolo, este mesmo autor observou comportamento inverso, sendo maior em superfície (1,140 mg g<sup>-1</sup>) e menores em subsuperfície (0,390 mg g<sup>-1</sup>), corroborando com os dados obtidos neste trabalho.

Segundo Lima (2001), Falcão e Silva (2004), Novais et al. (2007) e Marques (2016), o aumento da CMAP nos Latossolos podem decorrer da diminuição da matéria orgânica, a qual compete por sítios de adsorção de P e ao mesmo tempo pelo aumento dos teores de argila, responsável pela adsorção das moléculas ortofosfáticas. No Gleissolo, Lima (2001), atribui a diminuição da capacidade de sorção de P em profundidade a diminuição da atuação de óxidos de ferro de menor cristalinidade. Solos de outras regiões do Brasil, como o Cerrado, o Semiárido e a Região dos Pampas normalmente apresentam valores de CMAP que ultrapassam 2,500 mg. g<sup>-1</sup> ou acima de 2.500 mg kg<sup>-1</sup>, consideravelmente superiores aos encontrados na Amazônia (VALLADARES et al., 2003; CORRÊA et al., 2011; PICCOLLA et al., 2013). No Latossolo, a CMAP obedeceu a seguinte ordem: 40-60 cm ≥ 20-40 cm = 10-20 cm = 5-10 cm = 0-5 cm. No Gleissolo, a CMAP obedeceu a seguinte ordem: 5-10 cm = 10-20 cm > 20-40 cm ≥ 0-5 cm ≥ 40-60 cm.

Ao comparar o Latossolos com o Gleissolo, verifica-se maior Energia de Adsorção de P (EA) em todas as profundidades. Especificamente no Gleissolo, não houve distinção entre a EA, o que implica inferir que a energia independe da profundidade. No Latossolo, a EA diminui com a profundidade do

perfil do solo. A EA encontrada nos solos estudados entre 0,108 e 0,189 mg L<sup>-1</sup> são inferiores aos observados por Falcão e Silva (2004), entre 0,230 e 0,730 mg L<sup>-1</sup> e os verificados por Tucci (1991), acima de 0,200 mg L<sup>-1</sup> em solos da Amazônia Central. De acordo com Novais e Smyth (1999), a energia de adsorção varia com a quantidade e a porção em que o P se encontra no solo, por esse motivo, a energia pode variar entre solos da mesma classe.

Segundo Barrow (2008) e Maluf et al. (2018), os tipos de sítios de ligação do P com o solo e a quantidade de pontos do adsorvente determinam igualmente a variabilidade da energia de ligação de P. Em solos do Nordeste brasileiro, Chaves et al. (2009) verificaram EAP ente 0,02 e 0,116 mg L<sup>-1</sup>, porém com teores significativamente mais elevados de p disponível, podendo influenciar neste parâmetro. Em Roraima, Matos et al. (2017), observaram energia de adsorção de P similares as encontradas neste trabalho e discutem que a repulsam exercida pelas cargas negativas da argila são fatores determinantes nesse atributo. No Latossolo, a EAP obedeceu a seguinte ordem: 0-5 cm ≥ 5-10 cm = 10-20 cm = 20-40 cm > 40-60 cm. No Gleissolo, a EAP obedeceu a seguinte ordem: 0-5 cm = 5-10 cm = 10-20 cm = 20-40 cm = 40-60 cm

De maneira semelhante a EAP, o Fator Capacidade de P (FCPmax) foi significativamente mais elevado em todas as profundidades no Latossolo do que no Gleissolo. Em seus estudos de adsorção de P, Falcão e Silva (2004), observaram FCP entre 111 e 593 mL g<sup>-1</sup>. No Gleissolo, o FCPmáx distinto foi verificado apenas na profundidade de 40-60 cm (0,94 mL g<sup>-1</sup>), enquanto no Latossolo, valores elevados foram encontrados nesta mesma profundidade (190,2 mL g<sup>-1</sup>). Segundo Novais et al. (2007), há uma ordem de preferência no fator capacidade de P da seguinte maneira: FCP de solos argilosos pobres em P > FCP de solos argilosos ricos em P > FCP de solos arenosos pobres em P > FCP de solos arenosos ricos em P. Assim, no Latossolo há uma tendência de aumento no FCP à medida que o P disponível se torna menor e o solos mais argiloso.

### **3.2. Correlação de Atributos com a Adsorção e Disponibilidade de P**

Segundo Rano et al. (2007) e Fernandez et al. (2008), as altas correlações observadas na diminuição dos atributos mineralógicos em profundidade provavelmente devem-se a condições de diminuição do potencial redox do solo, que entre as implicações visível, o solo torna-se branco-acinzentado pela diminuição dos minerais de Fe, o que pode contribuir com a menor adsorção e consequentemente maior disponibilidade de P. Apenas os atributos Al<sup>3+</sup> trocável (r=0.89\*) e o m% (r=0.88\*) correlacionaram-se positivamente com o aumento da profundidade. Em um Gleissolo Háplico da Amazônia, Lima (2001) identificou diminuição em profundidade, no entanto, é possível que a dissolução de minerais 2:1 com a restrição de drenagem promova o aumento do Al<sup>3+</sup> trocável em profundidade.

A CMAP correlacionou-se negativamente com o P-Remanescente no LAd (r=-0.91\*) e no GXv (r=-0.94\*). De acordo com Novais et al. (2007), a correlação é esperada, tendo em vista que quanto

menor o P-Rem, maior a adsorção de P, que acompanha naturalmente a maior CMAP. Em solos do Pernambuco, Corrêa et al. (2011), observaram altas correlações negativas entre esses atributos, assim como Matos et al. (2017), em solos do Norte da Amazônia e Viera (2017) em solos do Semiárido. Houve correlação significativa também da CMAP com o P-disponível ( $r=-0.90$ ), indicando que quanto maior a CMAP menor o conteúdo de P disponível as plantas, comportamento observado também por Corrêa et al. (2011).

Em ambos os solos, houve correlação positiva entre a CMAP e o FCP,  $r= 0.82^*$  e  $r= 0.91^*$ . A alta correlação entre esses atributos pode ser explicada pelo fato de uma mediada ser quantitativa de adsorção (CMAP) e outra qualitativa (FCP), logo se o FCP é a CMAP x Energia de sorção, é natural que o FCP, que descreve a capacidade do P ser transferido dos coloides ou poder tampão de P é mais elevada à medida que a CMAP aumenta (HOLFORD e MATTINGLY, 1976; FALCÃO e SILVA, 2004; NOVAIS et al., 2007; ROGERI et al., 2016). Altas correlações entre CMAP e FCP foram igualmente observados por Viera (2017) ( $r= 0.95^{**}$ ) e por Rogeri et al. (2016) ( $r= 0.88^{**}$ ), respectivamente em solos de Mossoró e do Rio Grande do Sul. Segundo Rogeri et al. (2016), como a CMAP representa o estoque de P no solo, possui estreita relação com a capacidade de transferência do P para solução.

Em relação aos atributos químicos, a CMAP correlacionou-se negativamente com os seguintes atributos do LAd:  $H+Al$  ( $r= -0.91^*$ ),  $Ca^{2+}$  ( $r= -0.84^*$ ),  $K$  ( $r= -0.83^*$ ),  $Mg^{2+}$  ( $r= -0.88^*$ ), CTC-t ( $r= -0.87^*$ ), TA ( $r= -0.95^*$ ) e SB ( $r= -0.86^*$ ). No GXv, a correlação negativa ocorreu apenas com o  $K^+$  ( $r= -0.88^*$ ) (Tabela 6). Em geral, as condições menos férteis do solo, como baixa soma de bases, baixa CTC e baixa atividade da argila (TA) eleva, a capacidade do solo em adsorver P, podendo ter relação com a maior exposição de superfícies carregadas positivamente ou a substituição de ligantes (NOVAIS et al., 2007). Em solos da Amazônia Central, Falcão e Silva (2004) observaram correlação não significativa entre a CMAP e  $H^+ + Al^3$  ( $r= 0,41ns$ ), porém significativamente positivo entre a CMAP e a saturação por Bases ( $r= 0,66^*$ ), contrariando os resultados encontrados neste trabalho.

As correlações positivas do CMAP com o pH em ambos os solos ( $r= 0.90^*$  e  $r= 0.88^*$ ) são controversas e diferem das observadas por outros autores que constataram não significância (FALCÃO e SILVA, 2004; MATOS et al. 2017). De acordo com Sato e Cameford (2005), o aumento do pH do solo faz aumentar a carga líquida negativa na superfície dos minerais, causando repulsão das moléculas de P diminuindo a adsorção. Em solos do Pernambuco, Corrêa et al. (2011) obtiveram correlações positivas entre a CMAP e  $H^+ + Al^3$  ( $r=0.83^*$ ) e CMAP e CTC ( $0.85^*$ ), inversamente opostos aos observados neste trabalho. De acordo com Novais et al. (2007), os atributos de  $H^+ + Al^3$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Al^{3+}$  tem ligação direta com a CMAP e que se comportam de maneira paralela a esta em processos de precipitação do P e em processos de ligação do solo. Fato é que o comportamento oposto entre a CMAP e estes atributos contrariam o que foi observado por outros autores, podendo indicar outas condições microparticulares em solos Amazônicos (BAHIA FILHO, 1983; FALCÃO E SILVA, 2004; CORRÊA et al., 2011; FONTANA et al., 2013; ROGERI et al., 2016; ARRUDA et al., 2017).

**Tabela 6.** Correlação Linear de Pearson ® entre os atributos de físicos, químicos e mineralógicos e os principais atributos de adsorção de P no perfil (0-60 cm) de um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) e um Gleissolo Háptico Ta (GXv) na Amazônia Central, Brasil.

Atributos do Solo	Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (R)					
	Principais atributos de adsorção P					
Atributos de adsorção de P	Latossolo Amarelo distrófico			Gleissolo Háptico Ta		
	CMAP	EA	FCP	CMAP	EA	FCP
Capacidade máxima de adsorção de p (CMAP)	----	----	----	----	----	----
Energia de adsorção (EA)	-0.79ns	----	----	-0.10ns	----	----
Fator capacidade de fósforo (FCP)	0.82*	-0.31ns	----	0.91*	0.29ns	----
Fósforo remanescente (P-Rem)	-0.91*	0.80*	-0.71ns	-0.94**	-0.21ns	-0.98**
Fósforo disponível (P-Disp)	-0.90*	0.73ns	-0.72ns	-0.13ns	0.97*	0.25ns
Atributos químicos do solo	Principais atributos de adsorção P					
	CMAP	EA	FCP	CMAP	EA	FCP
Potencial hidrogeniônico em água (pH H <sub>2</sub> O)	0.90*	-0.80*	0.69ns	0.88*	-0.21ns	0.76ns
Potencial hidrogeniônico em KCl (pH KCl)	0.81*	-0.97*	0.36ns	0.02ns	-0.01ns	-0.06ns
Delta pH ( $\Delta$ pH)	-0.39ns	-0.03ns	-0.71ns	-0.56ns	0.04ns	-0.53ns
Ponto de carga zero (PCZ)	0.47ns	-0.83*	-0.06ns	-0.37ns	0.02ns	-0.39ns
Matéria orgânica do solo (M.O.S)	-0.93*	0.74ns	0.45ns	0.25ns	0.77ns	-0.68ns
Alumínio trocável (Al <sup>3+</sup> )	0.56ns	-0.82*	0.13ns	-0.20ns	-0.70ns	-0.46ns
Acidez potencial (H+Al)	-0.91*	0.55ns	-0.88*	0.13ns	-0.72ns	-0.15ns
Cálcio disponível (Ca <sup>2+</sup> )	-0.84*	0.82*	-0.57ns	0.55ns	0.66ns	0.79ns
Potássio disponível (K <sup>+</sup> )	-0.83*	0.87*	-0.52ns	-0.88*	-0.21ns	0.76ns
Magnésio disponível (Mg <sup>2+</sup> )	-0.88*	0.93*	-0.53ns	0.20ns	0.94*	0.57ns
Troca de cátions efetiva (CTC-t)	-0.87*	0.84*	-0.62ns	-0.17ns	-0.67ns	-0.43ns
Troca de cátions potencial (CTC-T)	-0.79ns	0.89*	-0.44ns	0.16ns	-0.70ns	-0.11ns
Atividade da argila (TA)	-0.95*	0.83*	-0.72ns	0.07ns	-0.77ns	-0.23ns
Soma de bases (SB)	-0.86*	0.88*	-0.56ns	0.38ns	0.84*	0.69ns
Saturação por bases (v%)	-0.79ns	0.89*	-0.44ns	0.01ns	0.84*	0.34ns
Saturação por alumínio (m%)	0.87*	-0.89*	0.53ns	-0.13ns	-0.82*	-0.44ns
Atributos físicos do solo	Principais atributos de adsorção P					
	CMAP	EA	FCP	CMAP	EA	FCP
Areia total (Areia)	-0.52ns	0.47ns	0.30ns	0.53ns	0.35ns	-0.94*
Silte total (Silte)	-0.71ns	0.87*	0.28ns	-0.67ns	0.39ns	-0.09ns
Argila total (Argila)	0.77ns	-0.91*	-0.32ns	0.28ns	-0.51ns	0.51ns
Atributos mineralógicos do solo	Principais atributos de adsorção P					
	CMAP	EA	FCP	CMAP	EA	FCP
Alumínio oxalato (Al <sub>o</sub> )	-0.80*	0.87*	-0.47ns	0.47ns	0.56ns	0.66ns
Alumínio ditionito (Al <sub>d</sub> )	0.64ns	-0.30ns	0.72ns	0.43ns	0.71ns	0.69ns
Ferro oxalato (Fe <sub>o</sub> )	-0.79ns	0.89*	-0.44ns	0.38ns	0.70ns	0.64ns
Ferro ditionito (Fe <sub>d</sub> )	0.73ns	-0.80*	0.27ns	0.52ns	0.62ns	0.75ns
Goethita (Gt)	0.74ns	-0.89*	0.08ns	0.86*	0.15ns	0.89*
Hematita (Hm)	0.74ns	-0.89*	0.09ns	0.56ns	0.57ns	0.76ns
Relação alumínio oxalato : ditionito (Al <sub>o</sub> /Al <sub>d</sub> )	-0.85*	0.74ns	-0.67ns	0.37ns	0.05ns	0.37ns
Relação ferro oxalato : ditionito (Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub> )	-0.79ns	0.90*	-0.43ns	0.48ns	0.76ns	0.76ns
Substituição isomórfica de Fe por Al (S. Fe/Al)	-0.06ns	0.51ns	0.39ns	-0.45ns	0.33ns	-0.30ns

(\*\*) significativo a 1 % (p < 0,01); (\*) significativo a 5% (< 0,05); (ns) não significativo pelo Teste t de probabilidade.

Houve correlação positiva e significativa entre a CMAP e a M.O.S apenas no LAd (r= -0.93\*). O resultado difere dos resultados obtidos por Valladares et al. (2003) (r= 0.65\*), Falcão e Silva (2004) (r= -0,13ns), Chaves et al. (2007) (r= 0.05ns) e Pinto et al. (2013) (r= 0.70\*) e corroboram com Coringa (2007) (r= -0,61) (Tabela 6). Os resultados variados entre os diversos autores sugerem o duplo efeito

que a matéria orgânica exerce nos solos, podendo competir por sítios de adsorção e adsorção de Fe e Al nas cargas positivas dos óxidos ou oferecer superfícies que aumentam os sítios de adsorção (NOVAIS et al., 2007; ROGERI et al., 2016). Segundo Pavan e Miyazawa (1983) e Rano et al. (2007), os elétrons liberados pela M.O.S podem atuar reduzindo a reatividade dos óxidos de Fe, diminuindo sua capacidade de sorver ânions, no entanto, aumentando a sua própria capacidade.

