

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

JANYELLE DE OLIVEIRA LEMOS

**DINÂMICA DE FÓSFORO EM SOLOS DE DIFERENTES
MINERALOGIAS: FRACIONAMENTO, FONTES E MODOS DE
APLICAÇÃO PARA CRESCIMENTO DE *Brachiaria decumbens***

RECIFE-PE

2019

Janyelle de Oliveira Lemos

Engenheira agrônoma

Dinâmica de fósforo em solos de diferentes mineralogias: fracionamento, fontes e modos de aplicação para crescimento de *Brachiaria decumbens*

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo.

Orientador:

Prof. Dr. Fernando José Freire

Coorientadores:

Prof. Dr. Valdomiro Severino de Souza Júnior

Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

RECIFE-PE

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

L556d Lemos, Janyelle de Oliveira.
Dinâmica de fósforo em solos de diferentes mineralogias: fracionamento, fontes e modos de aplicação para crescimento de *Brachiaria decumbens* / Janyelle de Oliveira Lemos. – Recife, 2019.
76 f.: il.

Orientador(a): Fernando José Freire.

Coorientador(a): Valdomiro Severino de Souza Júnior, Emídio Cantídio Almeida de Oliveira.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2019.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Fixação de P 2. Compartimentalização de P 3. Manejo de adubação fosfatada
I. Freire, Fernando José, orient. II. Souza Júnior, Valdomiro Severino de, coorient. III. Oliveira, Emídio Cantídio Almeida de, coorient. III. Título

CDD 631.4

JANYELLE DE OLIVEIRA LEMOS

Dinâmica de fósforo em solos de diferentes mineralogias: fracionamento, fontes e modos de aplicação para crescimento de *Brachiaria decumbens*

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo

Aprovada em 28 de Fevereiro de 2019

Prof. Dr. Fernando José Freire
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Dra. Hemmannuella Costa Santos
Instituto Federal de Pernambuco

Dra. Daniela Batista da Costa
Escola Cidadã Integral Agropecuária Dr Trajano Nóbrega

Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos
Universidade Federal Rural de Pernambuco

A Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de realizar mais um sonho

Toda honra e toda glória é para ti, Senhor.

Aos meus pais, Josimar Inácio de Oliveira e Iêda Maria Alves de Lemos, por todo amor, apoio e dedicação.

Ao meu esposo, José Ribeiro Soares Filho, pela dedicação, paciência e companheirismo.

Aos meus irmãos, Roberth Thayron, Jayrla Lemos e Josimara Lemos, pelo amor fraterno e companheirismo de sempre.

Aos meus sobrinhos, Davi Lucas e Sophia, pela felicidade de tê-los em minha vida e pela alegria que me proporcionam diariamente.

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS/UFRPE) pela qualidade de ensino e pelo apoio durante a realização do curso.

À CAPES pela concessão da bolsa durante o curso de doutorado.

Ao meu orientador, Fernando José Freire, pelos ensinamentos, dedicação, confiança e pelo exemplo de profissional dedicado e competente, transmitido durante o tempo de convívio.

Aos professores Valdomiro Severino de Sousa Júnior e Emídio Cantídio Almeida de Oliveira, pela co-orientação, ensinamentos e auxílio no desenvolvimento do trabalho.

À professora Maria Betânia Freire por todo apoio, paciência, atenção e cooperação na pesquisa.

Aos técnicos do laboratório, Pedro Lucena e Simone Lins, pela competência e pela valiosa ajuda na realização das análises.

Aos professores Clístenes Nascimento, Caroline Biondi, Giselle Fracetto, Felipe Fracetto, Brivaldo Almeida e Edivan Rodrigues pelos ensinamentos, os quais contribuíram para minha formação profissional.

Aos estagiários, Bruno Santana, Jéssica Dionísio, Evelyn Victória, Clara Maria, Thalyta Brito, Rewisson Alves, Thiago Alves, Rodrigo Francisco, e Lucca Mossio pela contribuição diária na realização das análises laboratoriais.

Às amigas, Aglair Alves, Adriana Alves, Greiele Cavalcante, Clarissa Freire, Rayanna Jacques, Stephany Brilhante, Suellen Vasconcelos, Juliet Emília e Natália Sobral, por todo apoio durante essa trajetória e pelos momentos de descontração.

Aos pós-doutorandos Danúbia Lima, Flávio Rodrigues e Hidelbaldi Melo pelo convívio diário, auxílio no trabalho e troca de experiências.

Aos funcionários Socorro Santana, José Fernando (Zeca) e Josué (*in memoriam*) pelo profissionalismo e atenção dada durante o curso.

MUITO OBRIGADA!