No Latossolos, a forma de baixa cristalinidade de Al (Alo) e a sua relação com a de boa cristalinidade (Alo/Ald) correlacionaram-se negativamente com a CMAP ( $r = -0.80^*$  e  $r = -0.85^*$ ). Em solos do Rio Grande do Sul, Rogeri et al (2016) observaram correlação positiva ( $r = 0.66^*$ ) entre esses atributos. Em diferentes regiões do país, Valladares et al. (2003) observara igualmente correlação positiva ( $r = 0.70^*$ ). No Gleissolo, os teores de CMAP correlacionaram-se positivamente com os teores de Goethita ( $r = 0.86^*$ ). As correlações observadas no LAd são controversas, uma vez que óxidos de Fe e Al mal cristalizados são mais eficientes na adsorção de P (DONAGEMMA et al., 2008; BROGGI et al., 2011).

Além da maior adsorção, a substituição isomórfica de Fe por Al nos oxi-hidróxidos promove desarranjo estrutural, aumentando a superfície específica e adsorção de P (FERNANDEZ et al., 2008; ROGERI et al., 2016). Apesar do menor potencial sortivo, a goethita tem contribuição direta com a CMAP dos solos. De acordo com Broggi et al. (2011) e Fink et al. (2016), o aumento dos teores desses óxidos de baixa cristalinidade eleva a adsorção de P e não causam efeito contrário, a menos que a composição eletroquímica seja distinta entre solos e a composição mineral desses óxidos, abrindo possibilidades de novas pesquisas.

A energia de adsorção (EA) correlacionou-se positivamente com o P-Rem ( $r = 0.80^*$ ) no LAd e com o P-Disp ( $r = 0.97^{**}$ ) no GXv. Correlações positivas foram observadas nos seguintes atributos do LAd:  $Ca^{2+}$  ( $r = 0.80^*$ ),  $K^+$  ( $r = 0.87^*$ ),  $Mg^{2+}$  ( $r = 0.93^*$ ), CTC efetiva ( $r = 0.84^*$ ), CTC potencial ( $r = 0.89^*$ ), atividade da argila ( $r = 0.83^*$ ), SB ( $r = 0.88^*$ ), v% ( $r = 0.89^*$ ), silte ( $r = 0.87^*$ ), Alo ( $r = 0.87^*$ ), Feo ( $r = 0.89^*$ ) e  $Fe_o/Fe_d$  ( $r = 0.90^*$ ). No GXv, as correlações positivas foram observadas com o  $Mg^{2+}$  ( $r = 0.94^*$ ), SB ( $r = 0.84^*$ ) e v% ( $r = 0.84^*$ ) (Tabela 6). Outros autores não observaram as mesmas correlações obtidas neste trabalho. Em solos da Amazônia Central, Falcão e Silva (2004), observaram correlação significativa da EA com a argila ( $r = 0.78^*$ ) e negativa com a SB ( $r = -0.77^*$ ). Em Roraima, Matos et al. (2017) não encontrou correlações significativas entre os atributos dos solos e a energia de adsorção.

Houve correlação negativa entre a EA no Latossolo e os seguintes atributos: pH em  $H_2O$  ( $r = -0.80^*$ ) e em KCl ( $r = -0.97^{**}$ ), PCZ ( $r = -0.83^*$ ),  $Al^{3+}$  ( $r = -0.82^*$ ), Fed ( $r = -0.80^*$ ), Gt ( $r = -0.89^*$ ) e Hm ( $r = -0.89^*$ ) (Tabela 6). Segundo Oliveira et al. (2014), os estádios de adsorção: neutralização das cargas positivas > troca de ligantes e interação eletrostáticas entre a molécula de P e os colides são individuais, ou seja, a EA de uma partícula independe da outra e o aumento da quantidade de argila podem diminuir a competição por esses sítios e a EA em cada um. Em solos da Paraíba, Chaves et al. (2009) não observaram correlações significativas entre a EA e o pH, P-Rem, Argila e  $Al^{3+}$ . Os mesmos autores observaram correlação negativa entre a EA e a v% ( $r = -0.71^*$ ). Em dois solos do semiárido, Chaves et

al. (2007) concluíram que a “energia de adsorção” de P foi maior no solo menos argiloso, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho, em que o aumento dos teores de argila está negativamente correlacionado com a energia de adsorção.

O FCP correlacionou-se no LAd apenas com  $H^+ + Al^{3+}$  ( $r = -0.88^*$ ) e no GXv apenas com os atributos de P-Rem ( $r = -0.98^{**}$ ), areia ( $r = -0.94^{**}$ ) e os teores de Gt ( $r = 0.89^*$ ). Correlações negativas foram igualmente observadas por Bonfim et al. (2004) em solos do Nordeste e por Rogeri et al. (2016) em solos do Sul do Brasil, respectivamente  $r = -0.91^*$  e  $r = -0.65^*$ . Segundo Rogeri et al. (2016), quanto mais elevado o FCP, maior a adsorção de P, logo menor o P-Rem. Correlações não significativas foram obtidas por Falcão e Silva (2004) entre os o FCP e o  $H^+ + Al^{3+}$ , os mesmos autores observaram alta correlação linear entre o FCP e o conteúdo de argila ( $r = 0.96^{**}$ ), correlação negativamente observada para areia no GXv, assim como as obtidas por Pinto et al. (2013) em solos do Cerrado ( $r = -0.90$ ). O aumento dos minerais no solo, como a goethita parecem elevar o FCP do solo, pelo aumento indireto da CMAP (FARIAS et al., 2009).

#### 4. CONCLUSÕES

1. A matéria orgânica influencia o fósforo remanescente (P-rem) nas primeiras camadas no Latossolo Amarelo, enquanto o hidromorfismo presente na subsuperfície do Gleissolo Háptico responde os processos de sorção de P.

2. As isotermas de adsorção de Langmuir e a Capacidade máxima de adsorção de P se comportam de forma similar entre as profundidades e solos, havendo disparidade influenciada pela matéria orgânica no Latossolo Amarelo e hidromorfismo no Gleissolo Háptico.

3. A energia de adsorção de P e o fator capacidade são mais elevados no Latossolo Amarelo, influenciados pela presença mais acentuada de óxidos.

4. No Latossolo, os fatores mais fortemente correlacionado com a adsorção são: pH, H + Al,  $Al^{3+}$ , Matéria orgânica, Al e Fe Oxalato e os teores de Gt e Hm. No Gleissolo, os fatores intrínsecos na adsorção são: pH,  $Al^{3+}$  e teores de Gt.

5. A diminuição da matéria orgânica em profundidade e a maior concentração de óxidos podem explicar a sorção de P no Latossolo Amarelo. A diminuição de óxidos em profundidade promovidos pela hidrólise pode explicar o comportamento de sorção de P no Gleissolo Háptico.

## 5. REFERENCIAS

- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A., LOPES, A. S. 1991. **Os Adubos e a eficiência das adubações**. 2. ed. São Paulo: ANDA, 1991, 35p.
- ALVAREZ V.V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E. ; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Revista Brasileira de ciência do solo**, v. 25, p. 27-32, 2000.
- ARRUDA, A. A.; ESTRELA, J. W. M.; FREIRE, J. L. O.; SANTOS, S. J. A. Fósforo remanescente em solos do Seridó Paraibano. **Revista Principia**, v. 35, p. 41-59, 2017.
- BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M.; RIBEIRO, A. C.; NOVAIS, R. F. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 243-249, 1983.
- 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. Reactions of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 183-230, 1985.
- BARROW, N. J. The description of sorption curves. **European Journal Soil Science**, v. 59, p. 900-910, 2008.
- BONFIM, E. M. S.; FREIRE, F. J.; SANTOS, M. V. F.; SILVA, T. J. A.; FREIRE, M. B. G. S. Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 28, p. 281-288, 2004.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, v. 21, p. 73-85, 1974.
- BROGGI, F.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; SANTOS FREIRE, M. B. G.; NASCIMENTO, C. W. A. Fator Capacidade de Fósforo em solos de Pernambuco mineralogicamente diferentes e influência do pH na capacidade máxima de adsorção. **Revista de Ciência e Agrotecologia**, v.35, p.77- 83, 2011.
- CAMPOS, M.; ANTONANGELO, J. A.; ALLEONI, L. R. F. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 110-118, 2016.
- CHANG, S.C.; JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, v.84, p.133-144, 1957.
- 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.
- CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; MENDES, J. S. Adsorção de fósforo em materiais de Latossolo e Argissolo. **Revista Catinga**, v. 20, p. 104- 111, 2007.
- CORINGA, J. E. S. **Adsorção de fósforo em solos do cerrado mato-grossense**. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2007, 80p.
- 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.



COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. (eds), Curitiba, 2010, 282p

CURI, N., CAMARGO, O. A., GUEDES, G. A. A., SILVEIRA, J. V. **Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil Sudeste e Sul**. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3, 1988, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: EMBRAPA/SNCLS-SBCS, 1988. p.267-282.

DAMACENO, J. B. D.; LOBATO, A. C. N.; GAMA, R. T.; OLIVEIRA, D. M.; FALCÃO, N. P. S. Biochar as Phosphorus Conditioner in Substrate for Brazil Nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.) Seedling Production in the Central Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 383-393, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SA 20- Manaus**. Volume 17. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro: MME/DNPM, 1978, 554p.

DONAGEMMA, G.K.; RUIZ, A. H.; ALVAREZ V, V. H.; KER, J. C.; FONTES, M. P. F. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de Latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, p. 1785-1791, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2017, 573p.

FALCÃO, N. P. S.; COMERFORD, N.; LEHMANN, J. **Determining nutrient bioavailability of Amazonian Dark Earth soils, methodological challenges**. In: Lehmann, J.; Kern, D.C.; Glaser, B.; Woods, W.I. (Ed.). Amazonian Dark Earths; origin, properties, managements. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 255- 270, 2003.

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

FARIAS, D. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, D.; ARRUDA, J. A.; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba: I- isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 623-632, 2009.

FERNÁNDEZ, I. E.; NOVAIS, R. F.; NUNES, F. N.; KER, J. C. Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbológica e química: II., extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2307-2317, 2008.

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.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, A. C.; BERNINI, T. A. Fósforo remanescente em solos formados sob diferentes materiais de origem em três toposequências. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 5, p. 2089-2102, 2013.

GILES, C. H.; MACEVAN, T. H.; NAKHWA, S. N.; SMITH, D. Studies on adsorption. **Journal of the Chemical Society**, v. 6, p. 3973-3993, 1960.

GUIMARÃES, S. T.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; NEVES, A. F.; SILVA, F. W. R.; MACEDO, R. S.; SOUZA, K. W. Caracterização e Classificação de gleissolos da Várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 317-326, 2013.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. New Jersey: Pearson Education, 2005, 215p.

HOLFORD, I.C.R.; MATTINGLY, G.E.G. Phosphate adsorption and plant availability of phosphate. **Plant Soil** v 1, p. 44:377-389, 1976.

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.

LIMA, H.N.; MELLO, J.W.V.; SCHAEFER C.E.G.R.; KER, J.C.;LIMA, A.M.N. Mineralogia e química de três solos de uma toposequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 59- 68, 2006.

MALUF, H. J. G. M.; SILVA, C. A.; CURTI, N.; NORTON, L. D.; ROSA, S. D. Adsorption and availability of phosphorus in response to humic acid rates in soils limed with  $\text{CaCO}_3$  or  $\text{MgCO}_3$ . **Ciência e agrotecnologia**, v 42, p. 7-20, 2018.

MARQUES, J. S. **Adsorção de fósforo em latossolo e argissolo misturado com carbono pirrolisado**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2016, 54 p.

MATOS, C. H. L.; MELO, V. F.; UCHOA, S. C. P.; NASCIMENTOS, P. P. R. R.; PEREIRA, R. A. Adsorção de fósforo em solos sob floresta e savana no norte Amazônico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, p. 2909-2920, 2017.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: Clays & Clay Mineral Conference. **Proceedings**, v.7, p.317-327, 1960.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999, 399p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. **Fósforo**. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Minas Gerais, p. 471-550, 2007.

NUNES, R. S. **Eficiência de uso do fósforo em sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada por um longo período**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2014, 150 p.

OLIVEIRA, C. M. B.; GATIBONI, L. C.; MIQUELLUTI, D. J.; SMYTH T, J. ALMEIDA, J. A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo Langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p.1805-1815, 2014.

OLIVEIRA, D. M.; DAMACENO, J. B. D.; LOBATO, A. C. N.; GUIMARÃES, R. S.; JÚNIOR, J. L.; GUERRINI, I. A.; FALCÃO, N. P. S. Biochar of Bamboo Influencing the Availability of P From Different Phosphate Sources in Dystrophic Yellow Oxisol of Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 242-251, 2019.

OLSEN, E.R.; WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the langmuir isotherm. **Soil Science Society American**, v. 21, p. 144-149, 1957.

PAVAN, M.A.; MIYAZAWA, M. **Química de solos inundados**. Londrina: IAPAR, 1983, 20p.

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.

PINTO, F. A.; SOUZA, E. D. DE; PAULINO, H. B.; CURTI, N.; CARNEIRO, A. C. P-sorption and desorption in savanna brazilian soils as a support por phosphorus fertilizer management. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, p. 521-530, 2013.

PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advanced Agronomy**, v. 24, p. 29-96, 1972.

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.

RODRIGUES, T.E. Solos da Amazônia. In: ALVAREZ, V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p.19-60, 1996.

ROGERI, D. A.; GIANELLO, C.; BORTOLON, L.; AMORIM, M. B. Substitution of Clay Content for P-Remaining as na Index of the Phosphorus Buffering Capacity for Soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 40, p. 1-14, 2016.

SAADI, A; OLIVEIRA, M. SHUMACHER, M. V.; ACCIOL Y, J. O. **Desertificação**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, 25p.

SANCHEZ, P. A.; BANDY, D.; VILLARICA, J.; NICHOLAIDES, J. Amazon basin soils: management for continuous crop production. **Science**, v. 216, p. 821-827, 1982.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. revisada e ampliada. , DF: EMBRAPA, 2018, 353p.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7a ed. revista e ampliada. Viçosa: SBCS, 2015, 102p.

SANYAL, S.K.; De DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, v.16, p.1-120, 1991.

SATO, S.; COMERFORD, N.B. Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid Brazilian Ultisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 685-694, 2005.

SCHAEFER, C. E. G. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; VALE JUNIOR, J. F; SOUZA, K. W.; CORREIRA, G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; AMARAL, E. F.; CAMPOS, M. C. C.; RUIVO, M. L. **Solos da Amazônia**. In: CURTI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds). Pedologia – Solos dos Biomas Brasileiros. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo., p. 111-176, 2017.

SCHWERTMANN, U. The differentiation of iron oxide in soil by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde**, v.105, p.104-201, 1964.

SINGH, R.; MOLLER, M.R.F.; FERREIRA, W.A. Cinética de sorção de fósforo em solos dos trópicos úmidos da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 227-231, 1983.

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

TEIXEIRA, W. G.; ARRUDA, W.; SHINZATO, E.; MACEDO, R. S.; MARTINS, G. C. LIMA, H. N.; RODRIGUES, T. E. **Solos do Estado do Amazonas**. In: MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L., eds. Geodiversidade do Estado do Amazonas. Manaus, CPRM, p.71-86, 2010.

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.

VIEIRA, M. S. **Sorção de fósforo em solos do semiárido**. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e água). Universidade Federal do Semi-árido, Mossoró, 2017, 37p.

WADT, P. G. S. e SILVA, L. M. **Determinação do fósforo remanescente para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2011, 10p.



**CAPÍTULO III**

**CINÉTICA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO DE UM GLEISSOLO  
HÁPLICO E UM LATOSSOLO AMARELO DA AMAZÔNIA CENTRAL**

MANAUS-AM  
2020

### CAPÍTULO III: CINÉTICA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO DE UM GLEISSOLO HÁPLICO E UM LATOSSOLO AMARELO DA AMAZÔNIA CENTRAL

**RESUMO:** Os estudos de adsorção de fósforo (P) em solos amazônicos são difundidos, no entanto a cinética de adsorção de P ainda é pouco estudada para estes solos, sendo esta fundamental no manejo e planejamento da adubação fosfatada e diminuição das perdas locais de P. O estudo foi realizado em dois tipos de solos: um perfil de solo Hidromórfico (Latosolo Amarelo - LAd) e um perfil de solo Não-hidromórfico (Gleissolo Háptico- GXv) na Amazônia Central do Brasil. Foram estudadas cinco profundidades: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Foi realizada a caracterização física, química e mineralógica de ambos os solos e as profundidades. Amostras de cada classe de solo e em cada profundidade foram agitadas com 10 mmol L<sup>-1</sup> de solução CaCl<sub>2</sub> contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>). Após cada período de agitação, a concentração de P na solução de equilíbrio foi mensurada e estimada utilizando equações gerais e lineares de cinética de adsorção. Paralelamente foi medida o tempo de adsorção de porcentagens específicas de P e a velocidade específica de sorção de cada fase linear (I, II e III). A equação de Kue Lotse (1974) é eficaz para descrever a cinética de sorção em solos amazônicos. Nas profundidades estudadas do Latossolo, a cinética mostrou-se similar. A cinética de adsorção de P é menor em profundidade no Gleissolo (40-60 cm). Em 2,5 e 2,1 dias ocorre a adsorção de 80% do P, respectivamente na superfície (< 20 cm) e na subsuperfície (> 20 cm) do Latossolo. Em 3,2 e 3,5 dias ocorre adsorção do P, respectivamente na superfície (< 20 cm) e na subsuperfície (> 20 cm) do Gleissolo. Identificou-se três fases de adsorção de P em ambos os solos: A fase I (rápida) que ocorre entre 0-18 horas, a fase II (intermediária) entre 18-96 horas e a fase III (lenta) entre 96-192 horas em diante. A fase I de adsorção é respectivamente 35,2 e 238,6 vezes mais rápida do que as fases II e III no Latossolo. A fase I de adsorção é respectivamente 25,5 e 198,8 vezes mais rápida que as fases II e III no Gleissolo.

**Palavras-Chaves:** fósforo adsorvido, velocidade de adsorção, perda de P, solos amazônicos.

**ABSTRACT:** Studies of phosphorus (P) adsorption in Amazonian soils are widespread, however the adsorption kinetics of P is still poorly studied for these soils, which is fundamental in the management and planning of phosphate fertilization and reduction of local P losses. The study was carried out in two types of soils: a hydromorphic soil profile (Dystrophic Yellow Oxisol - LAd) and a non-hydromorphic soil profile (Haplic Gleysol Ta- GXv) in the Central Amazon of Brazil. Five depths were studied: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm. Physical, chemical and mineralogical characterization of both soils and depths was carried out. Samples from each soil class and at each depth were stirred with 10 mmol L<sup>-1</sup> of CaCl<sub>2</sub> solution containing 60 mg L<sup>-1</sup> of P (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>). After each stirring period, the concentration of P in the equilibrium solution was measured and estimated using general and linear equations of adsorption kinetics. At the same time, the adsorption time of specific percentages of P and the specific sorption speed of each linear phase (I, II and III) were measured. The Kue Lotse (1974) equation is effective for describing the sorption kinetics in Amazonian soils. In the studied depths of the Oxisol, the kinetics proved to be similar. The adsorption kinetics of P is lower in depth in the Gleysol (40-60 cm). In 2.5 and 2.1 days, 80% of the P adsorption occurs, respectively on the surface (<20 cm) and on the subsurface (> 20 cm) of the Oxisol. In 3.2 and 3.5 days, P adsorption occurs, respectively on the surface (<20 cm) and on the subsurface (> 20 cm) of the Gleysol. Three P adsorption phases were identified in both soils: Phase I (fast) which occurs between 0-18 hours, Phase II (intermediate) between 18-96 hours and Phase III (slow) between 96-192 hours onwards. The adsorption phase I is respectively 35.2 and 238.6 times faster than the phases II and III in the Oxisol. The adsorption phase I is respectively 25.5 and 198.8 times faster than phases II and III in the Gleysol.

**Key-words:** Phosphorus, adsorbed speed, loss of P, Amazonian soils.

## 1. INTRODUÇÃO

A diminuição das reservas mundiais de fósforo (P) associada ao aumento do consumo de fertilizantes fosfatados na agricultura e a baixa eficiência de utilização destes devido à alta afinidade com o solo, tem dispensado atenção constante de diversos pesquisadores ao longo dos anos, principalmente em solos tropicais, onde os processos de retenção de P no solo parecem ser mais elevados (BARROW, 1974; NOVAIS et al., 1977; SINGH et al., 1983; GONÇALVES et al., 1985; TUCCI, 1991; FALCÃO e SILVA, 2004; NOVAIS et al., 2007; FARIAS et al., 2009; SANTOS et al., 2011; ZHANG et al., 2015; BARBOSA, 2017; DAMACENO et al.; 2019; SZARA et al., 2019).

Em solos da Amazônia, características específicas como elevada intemperização dos solos, material de origem pobres em P, baixos teores de matéria orgânica e a presença de óxi-hidróxidos de Fe e Al estáveis contribuem significativamente na adsorção de P no solo (FALCÃO E SILVA, 2004; NOVAIS et al., 2007; SANTOS et al. 2011). Além das quantidades adsorvidas, um outro fator relevante é compreender o período de transformação do P-disponível (Lábil) naquele não disponível (não lábil), com a finalidade de subsidiar e otimizar a fertilização fosfatada nestes solos, seja em superfície ou em subsuperfície (SINGH et al., 1983; GONÇALVES et al., 1985; FARIAS et al., 2009).

Apesar de complementares, as reações de perda de P nos solos se dá por processos distintos e iniciam em prazos muito curtos, minutos ou segundos após o contato do P com os solos em exposição a umidade (NOVAIS et al., 2007). A retenção na superfície de minerais do solo, como argilas e óxidos (adsorção) ou/e a união do P com íons metálicos ( $\text{FePO}_4$  e  $\text{AlPO}_4$ ) (precipitação) representam quase a totalidade do P “perdido” no solo, dada sua baixa mobilidade, logo as reações que predizem o tempo de permanência na fase lábil está intrinsecamente ligado a velocidade e a eficiência destes processos no solo (NOVAIS et al., 2007; SANTOS et al., 2011; CRAVO et al., 2012).

Alguns estudos tem demonstrando pelo menos duas fases na reação de adsorção, que representa a maior parcela do P retido no solo: a primeira rápida e por ligação eletrostática e a segunda mais lenta e covalente, predominantemente por troca de ligantes ( $\text{OH}^-$ ). Dentre outros fatores, há indícios que a mineralogia, especificamente na natureza eletroquímica dos óxidos de Fe e Al controlam o processo (NOVAIS et al., 2007; SANTOS et al., 2011; BARBOSA, 2017), no entanto, o grau de cristalização dos minerais, tipo e teor de argila parecem afetar o tempo e quantidade de P adsorvido (FERNANDEZ et al., 2008; FARIAS et al., 2009).

De acordo com Fernandez et al. (2008), condições em que os solos são frequentemente inundados, fato muito comum em solos de “várzea” dos rios Amazônicos, a diminuição do potencial redox, devido a redução do  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$  promove menor adsorção e conseqüentemente maior disponibilidade de P. O processo envolve, dentre outras aspectos, boa disponibilidade de carbono á microbiota, hidrólise do Fe e do Al estrutural e dissolução das moléculas ortofosfáticas, propiciando liberação do fósforo ocluso nos minerais, condição irreversível em condições drenadas. Embora demonstrado por Fernandez et al. (2008), que o hidromorfismo dos solos não beneficiam

significativamente a reversibilidade do P adsorvido em solos do cerrado, é possível que em solos Amazônicos o comportamento seja diverso ou que diminua o tempo de reação, aumentando o período de disponibilidade de P na solução (GONÇALVES et al., 1985).

A alta heterogeneidade horizontal e vertical dos solos, em especial na Amazônia Central, onde condições de drenagem distintas, altas taxas pluviométricas e a constante adição de novos sedimentos cria condições microedáficas únicas de relação do P com o solo, sendo difícil estabelecer uma equação única que descreva em totalidade sua dinâmica no solo (KUE e LOTSE, 1974; GONÇALVES et al., 1985; REIS et al., 1995). Descrever a cinética de adsorção do P é altamente complexa e não há equação ou metodologia geral que dê luz aos todos os processos (GUAN et al., 2007; SANTOS et al., 2011).

Muitos são os estudos que analisam a adsorção e a disponibilidade de P em vários tipos de solos, no Brasil em geral (CHAVES et al., 2007; FARIAS et al., 2009; FARIAS et al., 2016) e na Amazônia (TUCCI, 1991; LIMA, 2001; FALCÃO e SILVA, 2004; BARBOSA, 2017; OLIVEIRA et al., 2019). Apesar disso, o número de estudos de cinética de adsorção de P são reduzidos (GONÇALVES et al., 1985; REIS et al., 1995; SANTOS et al., 2011) e ainda mais reduzidos na Amazônia (SINGH et al., 1993), sendo o único estudo de cinética disponível na região.

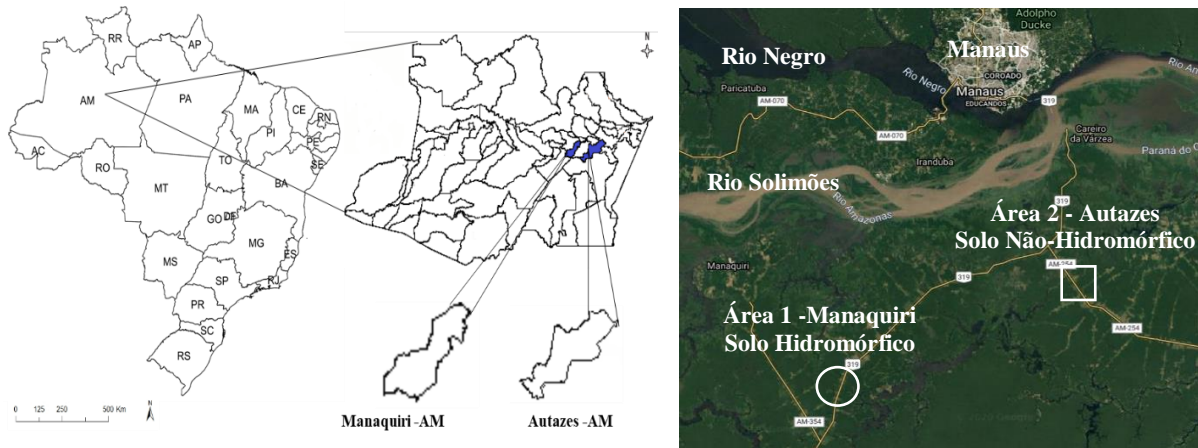
Logo, este estudo propõe aumentar a base científica com informações relevantes de cinética de adsorção de P em solos da Amazônia Central em superfície e em subsuperfície, de modo a complementar estudos anteriores e posteriores relacionados a fertilização fosfatada e conseqüentemente, a diminuição das perdas de P no solo. Diante do exposto, o objetivo deste estudo é compreender e analisar a cinética de adsorção de fósforo nas camadas superficiais (< 20 cm) e superficiais (>20 cm) de um Gleissolo Háplico e um Latossolo Amarelo na Amazônia Central.



## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Descrição das Áreas de Estudo

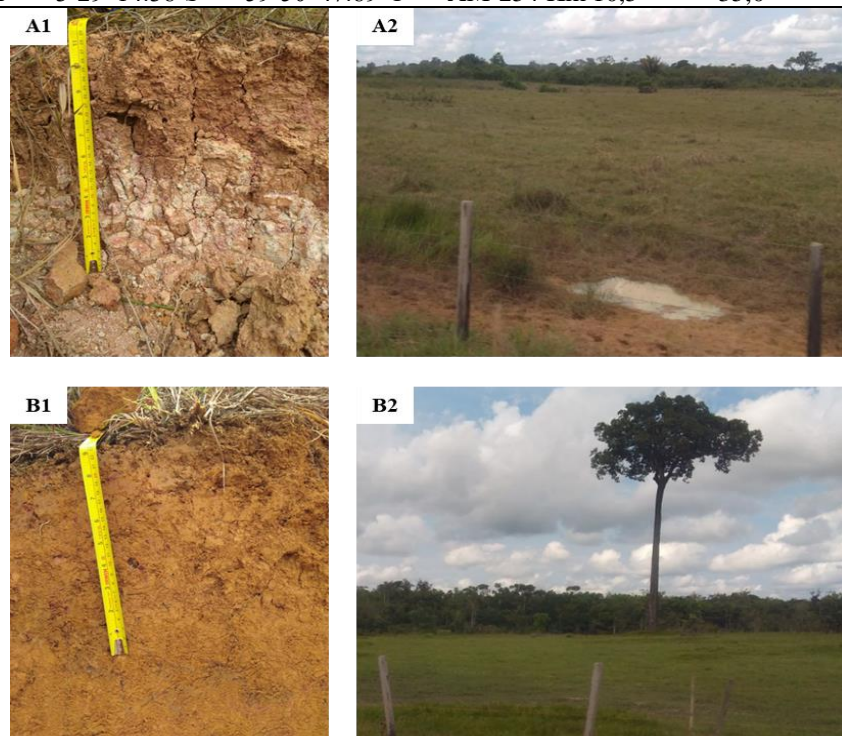
Foram selecionadas duas áreas no limite da Formação Sedimentar do Solimões com a Formação Alter do Chão na porção Noroeste do Estado do Amazonas-Brasil. A primeira área configura-se como inundável em boa parte do ano típica de várzea, dada o perfil do lençol freático mais elevado nos meses mais chuvosos e a segunda área configura-se como mais elevada típica de áreas de terra firme do estado do Amazonas. As informações geodésicas, climatológicas e locais são descritas na Figura 1, Tabela 1 e Figura 2.



**Figura 1.** Localização das Áreas de Estudo e Coleta de Solo (Autor, 2020)

**Tabela 1.** Caracterização Geodésica e Climatológica das Áreas de Estudo (CPRM, 2010)

Município	Coordenadas		Localização	Altitude (m)	Precipitação (mm)
	Latitude	Longitude			
Manauquiri - AM	3°45'03.78'S	60°17'36.01'O	BR-319 Km 101	22,0	2218
Autazes - AM	3°29'14.38'S	59°50'47.89'O	AM-254 Km 10,5	35,0	2230



**Figura 2.** Gleissolo Háplico Ta distrófico (A1); área associada ao Gleissolo (A2), Latossolo Amarelo distrófico típico (B1) e área associada ao Latossolo (B2).

## **2.2. Procedimentos Específicos**

### **2.2.1. Seleção dos Perfis e Coletas de Solo**

Foram selecionados dois perfis de solos com características que atendessem os seguintes critérios: serem modais, ou seja, solos mais representativos de cada classe e de ambientes distintos, um mal drenado (Gleissolo Háplico) e outro com boa drenagem (Latossolo Amarelo). Por se tratar de um estudo de caso, as informações não refletem com exatidão as características de outros perfis de solos semelhantes, mas é possível depreender que sob tais condições sejam similares. Os solos foram classificados segundo a metodologia do Manual de Coleta e Descrição de Solo em Campo (SANTOS et al., 2015), Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SANTOS et al., 2018) e mapas de solos da região (DNPM, 1978).

Para o estudo de adsorção, disponibilidade e caracterização dos solos foram selecionadas cinco (05) profundidades de coleta: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm, de modo a identificar possíveis alterações físicas, químicas e mineralógicas ligadas a retenção de fósforo no solo. Para tal, a camada arável (0-20 cm) foi estratificada em três níveis: 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm e a subsuperfície (20-60) em dois níveis de identificação: 20-40 cm e 40-60 cm. Sob cada perfil e em cada profundidade estudada, foram coletadas 10 subamostras com aproximadamente 100 g de solo em multipontos para cada profundidade, de modo a perfazer uma amostra composta (1 kg). Para garantir a idoneidade das amostras, a coleta ocorreu sobre perfil reconhecidamente não alterado antropicamente. Posteriormente a coleta, as amostras foram devidamente identificadas e armazenadas em saco transparente limpo. Em local apropriado, foram destorroadas, homogeneizadas, submetidas a secagem a sombra em temperatura ambiente até que toda a umidade fosse retirada. Após, foram passadas peneira de inox com malha de 2,00 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

### **2.2.2. Caracterização Física, Química, Morfológica e Mineralógica**

A caracterização morfológica dos solos foi realizada de acordo com os critérios do Manual de Coleta e Descrição de Solo em Campo (SANTOS et al., 2015), e foram avaliados seguintes aspectos: cor, estrutura e as consistências seca, úmida e molhada, sendo esta última subdividida em plasticidade e pegajosidade. A caracterização física foi realizada segundo a metodologia da Embrapa (2017), sendo avaliados: matéria orgânica e granulometria, identificando as proporções de areia total, silte, argila e classe textural (Tabela 2).

A caracterização química foi realizada segundo a metodologia da Embrapa (2017), sendo avaliadas as seguintes características: pH em água, pH em KCl, acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ), alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ), teores de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , K, fósforo disponível, delta pH ( $\Delta pH$ ) ( $\Delta pH = pH H_2O - pH KCl$ ), ponto de carga zero (PCZ) ( $PCZ = 2pH KCl - pH H_2O$ ), soma de bases ( $SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K$ ), capacidade de troca de cátions efetiva (t) ( $t = SB + Al^{3+}$ ), capacidade de troca de cátions potencial (T)

( $T = SB + (H+Al)$ ), saturação por bases ( $v = (SB/T) \cdot 100$ ), saturação por alumínio ( $m(\%) = (Al/t) \cdot 100$ ) e atividade da argila ( $Ta = T \times 1000 / g.kg^{-1}$  de argila) (Tabela 2).

A caracterização mineralógica foi realizada segundo a metodologia da Embrapa (2017) e outras metodologias específicas (MEHRA; JACKSON, 1960; SCHWERTMANN, 1964). Foram analisados os seguintes atributos: Difractometria de Raios-X (DRX) (20mA, 30 kV), ferro e alumínio ditionito (cristalinos) e ferro e alumínio oxalato (baixa cristalinidade), relação alumínio oxalato e ditionito ( $A_o/A_d$ ) e ferro oxalato e ditionito ( $Fe_o/Fe_d$ ), Teores de goethita (Gt) e de hematita (Hm) e a Substituição Isomórfica ( $Al_{oFe}/27$ ) / [( $Al_{oFe}/27$ ) + ( $Fe_c/56$ )], em que  $Al_{oFe} = Al_d - Al_o$  e  $Fe_c = Fe_d - Fe_o$  (Tabela 2).

**Tabela 2.** Atributos físicos, químicos e mineralógicos em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) de um Latossolo Amarelo (LAd) e um Gleissolo Háptico (GXv) da Amazônia Central, Brasil.

Atributos do Solo	Latossolo Amarelo Distrófico (LAD)					Gleissolo Háptico Ta (GXv)				
	0-5	5-10	10-20	20-40	40-60	0-5	5-10	10-20	20-40	40-60
<b>Profundidade do Solo (cm)</b>										
Atributos físicos do solo										
Areia ( $g.kg^{-1}$ )	90,0	80,2	90,0	80,0	80,4	80,60	90,30	70,70	50,20	50,80
Silte ( $g.kg^{-1}$ )	230,8	210,4	140,8	180,2	150,6	480,8	440,7	400,9	410,4	460,0
Argila ( $g.kg^{-1}$ )	670,2	700,4	760,2	730,8	760,0	420,6	460,0	510,4	530,4	480,2
Classe Textural	Muito Argilosa					Argila Siltosa				
Atributos químicos do solo										
P- Disp. ( $mg dm^{-3}$ )	1,19	1,08	1,16	0,93	0,78	1,19	0,93	0,87	0,93	0,81
pH ( $H_2O$ )	5,3	5,4	5,4	5,5	5,5	5,1	5,2	5,2	5,2	5,1
pH (KCl)	4,2	4,3	4,3	4,3	4,4	4,0	4,0	4,0	3,9	4,0
$\Delta pH$	-1,1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,1	-1,1	-1,2	-1,2	-1,3	-1,1
PCZ	3,1	3,2	3,2	3,1	3,3	2,9	2,8	2,8	2,6	2,9
M.O.S ( $g.kg^{-1}$ )	22,0	21,0	10,0	5,0	6,0	14,0	11,0	8,0	6,0	4,0
$Al^{3+}$ ( $cmolc. dm^{-3}$ )	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	5,1	6,9	9,2	10,9	11,2
H+Al ( $cmolc. dm^{-3}$ )	5,8	6,4	5,8	5,2	4,7	18,5	22,8	34,7	31,3	32,3
Ca ( $cmolc. dm^{-3}$ )	1,1	1,0	0,4	0,5	0,4	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0
Mg ( $cmolc. dm^{-3}$ )	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1	1,0	0,8	0,7	0,8	0,5
K ( $cmolc. dm^{-3}$ )	0,08	0,04	0,03	0,02	0,03	0,07	0,05	0,05	0,06	0,06
SB ( $cmolc. dm^{-3}$ )	1,78	1,44	0,63	0,72	0,53	2,57	2,25	2,05	2,06	1,56
CTC t ( $cmolc. dm^{-3}$ )	3,0	2,8	2,0	2,1	1,9	7,7	9,2	11,3	13,0	12,8
CTC T ( $cmolc. dm^{-3}$ )	7,6	7,9	6,4	5,9	5,2	21,0	25,1	36,8	33,3	32,8
Ta ( $cmolc. dm^{-3}$ )	11,3	11,2	8,5	8,1	6,9	50,1	54,6	72,7	62,9	68,4
v (%)	24,0	18,6	10,3	12,5	10,8	12,4	9,3	5,8	6,3	4,9
m (%)	39,6	48,7	67,6	65,1	71,0	66,6	74,5	81,0	83,7	87,3
Atributos mineralógicos do solo										
Al oxalato ( $g.kg^{-1}$ )	1,02	0,78	0,59	0,58	0,58	2,13	2,00	1,58	0,80	0,62
Al ditionito ( $g.kg^{-1}$ )	3,9	3,0	4,2	4,2	4,2	5,4	4,1	4,4	2,9	1,8
Fe oxalato ( $g.kg^{-1}$ )	2,21	0,84	0,44	0,19	0,14	9,03	8,25	4,25	2,99	0,42
Fe ditionito ( $g.kg^{-1}$ )	11,9	12,9	14,0	12,5	16,9	22,9	22,6	16,5	11,6	05,8
$Al_{Oxalato} / Al_{Ditionito}$	0,25	0,25	0,13	0,13	0,13	0,39	0,48	0,35	0,27	0,34
$Fe_{Oxalato} / Fe_{Ditionito}$	0,18	0,06	0,03	0,01	0,01	0,39	0,36	0,25	0,25	0,07
Goethita ( $g.kg^{-1}$ )	18,8	20,5	22,0	19,9	26,8	21,4	35,7	25,9	17,9	09,1
Hematita ( $g.kg^{-1}$ )	09,8	10,7	11,4	10,4	14,0	18,0	18,8	13,4	09,0	04,7
Sub Fe/Al ( $mol mol^{-1}$ )	0,39	0,28	0,36	0,38	0,31	0,33	0,24	0,32	0,34	0,31
Minerais fração argila - DRX	caulinita, goethita, hematita, quartzo					caulinita, goethita, hematita, quartzo, illita, minerais 2:1				

### 2.2.3. Local de Estudo e Delineamento Experimental

O estudo de avaliação da Cinética de Adsorção foi conduzido no Laboratório de Gênese e Mineralogia do solo da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Foi utilizando um delineamento inteiramente casualizado tipo fatorial 2 x 5, sendo duas (2) classes de solo (Gleissolo Háptico e Latossolo Amarelo), cinco (5) profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm) e quinze (15) períodos de equilíbrio (15; 30; 60; 120; 240; 360; 720; 1440; 2880; 4320; 5760; 7.200; 8.640; 10.080 e 11.520 minutos). Para cada amostra de solos utilizou-se três (3) repetições).

### 2.2.4. Cinética de Adsorção de Fósforo

A cinética de adsorção de P foi determinada a partir de 2,5g de TFSA, as quais foram adicionadas em balão Erlenmeyer de 125 mL e agitados em agitador horizontal (160 rpm) com 25 mL de solução  $\text{CaCl}_2$  10 mmol  $\text{L}^{-1}$  P contendo 60 mg  $\text{L}^{-1}$  de P na forma de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (Fosfato de Potássio Monobásico). Ao final de cada período de agitação (0,25 h (15 min.); 0,50 h (30 min.); 1,0 h; 2,0 h; 4,0 h; 6,0 h; 12,0 h; 18,0 h; 24,0 h; 48,0 h; 72,0 h; 96,0 h; 120,0 h; 144,0 h; 168,0 h e 192,0 h) as suspensões foram filtradas e o fósforo no sobrenadado determinado utilizando-se o método baseado no emprego do complexo fosfomolibdico e ácido ascórbico como redutor (BRAGA e DEFELIPO, 1974).

Para mensurar a cinética de adsorção de P foi utilizada equação de Kue e Lotse (1974):  $x/m = kC_0 t^{1/n}$ , na sua forma linear,  $\log x/m = \log kC_0 + 1/n \log t$ , em que  $x/m$  é o P adsorvido pelo solo (mg  $\text{g}^{-1}$ ),  $k$  e  $1/n$  são constantes, sendo  $k$  a taxa de reação (mg  $\text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$ )  $C_0$  é a concentração inicial de P (60 mg  $\text{L}^{-1}$ ) e  $t$  é o tempo de equilíbrio do P em solução (horas). A adsorção de P foi igualmente linearizada entre três fases de adsorção (I, II e III), baseado na equação de cinética de Weber e Morris (1963):  $P$  adsorvido (mg  $\text{g}^{-1}$ ) =  $at + C_i$ , em que  $a$  é a taxa de sorção linear de P (mg  $\text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ),  $t$  é o tempo de equilíbrio do P em solução (horas) e  $C_i$  é a concentração inicial de P em cada fase de adsorção (mg  $\text{g}^{-1}$ ).

### 2.2.5. Mensuração de Atributos Relacionados a Adsorção de Fósforo

As constantes de cinética de adsorção de cada fórmula foram correlacionadas aos principais atributos do solo relacionadas a adsorção, sendo eles: CTC Potencial, Fósforo Remanescente, Ferro e Alumínio Ditionito, Ferro e Alumínio Oxalato, Capacidade Máxima de Adsorção de P (CMAP) e Teores de Argila. Todos os atributos acima relacionados foram analisados de acordo com o com a metodologia da Embrapa (2017).

A CTC Potencial foi determinada utilizando a seguinte fórmula:  $T = SB + (H+Al)$  (cmol $_c$   $\text{dm}^{-3}$ ), sendo SB: soma de bases e H+Al: Acidez Potencial. O fósforo remanescente foi determinado através da adição de 60 mg  $\text{L}^{-1}$  de P ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$  - fosfato de potássio monobásico) para 5,0 g de TFSA em solução de 0,01 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{CaCl}_2$  com posterior determinação pelo método colorimétrico (ALVAREZ et al., 2000). As determinações dos óxidos de Ferro (Fed) e Alumínio (Ald) na forma cristalina, amostras de TFSA foram submetidas a extração em solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB)

(MEHRA; JACKSON, 1960). Para as determinações dos óxidos de baixa cristalinidade para Ferro (Feo) e Alumínio (Ald), as extrações foram realizadas com solução de oxalato de amônio a  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 3,0, no escuro (SCHWERTMANN, 1964).

Para determinação da CMAP, foram utilizados 2,5 g de TFSA, agitados por 24 horas com 25 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$  0,01M, contendo respectivamente: 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 e  $140 \text{ mg L}^{-1}$  de P na forma de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Após a agitação, a suspensão foi centrifugada a 3000 rpm e filtrada. Posteriormente, alíquotas do sobrenadante foram usadas na determinação de fósforo usando o ácido ascórbico como redutor (BRAGA e DEFELIPO, 1974). Os teores de argila foram determinados por granulometria através do método da pipeta (EMBRAPA, 2017).

### **2.3. Análise Estatística**

A comparação das médias das concentrações de P em equilíbrio após cada período de agitação foi realizada a partir de delineamento fatorial  $2 \times 5$ , sendo duas (02) classes de solos e em cinco (05) profundidades distintas em cada tempo estudados (0,25 h (15 min.); 0,50 h (30 min.); 1,0 h; 2,0 h; 4,0 h; 6,0 h; 12,0 h; 18,0 h; 24,0 h; 48,0 h; 72,0 h; 96,0 h; 120,0 h; 144,0 h; 168,0 h e 192,0 h). Os dados foram submetidos a análise de variância e aquelas com resposta significativa para o teste F, foram realizados o teste de comparação de médias ao nível de 5% (Tukey). Para determinar os coeficientes das equações, utilizou-se o programa estatístico SAEG (2007), e testados pelo teste F.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

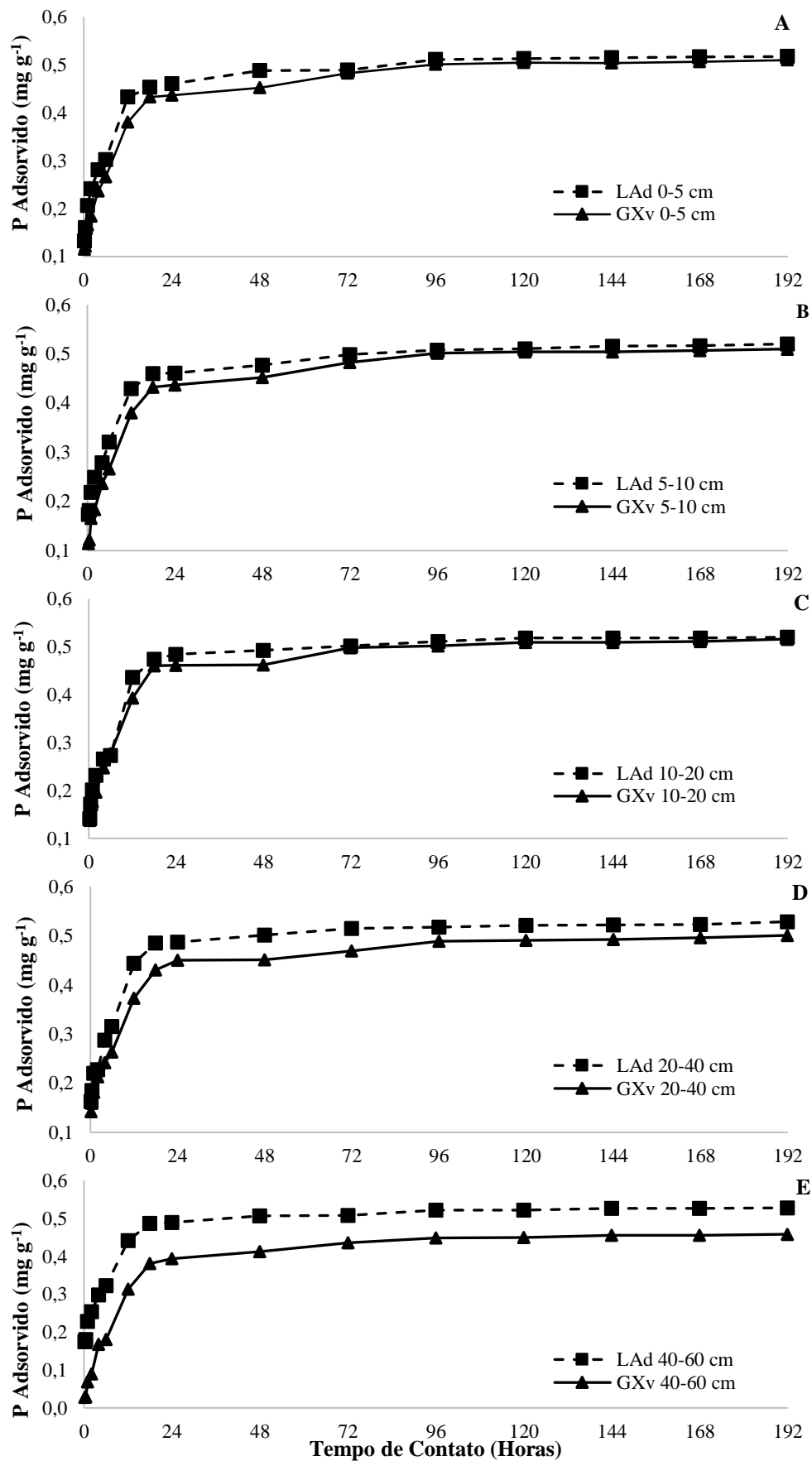
#### 3.1. Fósforo em Equilíbrio e Adsorção de P no Perfil do Solo

Os teores de P em equilíbrio em tempos distintos para concentração inicial de 60 mg P L<sup>-1</sup> podem ser observados na Tabela 3 para o Latossolo Amarelo (LAd) e o Gleissolo Háptico nas cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm). Diversos autores indicam que o processo de adsorção de P acontece em duas fases, inicialmente rápida e posteriormente lenta, entrando em equilíbrio (GONÇALVES et al., 1985; REIS et al., 1995; KARACA et al., 2004; GUAN et al., 2007, NOVAIS et al., 2007; WANG et al., 2009; SANTOS et al., 2011; ZHANG et al., 2015).

**Tabela 3.** Concentração média de P em relação ao tempo de equilíbrio após períodos de agitação (0,25; 0,50; 1; 2; 4; 5; 12; 18; 24; 48; 72; 96; 120; 144; 168 e 192 horas) em diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) de um Latossolo Amarelo (LAd) e um Gleissolo Háptico (GXv) da Amazônia Central, Brasil.

Tempo horas	Latossolo Amarelo distrófico (LAd)					Gleissolo Háptico Ta (GXv)				
	Profundidade do Solo (cm)									
	0-5	5-10	10-20	20-40	40-60	0-5	5-10	10-20	20-40	40-60
	<b>Fósforo em Equilíbrio (mg L<sup>-1</sup>) – Concentração Inicial de 60 mg L<sup>-1</sup></b>									
<b>0,25</b>	46,7	42,6	45,9	43,8	42,6	48,5	46,0	46,3	45,8	57,2
<b>0,50</b>	44,0	41,9	42,9	41,5	42,0	47,8	45,3	45,4	44,1	57,1
<b>1</b>	39,4	38,1	39,9	38,0	37,1	43,4	42,7	42,3	41,8	53,2
<b>2</b>	35,8	35,1	36,8	37,2	34,6	41,6	39,3	40,3	38,7	51,0
<b>4</b>	31,9	32,1	33,4	31,2	30,1	36,4	33,9	35,3	35,8	43,2
<b>6</b>	29,8	27,9	32,6	28,5	27,8	33,4	32,1	32,3	33,7	42,0
<b>12</b>	16,7	17,1	16,4	15,6	15,8	22,0	20,3	20,7	22,7	28,6
<b>18</b>	14,7	14,0	12,6	11,5	11,3	16,7	14,5	14,0	17,0	22,0
<b>24</b>	14,0	13,9	11,6	11,3	11,1	16,3	14,2	13,9	15,0	20,6
<b>48</b>	11,2	12,3	10,8	9,9	9,3	14,8	13,6	13,8	14,9	18,7
<b>72</b>	11,1	10,2	9,8	8,5	9,3	11,7	11,1	10,2	13,1	16,4
<b>96</b>	8,8	9,2	8,9	8,3	7,9	9,9	9,6	9,8	11,1	15,2
<b>120</b>	8,7	9,0	8,2	7,9	7,8	9,6	9,4	9,1	10,9	15,1
<b>144</b>	8,5	8,4	8,2	7,8	7,4	9,6	9,0	9,1	10,8	14,5
<b>168</b>	8,4	8,3	8,2	7,7	7,3	9,3	8,9	9,0	10,4	14,4
<b>192</b>	8,3	8,0	8,0	7,2	7,2	9,0	8,8	8,4	9,9	14,2

O comportamento da diminuição das taxas de adsorção de P com o passar do tempo indicam que a saturação de P nos sítios adsorventes e a penetração do deste nos agregados do solo dificultam proporcionalmente o processo (REIS et al., 1985; CHEUNG e VENKITACHALAM; NOVAIS et al., 2007) (Tabela 3). Segundo Barrow (1985), o equilíbrio observado da adsorção com o passar do processo é extremamente lento, podendo acontecer após anos de contato P - Solo, o que sugere que o processo de adsorção é contínuo, mesmo sob intensa saturação.



**Figura 3.** Fósforo adsorvido em diferentes tempos de contato na profundidade 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C), 20-40 cm (D) e 40-60 cm (E) em um Latossolo Amarelo (LAd) e um Gleissolo Háptico (GXv) da Amazônia Central, Brasil

**Tabela 4.** Comparação de médias (Tukey) de fósforo adsorvido em diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) de um Latossolo Amarelo (LAd) e um Gleissolo Háplico (GXv) da Amazônia Central, Brasil.

Prof.	Tempo de Equilíbrio (Horas)															
	0,25 h		0,50 h		1 h		2 h		4 h		6 h		12 h		18 h	
	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv
	<b>Fósforo Adsorvido (Concentração Inicial de 0,60 mg g<sup>-1</sup>)</b>															
<b>0-5</b>	0,13Aa	0,11Aa	0,16Aa	0,12Aa	0,21Aa	0,17Aa	0,24 Aa	0,18Aa	0,28Aa	0,24Aa	0,30Aa	0,27Aa	0,43Aa	0,38Ba	0,45Ad	0,43Bc
<b>5-10</b>	0,17Aa	0,14Aa	0,18Aa	0,15Aa	0,22Aa	0,17Aa	0,25Aa	0,21Aa	0,28Aa	0,26Aa	0,32Aa	0,28Aa	0,43Aa	0,40Ba	0,46Ac	0,45Bb
<b>10-20</b>	0,14Aa	0,14Aa	0,17Aa	0,15Aa	0,20Aa	0,18Aa	0,23Aa	0,20Aa	0,27Aa	0,25Aa	0,27Aa	0,28Aa	0,44Aa	0,39Ba	0,47Ab	0,46Ba
<b>20-40</b>	0,16Aa	0,14Aa	0,19Aa	0,16Aa	0,22Aa	0,18Aa	0,23Aa	0,21Aa	0,29Aa	0,24Aa	0,32Aa	0,26Aa	0,44Aa	0,37Ba	0,49Aa	0,43Bc
<b>40-60</b>	0,17Aa	0,03Bb	0,18Aa	0,03Bb	0,23Aa	0,07Bb	0,25Aa	0,09Bb	0,30Aa	0,17Bb	0,32Aa	0,18Bb	0,44Aa	0,31Bb	0,49Aa	0,38Bd
<i>D.M.S</i>	0.07		0.07		0.07		0.07		0.07		0.07		0.03		0.01	
<i>p</i>	0.002		0.001		0.001		0.001		0.005		0.002		0.0006		0.0006	
Prof.	Tempo de Equilíbrio (Horas)															
	24 h		48 h		72 h		96 h		120 h		144 h		168 h		192 h	
	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv	LAd	GXv
	<b>Fósforo Adsorvido (Concentração Inicial de 0,60 mg g<sup>-1</sup>)</b>															
<b>0-5</b>	0,46Ab	0,44Bb	0,49Aa	0,45Ba	0,49Ab	0,48Aab	0,51Aa	0,50Aa	0,51Aa	0,50Aa	0,52Aa	0,50Aa	0,52Aa	0,51Aa	0,52Aa	0,51Aa
<b>5-10</b>	0,46Ab	0,46Aa	0,48Ab	0,46Ba	0,50Aab	0,49Aa	0,51Aa	0,50Aa	0,51Aa	0,51Aa	0,52Aa	0,51Aa	0,52Aa	0,51Aa	0,52Aa	0,51Aa
<b>10-20</b>	0,48Aa	0,46Ba	0,49Aa	0,46Ba	0,50Aab	0,50Aa	0,51Aa	0,50Aa	0,52Aa	0,51Aa	0,52Aa	0,51Aa	0,52Aa	0,51Aa	0,52Aa	0,52Aa
<b>20-40</b>	0,49Aa	0,45Ba	0,50Aa	0,45Ba	0,52Aa	0,47Bb	0,52Aa	0,49Ba	0,52Aa	0,49Bb	0,52Aa	0,49Ba	0,52Aa	0,50Ba	0,53Aa	0,50Ba
<b>40-60</b>	0,49Aa	0,39Bc	0,51Aa	0,41Bb	0,51Aa	0,44Bc	0,52Aa	0,45Bb	0,52Aa	0,45Bc	0,53Aa	0,46Bb	0,53Aa	0,46Bb	0,53Aa	0,46Bb
<i>D.M.S</i>	0.02		0.02		0.02		0.02		0.02		0.02		0.02		0.02	
<i>p</i>	0.00005		0.00007		0.00006		0.00006		0.00004		0.00007		0.00006		0.00005	

Solos: Latossolo Amarelo distrófico (LAd) e Gleissolo Háplico Ta (GXv); Prof.: Profundidades estudadas em centímetros (cm); D.M.S: Diferença Mínima Significativa; p: p valor significativo a 1% (< 0.01), a 5% (< 0.05) e não significativo (>0,05) pelo teste de Tukey.



O teor de fósforo adsorvido não diferiu estatisticamente na superfície (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm) entre os solos (LAd e GXv) nas primeiras horas de equilíbrio (0 a 6 horas) e nas últimas avaliadas (72 a 192 horas). No período intermediário de equilíbrio (12-48 horas), a adsorção de P foi estatisticamente mais elevada no Latossolo Amarelo em comparação ao Gleissolo Háplico (Figura 3A, 3B, 3C, 3D, 3E; Tabela 4). Como sugerido por Parfitt (1978), o estágio que sucede a neutralização das cargas positivas do solo pelas moléculas de P é a troca de ligantes, que ocorre preferencialmente após algumas horas de contato com o solo, logo é possível que no LAd esta etapa seja mais eficiente que no GXv.

Em profundidade (20-40 cm), a taxa de adsorção de P entre os solos é similar até 6 horas de equilíbrio, porém após 12 horas, o P adsorvido nessa profundidade é mais elevada no LAd do que no GXv. A diferença observada nesta profundidade pode estar relacionada ao início do processo de Gleização verificado no Gleissolo Háplico, no qual há redução dos minerais de Fe responsáveis em grande parte pela adsorção de P em solos Amazônicos, devido à ausência de oxigênio durante um período do ano (NOVAIS et al., 2007; SANTOS et al., 2011; SCHAEFER et al., 2017). O processo de gleização é mais elevado em profundidade (40-60 cm), o que leva diferenças significativas nas taxas de sorção nesta camada em todas as horas avaliadas (0-192 h), indicando que a adsorção de fósforo sob processo de hidromorfismo é diminuído não somente em pontos específicos, como ao longo do tempo.

### **3.2. Cinética de Adsorção adaptada de Kue e Lotse (1974)**

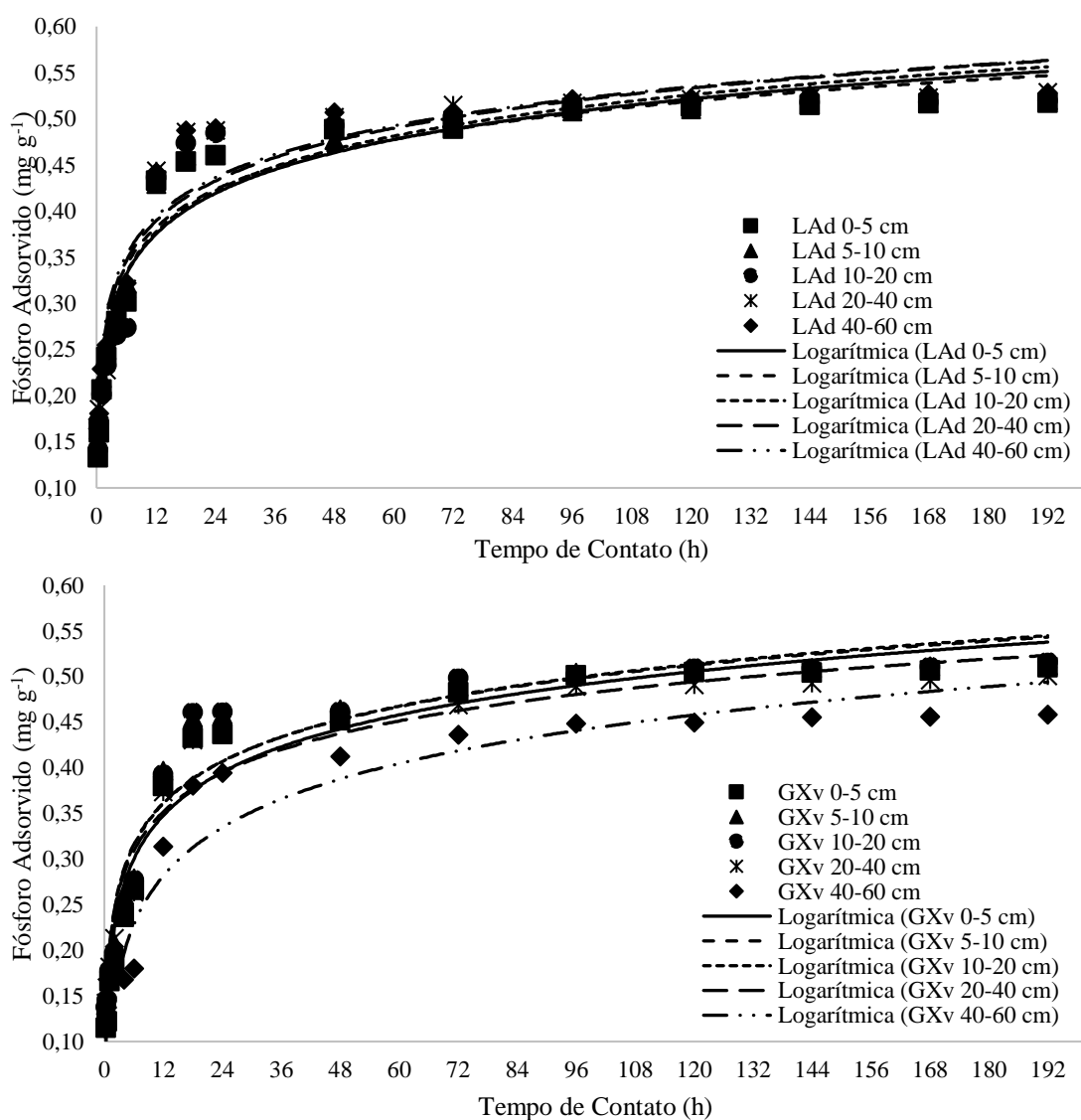
A equação proposta por Kue e Lotse (1974) de cinética de adsorção de fósforo descreveu os dados presentes na tabela 1. O uso desta equação para descrever a cinética foi igualmente eficaz nas avaliações de Santos et al. (2011) em solos da Paraíba. No Latossolo (LAd), a taxa de sorção ( $k$ ) obtida em ambas as profundidades variou de 0,059 a 0,064  $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$ , representando respectivamente as menores (5-10 cm) e as maiores (10-20 cm) taxas de sorção. No Gleissolo (GXv), as menores taxas de sorção foram observadas na profundidade de 20-40 cm (0,061  $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) e as maiores em 40-60 cm (0,076  $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ). A taxa  $k$  de cinética observada no solo Hidromórfico mais elevada em relação as demais reflete que apesar do ambiente reduzido ser propício a menor adsorção de P, é provável que a maior concentração de P disponível elevem as taxas (FARIAS et al., 2009).

Os valores de  $k$  propostos por Kue e Lotse (1974) observados neste trabalho são similares entre as profundidades e entre o solo Hidromórfico e não hidromórfico. Estes resultados foram igualmente obtidos por Santos et al. (2011) em um solo mal drenado (Neossolo Flúvico -RY) e um bem drenado (Latosolo Amarelo -LA), em que os valores de  $k$  foram iguais entre os dois solos, indicando que mesmo que a adsorção de P sejam menores nestes solos, a velocidade é ligeiramente modificada (Tabela 5; Figura 4).

**Tabela 5.** Equação linearizada de cinética de adsorção de Kue e Lotse (1974), coeficientes de determinação ( $R^2$ ), taxa de reação ( $k$ ) e coeficiente adimensional ( $1/n$ ) em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (A) e um Gleissolo Háplico Ta (GXv) (B) na Amazônia Central, Brasil.

Solo	Prof. cm	Equação Linearizada de Kue e Lotse (1974) $\text{mg g}^{-1}$ <sup>(1)</sup>	$R^2$	$k$ $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$	$1/n$
Latossolo Amarelo distrófico (LAd)	0-5	$\log x/m = 3,816 + 0,2171 \log t$	0,95**	0,063	0,21
	5-10	$\log x/m = 3,564 + 0,2348 \log t$	0,95**	0,059	0,23
	10-20	$\log x/m = 3,924 + 0,2169 \log t$	0,93**	0,064	0,21
	20-40	$\log x/m = 3,750 + 0,2339 \log t$	0,93**	0,062	0,23
	40-60	$\log x/m = 3,660 + 0,2425 \log t$	0,94**	0,061	0,24
Gleissolo Háplico Ta (GXv)	0-5	$\log x/m = 4,117 + 0,1773 \log t$	0,96**	0,068	0,17
	5-10	$\log x/m = 3,924 + 0,1992 \log t$	0,95**	0,065	0,19
	10-20	$\log x/m = 3,978 + 0,1960 \log t$	0,94**	0,066	0,19
	20-40	$\log x/m = 3,708 + 0,1984 \log t$	0,95**	0,061	0,19
	40-60	$\log x/m = 4,596 + 0,0912 \log t$	0,95**	0,076	0,09

<sup>(1)</sup>  $\log x/m = \log kC_0 + 1/n \log t$ ,  $x/m = P$  adsorvido em  $\text{mg g}^{-1}$ ,  $k$  é a taxa de adsorção de  $P$  ( $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ),  $1/n$  é uma constante adimensional,  $C_0$  é a concentração inicial de  $P$  ( $60 \text{ mg L}^{-1}$  ou  $0,60 \text{ mg g}^{-1}$ )



**Figura 4.** Cinética de adsorção de Kue e Lotse em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (A) e um Gleissolo Háplico Ta (GXv) (B) na Amazônia Central, Brasil.

Em alguns solos da América do Norte, Novais et al. (1977) obtiveram valores de k entre 0,02 e 0,04 mg g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Em seu trabalho no semiárido brasileiro, Santos et al. (2011) obteve valores de 0,03 mg g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> em ambos os solos (RY e LA), predizendo resultados iniciais obtidos por Singh et al. (1983), em que a velocidade de sorção de P em solos Amazônicos é mais elevada que em outras regiões do país, como o cerrado e a caatinga e outras regiões não tropicais do mundo. Em gerais, fatores como a baixa disponibilidade de P, acidez elevada, solos altamente intemperizados e ricos em óxidos com carga líquida positiva elevam a velocidade de sorção de P nos solos Amazônicos (SINGH et al., 1983; NOVAIS et al., 2007).

### 3.3. Fases I, II e III de Adsorção de Fosfato

Com as características adaptada da fórmula de Kue e Lotse (1974) de cinética de adsorção de P, observa-se que a adsorção de 30% do P ocorre em minutos no LAd (21,6 a 34,2 Minutos) e variando de minutos a horas no GXv (44,16 min<sup>-1</sup> a 3,22 h<sup>-1</sup>) (Tabela 6). De forma geral, no LAd o tempo de adsorção de P é mais elevado na superfície (< 20 cm) do que em subsuperfície (> 20 cm), sugerindo que as condições nesta última, como teores médios mais elevados de Argila Caulinítica (745,4 g kg<sup>-1</sup>), de Goethita (23,35 g kg<sup>-1</sup>), de hematita (12,20 g kg<sup>-1</sup>) e menores teores de Matéria Orgânica (5,5 g kg<sup>-1</sup>) promovam adsorção mais eficaz de P. Segundo Melo e Alleoni (2009), fatores combinados de alta exposição do P a cargas positivas dos óxidos do solos e baixa quantidade de M.O. promovem maior formação de complexos de esfera Interna (CEI), onde ligações estáveis covalentes são formadas rapidamente.

**Tabela 6.** Porcentagens de adsorção de fósforo em relação ao tempo de contato e a equação de cinética de de Kue e Lotse em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (A) e um Gleissolo Háplico Ta (GXv) (B) na Amazônia Central, Brasil.

		Porcentagem de Fósforo Adsorvido (%)									
Solo	Prof. cm	10	20	30	40	50	60	75	80	85	
		Tempo de Adsorção de Fósforo no Solo									
		Minutos			Horas			Dias			
Latossolo Amarelo distrófico (LAd)	0-5	5,10	13,20	33,6	1,44	3,70	9,47	1,62	2,60	4,17	
	5-10	3,18	08,71	24,0	1,10	3,01	8,24	1,52	2,58	4,28	
	10-20	5,28	13,81	34,2	1,44	3,63	9,20	1,55	2,47	3,92	
	20-40	3,72	9,72	25,8	1,11	2,88	7,53	1,32	2,14	3,45	
	40-60	3,06	8,10	21,6	1,01	2,57	6,87	1,25	2,05	3,34	
Média	< 20 cm	4,52	11,91	30,60	1,33	3,45	8,97	1,56	2,55	4,12	
	>20 cm	3,39	8,91	23,70	1,06	2,73	7,20	1,29	2,10	3,40	

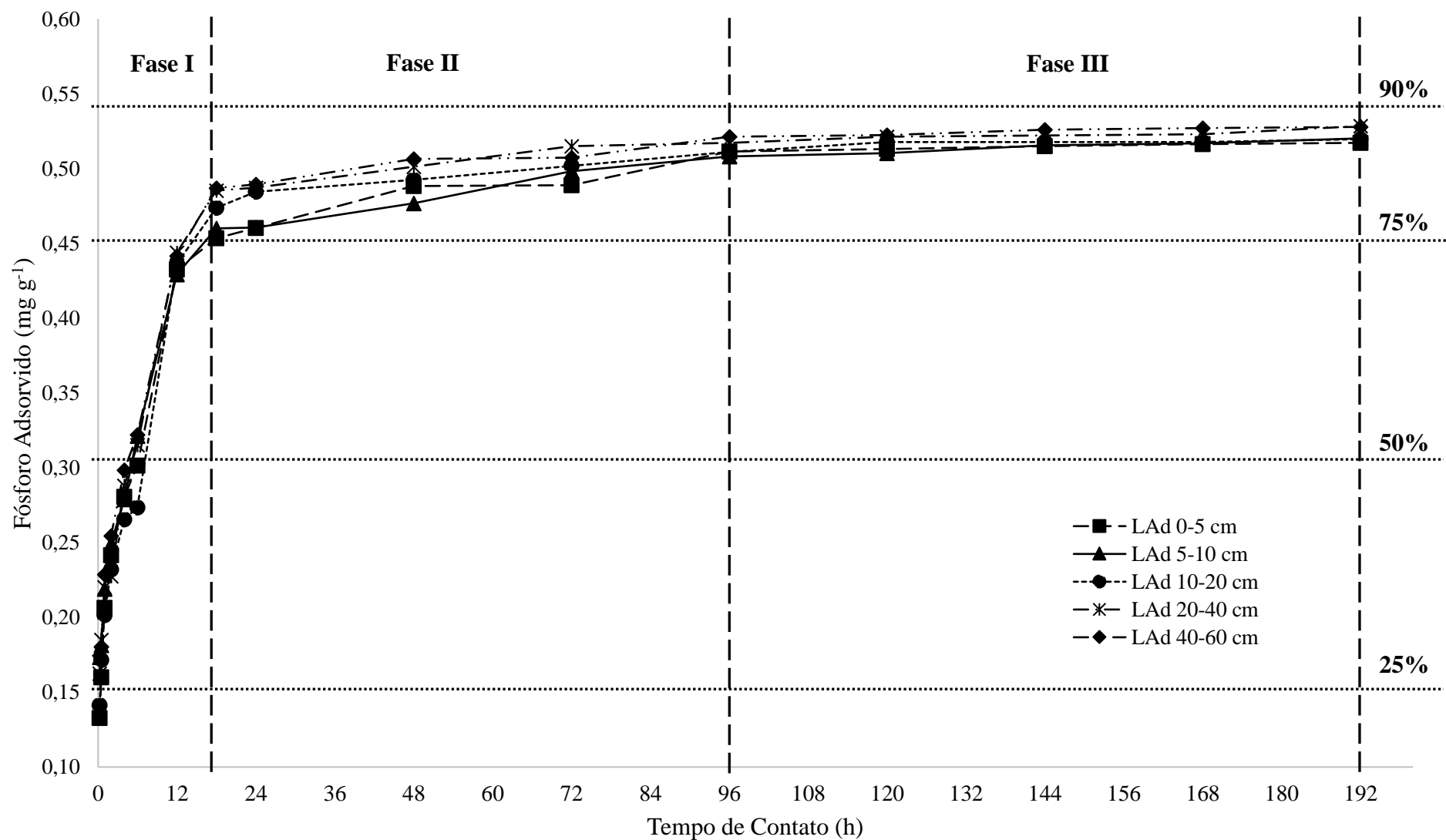
		Porcentagem de Fósforo Adsorvido									
Solo	Prof. cm	10%	20%	30%	40%	50%	60%	75%	80%	85%	
		Tempo de Adsorção de Fósforo no Solo									
		Minutos			Horas			Dias			
Gleissolo Háplico Ta (GXv)	0-5	10,74	25,86	62,46	2,51	6,08	14,69	2,29	3,57	5,55	
	5-10	7,26	17,88	44,76	1,86	4,67	11,69	1,92	3,05	4,82	
	10-20	7,74	19,08	47,16	1,92	4,82	11,87	1,92	3,02	4,75	
	20-40	6,42	16,92	44,58	1,96	5,18	13,67	2,44	2,44	6,45	
	40-60	39,84	87,72	193,26	7,08	15,61	34,48	4,67	4,68	10,30	
Média	< 20 cm	8,58	20,94	51,46	2,10	5,19	12,75	2,04	3,21	5,04	
	>20 cm	23,13	52,32	118,92	4,52	10,40	24,08	3,56	3,56	8,38	

No GXv, o efeito da cinética é invertido, uma vez que até o tempo de adsorção de P na subsuperfície (> 20 cm) é até 2,5x maior que em superfície (< 20 cm), o que não indica que necessariamente que a adsorção é menor e sim o tempo com que as reações químicas e complexas pelas perdas de P são até 2,5x mais lentas em subsuperfície que nas camadas superficiais. Ao estudar uma técnica redução artificial do potencial redox de solos de Minas Gerais, Fernandez et al. (2008) identificaram que não ocorre reversão do P adsorvido (P não-lábil > P-Lábil), no entanto pode reduzir o tempo com que a passagem do P-lábil > P- não-Lábil acontece. Esses autores ainda complementam que a redução natural de solos Hidromórficos, como os ocorrem na Amazônia (LIMA et al., 2006; GUIMARÃES et al., 2013), eleva a eficiência das adubações fosfatadas de curto a médio prazo e que inundações recorrentes pode propiciar a liberação contínua e lenta do P estável na estrutura dos minerais.

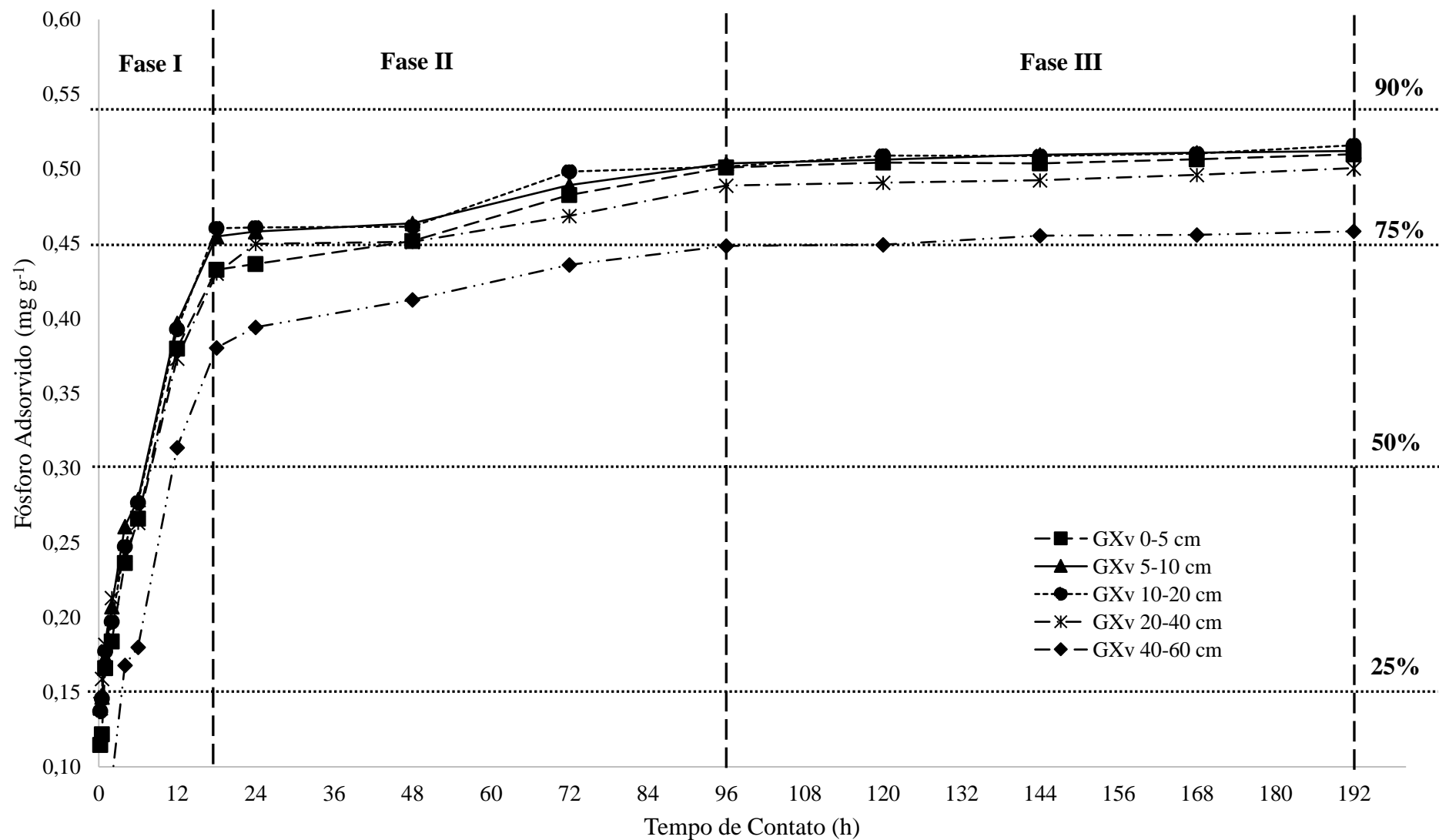
Em média, a adsorção de 50% do P na superfície do LAd requer 3,5 horas contra pouco mais de 5 horas no GXv. Em subsuperfície, o tempo de adsorção da mesma porcentagem no LAd requer algo em torno de duas horas e meio, enquanto no GXv, o tempo aumenta para mais de 10 horas. Este fenômeno implica dizer que em um solo bem drenado, como o Latossolo Amarelo, o tempo de adsorção do P adicionado nas primeiras camadas é 1,5 vezes menor que em um solo mal drenado, como o Gleissolo Háptico. Em subsuperfície, o tempo de adsorção de P chega a ser 5 vezes menor no GXv que no LAd (Tabela 6).

Estudando alguns solos da Paraíba, Santos et al. (2011) que em solos bem drenados, a adsorção de 50% do P adicionado ocorreu com 24 h, ao passo que em solos mal drenados, mesmo após 60 h de observação havia sido perdido apenas 16%, para uma concentração inicial de 60 mg L<sup>-1</sup> de P. Assim como sugerido pelos autores, é possível que o menor tempo de adsorção em solos Hidromórficos esteja relacionado aos menores teores médios de argila (505,5 g kg<sup>-1</sup>) e menor CMAP (0,867 mg g<sup>-1</sup>) no GXv. Na Amazônia central, Singh et al. (1983) identificaram que os solos de floresta são capazes de adsorver 85% do P em apenas dos dias. Neste trabalho, identificou-se que a mesma porcentagem foi adsorvida em 4,12 e 5,04 dias e 3,40 e 8,38 dias, respectivamente na superfície (< 20 cm) e subsuperfície (>20 cm) no LAd e GXv. Este comportamento indica a variabilidade de condições dos solos amazônicos que influencia no complexo de adsorção de P.

Gonçalves et al. (1985) encontraram adsorção de 75% do P em apenas 12 horas, de 2 a 3 vezes menor que os encontrados neste trabalho. De forma geral, os menores tempos de sorção de P aliados a maiores quantidades adsorvidas em solos de outras regiões do Brasil tem relação com as maiores quantidades de óxidos no solo, principalmente Hematita, que são extremamente eficazes na adsorção de P (ALMEIDA et al., 2003; SANTOS et al. 2011). É provável que os menores valores de CMAP, geralmente menores de 1,00 mg por g<sup>-1</sup> e já evidenciados em solos Amazônicos por Singh et al. (1983), Tucci (1991), Curi et al. (1988), Lima (2001), Falcão e Silva (2004) e Barbosa (2017), contribuam igualmente com reações menos intensas do P com o solo e que um fator esteja intrínseco a outro.



**Figura 5.** Fases da Cinética de Adsorção de P em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) da Amazônia Central em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm). \* Fase I (Rápida), Fase II (Intermediária), Fase III (Lenta)



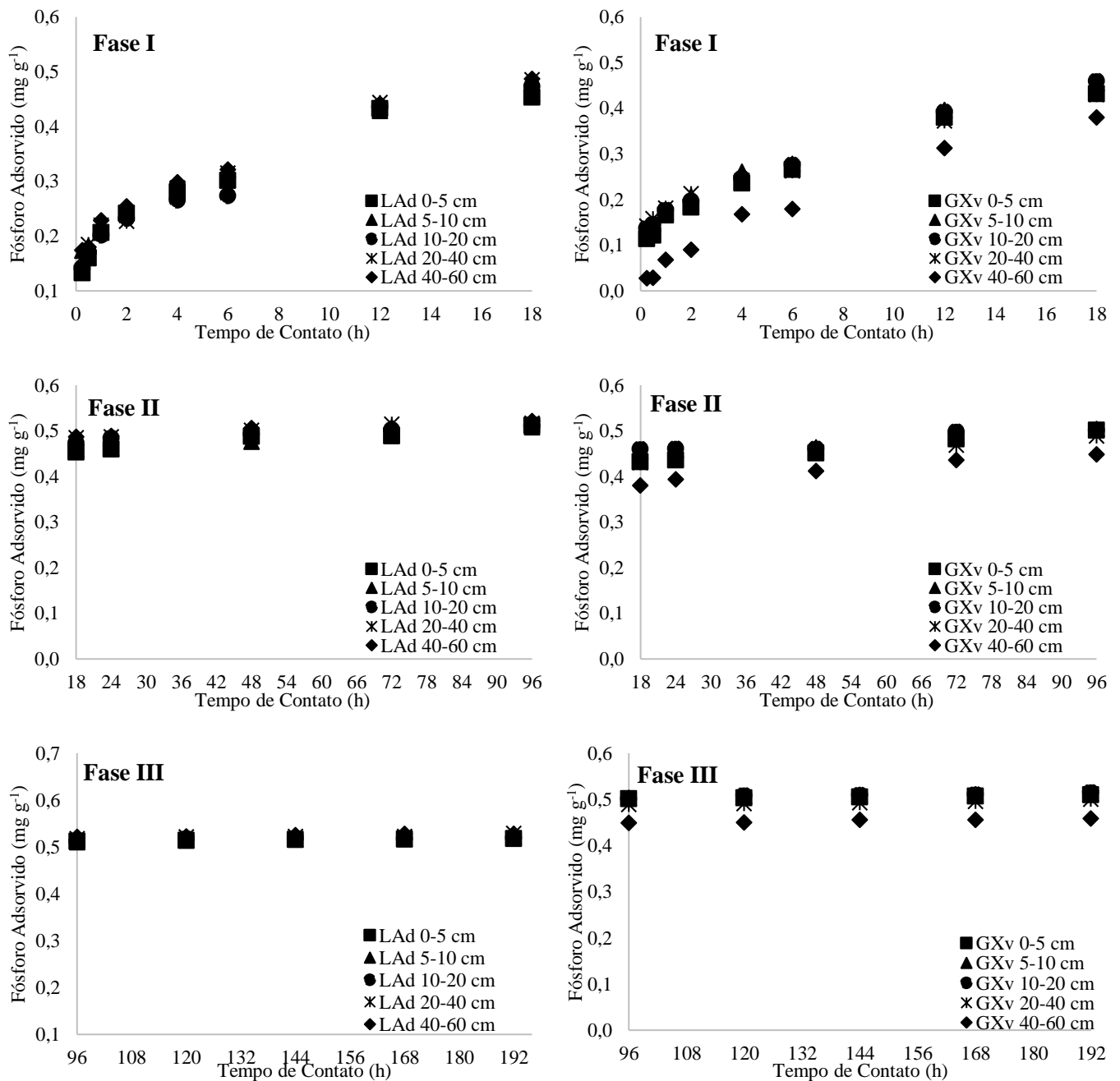
**Figura 6.** Fases da Cinética de Adsorção de P em um Gleissolo Háplico Ta (GXv) da Amazônia Central em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm). \* Fase I (Rápida), Fase II (Intermediária), Fase III (Lenta)

**Tabela 7.** Fases da Cinética de Adsorção de P baseada na equação linearizada de Weber e Morris (1963), coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), taxa de adsorção (a) e concentração inicial de P (Ci) em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (A) e um Gleissolo Háplico Ta (GXv) (B) na Amazônia Central, Brasil.

<b>Latossolo Amarelo distrófico (LAd)</b>					
Fases	Prof.	Equação cinética de Weber e Morris (1963) <sup>(1)</sup>	R <sup>2</sup>	Taxa de Sorção (a)	(Ci)
Horas	cm	P Adsorvido (mg g <sup>-1</sup> ): a*t + Ci		mg Kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	mg g <sup>-1</sup>
Fase I (0-18)	0-5	y = 0,0175t + 0,1804	0.90**	1,75	0,18
	5-10	y = 0,0164t + 0,1997	0.93**	1,64	0,19
	10-20	y = 0,0183t + 0,1741	0.94**	1,83	0,17
	20-40	y = 0,0181t + 0,1919	0.95**	1,81	0,19
	40-60	y = 0,0175t + 0,2027	0.94**	1,75	0,20
Média	< 20	-----	----	1,74	0,18
	> 20	-----	----	1,78	0,19
Fase II (18-96)	0-5	y = 0,0007t + 0,4447	0.93**	0,07	0,44
	5-10	y = 0,0007t + 0,4466	0.98**	0,07	0,44
	10-20	y = 0,0004t + 0,4702	0.95**	0,04	0,47
	20-40	y = 0,0004t + 0,4783	0.95**	0,04	0,47
	40-60	y = 0,0004t + 0,4807	0.93**	0,04	0,48
Média	< 20	-----	----	0,06	0,45
	> 20	-----	----	0,04	0,47
Fase III (96-192)	0-5	y = 0,00006t + 0,5058	0.96**	0,006	0,50
	5-10	y = 0,0001t + 0,4958	0.97**	0,010	0,49
	10-20	y = 0,00007t + 0,5067	0.91**	0,007	0,50
	20-40	y = 0,0001t + 0,5080	0.92**	0,010	0,50
	40-60	y = 0,00007t + 0,5143	0.93**	0,007	0,51
Média	< 20	-----	----	0,007	0,49
	> 20	-----	----	0,008	0,50
<b>Gleissolo Háplico Ta (GXv)</b>					
Fases	Prof.	Equação cinética de Weber e Morris (1963) <sup>(1)</sup>	R <sup>2</sup>	Taxa de Sorção	Ci
Horas	cm	P Adsorvido (mg g <sup>-1</sup> ): A.t + C		mg Kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	mg g <sup>-1</sup>
Fase I (0-18)	0-5	y = 0,0179t + 0,1399	0.95**	1,79	0,13
	5-10	y = 0,0178t + 0,1598	0.96**	1,78	0,15
	10-20	y = 0,0182t + 0,1549	0.97**	1,82	0,15
	20-40	y = 0,0158t + 0,1639	0.97**	1,58	0,16
	40-60	y = 0,0201t + 0,0471	0.96**	2,01	0,04
Média	< 20	-----	----	1,79	0,13
	> 20	-----	----	1,79	0,10
Fase II (18-96)	0-5	y = 0,0009t + 0,4142	0.95**	0,09	0,41
	5-10	y = 0,0006t + 0,4408	0.95**	0,06	0,44
	10-20	y = 0,0006t + 0,4455	0.91**	0,06	0,44
	20-40	y = 0,0006t + 0,4244	0.91**	0,06	0,42
	40-60	y = 0,0009t + 0,3704	0.97**	0,09	0,37
Média	< 20	-----	----	0,07	0,43
	> 20	-----	----	0,07	0,40
Fase III (96-192)	0-5	y = 0,00005t + 0,4934	0.90**	0,005	0,49
	5-10	y = 0,00009t + 0,4959	0.95**	0,009	0,49
	10-20	y = 0,0001t + 0,4913	0.91**	0,010	0,49
	20-40	y = 0,0001t + 0,4765	0.95**	0,010	0,47
	40-60	y = 0,0001t + 0,4377	0.91**	0,010	0,43
Média	< 20	-----	----	0,008	0,49
	> 20	-----	----	0,010	0,45

<sup>(1)</sup> P Adsorvido (mg g<sup>-1</sup>): a\*t + Ci, a: taxa de sorção (mg g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), t: Tempo (horas), Ci: concentração inicial (mg g<sup>-1</sup>) (\*\*) significativo a 1 % (p < 0,01); (\*) significativo a 5% (< 0,05); (ns) não significativo pelo Teste t de probabilidade.

Três fases (I, II e III) foram identificadas na cinética de adsorção de P em ambos os solos (Figura 5 e 6). A Fase I ou fase rápida foi identificada entre 0 e 18 horas de contato do P com o solo, a fase II ou intermediária entre 18-96 horas e a fase III ou de estabilização entre 96 e 192 horas. Essas fases foram igualmente identificadas nos trabalhos de Parfit (1978), Barrow 1985 e Novais et al. (2007). Apesar da equação de Kue e Lotse (1974) ser suficiente para descrever todo o processo de cinética de sorção de P (Santos et al., 2011), cada fase de sorção possuem coeficientes de velocidade e concentrações iniciais específicas e distintas que podem ser observadas nas equações linearizadas ( $P$  Adsorvido ( $\text{mg g}^{-1}$ ):  $a \cdot t + C_i$ ) tanto no Latossolo Amarelo (LAd) quanto no Gleissolo Háplico (GXv) na tabela 5



**Figura 7.** Fases I, II e II da Cinética de adsorção de Weber e Morris em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) em um Latossolo Amarelo distrófico (LAd) (A) e um Gleissolo Háplico Ta (GXv) (B) na Amazônia Central, Brasil.



Em média, a taxa de sorção de P observada na fase I em ambos os solos (LAd e GXv) é similar, em torno de  $1,7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , entretanto as taxas são ligeiramente menores no LAd (Tabela 7; Figura 7). Se caso esta taxa se mantivesse linear, todo o P adicionado inicialmente ( $60 \text{ mg L}^{-1}$ ) seria alcançado em 34,5 e 33,6 horas em superfície ( $< 20 \text{ cm}$ ) e em 33,8 e 33,6 horas em subsuperfície ( $> 20 \text{ cm}$ ), respectivamente no LAd e GXv. As elevadas taxas iniciais de adsorção de P até 18 horas podem ser explicadas por multifatores, como baixos teores de matéria orgânica (ALMEIDA et al., 2003), altos teores de  $\text{Al}^{3+}$  em solução, principalmente no GXv (HAYNES, 1984) e a diminuição relativa do pH, que elava o ponto de carga zero – PCZ, elevando as superfícies positivamente carregadas (NOVAIS et al., 2007).

Segundo Barrow (1985) e Novais et al. (2007), a adsorção inicial é conhecida como fase “rápida” porque não depende de reações altamente complexas e sim por simples atração eletrostática entre cargas opostamente carregadas, onde a molécula fosfatada, prioritariamente a bivalente ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ ), adere-se a superfícies positivas das argilas, óxi-hidroxidos e matéria orgânica. A disparidade da taxa de sorção observada na profundidade 40-60 cm do GXv ( $> 2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) pode ser explicada pela maior disponibilidade de P em solução devido a menor CMAP ( $0,867 \text{ mg g}^{-1}$ ) e segundo Santos et al. (2011), a taxa aumente proporcionalmente ao P disponível nos pontos de troca.

Comparando as taxas de sorção entre as fases I e II, observa-se que entre 18 e 96 horas o LAd adsorveu 29 e 44,5 vezes menos P na fase II que na fase I, respectivamente na superfície ( $< 20 \text{ cm}$ ) e na subsuperfície ( $> 20 \text{ cm}$ ) (Tabela 7; Figura 7). No GXv, a taxa de sorção na fase II é 25,5 vezes menor que na fase I tanto em superfície como em subsuperfície. De forma geral, a taxa de sorção proporcionalmente menor na fase II em ambos os solos indica a alta eficiência de ocupação dos sítios disponíveis de ligação e da precipitação do P com o  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  na fase I. De acordo com Parfit et al. (1975), a fase II coincide com o início da troca de ligantes presentes na superfície dos óxidos ( $\text{OH}^-$  e  $\text{OH}_2^+$ ), os quais são substituídos pelas moléculas fosfatadas, tornando-os estáveis.

Com o passar do tempo, o “envelhecimento” das ligações de P com o solo tende a se tornar mais irreversível, partindo de monodentada (um  $\text{O}^-$  ligado a um átomo de metal de Fe ou Al), passando por bidentada (dois  $\text{O}^-$  ligados a um metal de Fe e Al) e alcançando a binucleada (dois  $\text{O}^-$  ligados a dois átomos de metal de Fe e Al) (NOVAIS et al., 2007; MEURER, 2010). A estabilização do processo de sorção de P (Fase III) nos solos estudados podem ser observadas após 96 h de contato do P com o solo e apesar das avaliações chegarem a apenas 192 horas (oitos dias), a fase III é indefinida e possivelmente não atinge 100 % dos sítios de adsorção ocupados com P.

Em geral, no LAd, as taxas de adsorção de P na fase III são de 5 a 8 vezes mais lentas que a fase II e entre 222 e 248 vezes mais lenta que na fase I, respectivamente na subsuperfície ( $> 20 \text{ cm}$ ) e na superfície ( $< 20 \text{ cm}$ ). No GXv, as taxas de adsorção de P são de 7 a 8 vezes mais lentas na fase III que na fase II e entre 179 e 223 vezes mais lenta que na fase I. A fase III é extramentente lenta, possivelmente pelos seguintes motivos: sítios de sorção saturado com P e lenta passagem ainda recorrentes na fase II (Monodentada  $>$  bidentada  $>$  binucleada) (NOVAIS et al., 2007).

#### 4. CONCLUSÕES

1. Os coeficientes da equação de Kue e Lotse (1974) são suficientes para descrever a taxa de sorção de P nos solos. A cinética de adsorção é similar entre os solos, sendo que a velocidade de sorção de P apenas é influenciada pela presença do hidromorfismo no Gleissolo Háptico

2. Cerca de 80% do fósforo é adsorvido em 2,5 e 2,1 dias no Latossolo Amarelo e em 3,2 e 3,5 dias no Gleissolo Háptico, respectivamente em superfície (< 20 cm) e em subsuperfície (> 20 cm).

3. Três fases de cinética de adsorção foram identificadas (fase I, II e III). A fase I (rápida) ocorre entre 0-18 horas, a fase II (intermediária) entre 18-96 horas e a fase III (lenta) entre 96-192 horas em diante.

4. No Latossolo Amarelo, a fase I de adsorção é 35,2 vezes mais rápida que a fase II e 238,6 mais rápida que a fase III. No Gleissolo Háptico, a fase I de adsorção é 25,5 vezes mais rápida que a fase II e 198,8 vezes mais rápida que a fase III.

## 5. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas de fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p.985-1002, 2003.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 27-32, 2000.
- 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. Effect of previous additions of phosphate on phosphate adsorption by soils. **Soil Science**, v. 118, p. 82-89, 1974.
- BARROW, N. J. Reactions of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 183-230, 1985.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, v. 21, p. 73-85, 1974.
- CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; MENDES, J. S. Adsorção de fósforo em materiais de Latossolo e Argissolo. **Revista Caatinga**, v. 20, p. 104-111, 2007.
- CHEUNG, K. C.; VENKITACHALAM, T. H. Kinetic studies on phosphorus sorption by selected soil amendments for septic tank effluent renovation. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 28, p. 121-131, 2006.
- COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. (eds), Curitiba, 2010, 282p.
- CRAVO, M. S.; SMYTH, T. J.; BRASIL, E. C. Calagem em Latossolo amarelo distrófico da Amazônia e sua influência em atributos químicos do solo e na produtividade de culturas anuais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 895-907, 2012.
- CURI, N., CAMARGO, O. A., GUEDES, G. A. A., SILVEIRA, J. V. **Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil Sudeste e Sul**. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3, 1988, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: EMBRAPA/SNCLS-SBCS, p.267-282, 1988.
- DAMACENO, J. B. D.; LOBATO, A. C. N.; GAMA, R. T.; OLIVEIRA, D. M.; FALCÃO, N. P. S. Biochar as Phosphorus Conditioner in Substrate for Brazil Nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.) Seedling Production in the Central Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 383-393, 2019.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SA 20- Manaus**. Volume 17. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro: MME/DNPM, 1978, 554p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2017, 573p.
- 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.

- FARIAS, D.R.; OLIVEIRA, F.H.T.; SANTOS, D.; ARRUDA, J.A.; HOFFMANN, R.B.; NOVAIS, R.F. Fósforo em solos representativos do Estado da Paraíba. I. Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 623-632, 2009.
- FARIAS, S. C. C.; SILVA, M. L.; RUIVO, M. L. P.; RODRIGUES, P. G.; MELO, V. S.; COSTA, A. R.; SOUZA, J. C. Phosphorus Forms in Ultisol Submitted to Burning and Trituration of Vegetation in Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-12, 2016.
- FERNÁNDEZ, I.E.; NOVAIS, R.F.; NUNES, F.N.; KER, J.C. Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química: II., extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2307-2317, 2008.
- 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**, v. 9, p. 107-111, 1985.
- GUAN, X.; CHEN, G.; SHANG, C. Adsorption behaviour of condensed phosphate on aluminium hydroxide. **Journal of Environmental Sciences**, v. 19, p. 312-318, 2007.
- GUIMARÃES, S. T.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; NEVES, A. F.; SILVA, F. W. R.; MACEDO, R. S.; SOUZA, K. W. Caracterização e Classificação de gleissolos da Várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 317-326, 2013.
- KARACA, S.; GURSES, A.; EJDER, M.; AÇIKYILDIZ, M. Kinetic modelling of liquid-phase adsorption of phosphate on dolomite. **Journal of Colloid Interface Science**, v. 277, p. 257-263, 2004.
- KUE, S.; LOTSE, E.G. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by hematite and gibbsite. **Soil Science**, v. 116, p. 400- 406, 1974.
- 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.
- LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J.C.; LIMA, A.M.N. Mineralogia e química de três solos de uma toposeqüência da Bacia Sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p.59-68, 2006.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. **Iron. oxide removal from soil and clays by dithionite - citrate system buffered with sodium bicarbonate**. Clays and clay minerals: proceedings of the Seventh National Conference, p. 317-327, 1960.
- MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.2 nd, p.381-447, 2009.
- MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 4da ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010, 280p.
- NOVAIS, R. F. **Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soils**. Thesis (Doctor degree in soil Science). North Carolina State University, Raleigh. 1977, 153p.
- 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. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.471-537, 2007.
- OLIVEIRA, D. M.; DAMACENO, J. B. D.; LOBATO, A. C. N.; GUIMARÃES, R. S.; JÚNIOR, J. L.; GUERRINI, I. A.; FALCÃO, N. P. S. Biochar of Bamboo Influencing the Availability of P From

Different Phosphate Sources in Dystrophic Yellow Oxisol of Amazon. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 242-251, 2019.

PARFITT, R.L.; ATKINSON, R.J.; SMART, R.C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. **Soil Science Society American Journal**, v. 39, p. 837-841, 1975.

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

SAEG. **Sistema para análises estatísticas**, versão 9.1. Viçosa: UFV, 2007.

SANTOS, C. H.; OLIVEIRA, F. H. T.; SALCEDO, I. H.; SOUZA, A. P.; SILVA, V. D. M. Kinetics of phosphorus sorption in soil in the state of Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1301-1310, 2011.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, R. D. dos; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7ª ed. revista e ampliada. Viçosa: SBCS, 2015, 102p.

SCHAEFER, C. E. G. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; VALE JUNIOR, J. F.; SOUZA, K. W.; CORREIRA, G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; AMARAL, E. F.; CAMPOS, M. C. C.; RUIVO, M. L. **Solos da Amazônia**. In: CURTI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds). *Pedologia – Solos dos Biomas Brasileiros*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo., p. 111-176, 2017.

SCHWERTMANN, U. The differentiation of iron oxide in soil by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde**, v.105, p.104-201, 1964.

SINGH, R.; MOLLER, M.R.F.; FERREIRA, W.A. Cinética de sorção de fósforo em solos dos trópicos úmidos da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 227-231, 1983.

SZARA, E.; SOSULSKI, T.; SZYMAŃSKA, M. Impact of long-term liming on sandy soil phosphorus sorption properties. **Soil Science Annual**, v. 70, p. 13-20, 2019.

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.

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.

WEBER, W. J.; MORRIS, J. C. Kinetics of adsorption on carbon from solutions. **Journal of Sanitary Engineering**, v. 89, p. 31-60, 1963.

ZHANG, L.; LOAICIGA, H.; XU, M.; DU, Y. Kinetics and Mechanisms of Phosphorus Adsorption in Soils from Diverse Ecological Zones in the Source Area of a Drinking-Water Reservoir. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 12, p. 14312- 14326, 2015.

## ANEXO I- TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA - ANOVA

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância do Fósforo Remanescente (P-Rem), Fósforo Disponível (P-Disp), Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), Energia de Adsorção de Fósforo (EAP) e Fator Capacidade Máxima de Fósforo (FCP) em solos distintos (Gleissolo Háptico e Latossolo Amarelo) e em cinco profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm) na Amazônia Central

----- Quadrados Médios -----						
<i>F.V.</i>	<i>G.L</i>	<i>P-Rem</i>	<i>P-Disp</i>	<i>CMAP</i>	<i>EAP</i>	<i>FCP</i>
Solos	1	106,7**	0,052ns	0,002ns	0,02*	26448,32
Profundidades	4	9,33**	0,12ns	0,024*	0,0002*	259,44
Interações	4	18,85**	0,027ns	0,069**	0,0002 ns	996,33
Resíduo	20	1,54	0,178	0,005	0,0001	117,15
Total	29	-----	-----	-----	-----	-----
C.V (%)	---	32,23	14,61	1,61	0,02	4,98

ns - não significativo \*\* e \* Significativo a 1% e 5% pelo teste de Tukey. F.V. – Fator de Variação

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância da Cinética de Adsorção de 0,25 a 12,00 horas de tempo de equilíbrio em solos distintos (Gleissolo Háptico e Latossolo Amarelo) e em cinco profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm) na Amazônia Central

----- Quadrados Médios -----								
<i>F.V.</i>	<i>G.L</i>	<i>0,25h</i>	<i>0,50h</i>	<i>1,00h</i>	<i>2,00h</i>	<i>4,00h</i>	<i>6,00h</i>	<i>12,00h</i>
Solos	1	0,003**	0,008**	0,013**	0,013**	0,007**	0,008*	0,032**
Profundidades	4	0,002**	0,005**	0,003*	0,003ns	0,002ns	0,002ns	0,001*
Interações	4	0,009*	0,009**	0,008**	0,009**	0,008**	0,008*	0,002**
Resíduo	20	0,0008	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0009	0,0001
Total	29	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
C.V (%)	---	1,53	1,33	1,57	0,90	0,43	0,40	0,27

ns - não significativo \*\* e \* Significativo a 1% e 5% pelo teste de Tukey. F.V. – Fator de Variação

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância da Cinética de Adsorção de 24,00 a 192,00 horas de tempo de equilíbrio em solos distintos (Gleissolo Háptico e Latossolo Amarelo) e em cinco profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm) na Amazônia Central

----- Quadrados Médios -----								
<i>F.V.</i>	<i>G.L</i>	<i>24,00 h</i>	<i>48,00 h</i>	<i>72,00h</i>	<i>96,00 h</i>	<i>120,00 h</i>	<i>144,00h</i>	<i>192,00 h</i>
Solos	1	0,017**	0,017**	0,004**	0,004**	0,003**	0,005**	0,004**
Profundidades	4	0,001**	0,001**	0,0006**	0,0004**	0,0004**	0,0006**	0,0008**
Interações	4	0,002**	0,002**	0,0015**	0,0014**	0,001**	0,001**	0,001**
Resíduo	20	0,0001	0,0001	0,001	0,0003	0,0003	0,0005	0,0001
Total	29	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
C.V (%)	---	0,02	0,02	0,03	0,08	0,08	0,001	0,001

ns - não significativo \*\* e \* Significativo a 1% e 5% pelo teste de Tukey. F.V. – Fator de Variação