Dinâmica de fósforo em solos de diferentes mineralogias: fracionamento, fontes e modos de aplicação para crescimento de *Brachiaria decumbens*

RESUMO

O P apesar de ser menos requerido pelas plantas que o N e o K, é o mais utilizado nas adubações dos solos das regiões tropicais. Isso se deve, principalmente, à interação do P com os óxidos de Fe e Al nessas regiões. Particularmente no Nordeste, os teores destes minerais nos solos são baixos, quando comparados com outras regiões tropicais do Brasil, como a dos solos do Centro-oeste, o que pode estar resultando em menor fixação de P no solo. Assim, o estudo da dinâmica do P na região Nordeste com solos com diferentes mineralogias torna-se relevante, porque o manejo da aplicação do P poderá ser diferenciado, possibilitando melhor aproveitamento de P pela planta. Diante disso, este trabalho tem por objetivo estudar a dinâmica do P em solos mineralogicamente distintos e avaliar a eficiência agrônômica em cultivo de *Brachiaria decumbens* sob diferentes fontes e modos de aplicação de P. As amostras de solo foram analisadas física, química e mineralogicamente. O estudo foi realizado em três experimentos em casa-de-vegetação. No primeiro, foi avaliada a compartimentalização de P em função do tempo de incubação do P. Esse experimento constou de 21 tratamentos: sete solos e três tempos de incubação (1, 20 e 40 dias). Nesse ensaio incubou-se as camadas 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade, sendo posteriormente realizado o fracionamento de P. No segundo experimento foi avaliada a compartimentalização de P com e sem calagem. Nesse ensaio, utilizou-se apenas três solos que precisavam de calagem. O experimento constou de três solos, com e sem calagem e quatro tempos de incubação de P (3 x 2 x 4), com quatro repetições. Nesse ensaio incubou-se as camadas 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade. No terceiro experimento foi analisada a compartimentalização de P sob cultivo de *Brachiaria decumbens*. O experimento consistiu de três dos solos utilizados no primeiro ensaio (LATOSSOLO AMARELO eutrófico - LAe, LATOSSOLO AMARELO distrófico - LAd₂ e LATOSSOLO VERMELHO - LV). A escolha desses solos foi realizada de acordo com a capacidade de fixação de P, sendo assim, escolheu-se o solo de maior (LAd₂) e o de menor (LAe) capacidade de fixação de P dentre os solos do Nordeste, e para efeito de comparação utilizou-se o LV do Centro-Oeste. O aumento do tempo de incubação modificou a compartimentalização de P, e o P-H₂O se distribuiu entre as outras frações de P, como P-Al (LV e LAd₂) e P-Ca (Vertissolos: VX₁ e VX₂). A migração para P-Fe foi pequena e se concentrou mais nos solos LV e LAd₂. A migração para o compartimento P-Al foi rápida, para o P-Ca foi moderada e para o P-Fe parece ser mais lenta. Constatou-se que a calagem promoveu o deslocamento do P-Al, P-Fe e P-Ca, principalmente no LAd₂, evidenciando que a calagem favoreceu a disponibilidade de P. De modo geral, a maior produção de massa seca foi obtida quando o P foi aplicado em área total, independentemente da solubilidade do fertilizante, já em relação ao conteúdo dos nutrientes, o superfosfato triplo apresentou melhor resultado para esse modo de adubação, em comparação ao fosfato natural. Em geral, os solos do Nordeste apresentaram baixa capacidade de fixação de P. Nos solos que apresentaram menor fixação de P recomenda-se a aplicação de fertilizante fosfatado em área total, independente da solubilidade do fertilizante. A adubação fosfatada em área total promoveu maior produção de biomassa comparado com a adubação localizada.

Palavras-chave: Fixação de P. Compartimentalização de P. Manejo de adubação fosfatada.

Phosphorus dynamics in soils with different mineralogies: fractionation, sources and application methods on *Brachiaria decumbens* growth

ABSTRACT

Phosphorus is the most used element in soil fertilization from tropical regions, despite of its less requirement by plants, when compared to N and K. That is primarily due to P interaction with Fe and Al oxides. These minerals contents in Northeast soils are low compared to others tropical regions in Brazil, such as Centre-West and may result in less P fixation. Therefore, researches about P dynamics in soils with different mineralogies in Northeast of Brazil are important because these soils may allow the use of more adequate P application methods, resulting in more efficient use of the nutrient by plants. Thus, this work aimed to study P dynamics in mineralogically different soils and to evaluate agronomic efficiency in *Brachiaria decumbens* growing under different P sources and application methods. Soil samples were first analyzed physical, chemical and mineralogically. This study was composed of three experiments in a greenhouse. In the first one, P compartmentalization was evaluated in function of P incubation time. It contained 21 treatments: seven soils and three incubation time (1, 20 and 40 days). In this experimental trial, 0-20 cm and 20-40 cm depth layers were incubated and followed by P fractionation. In the second experiment, P compartmentalization was evaluated in three soils with and without analyzed in four P incubation time (3 x 2 x 4), with four replicants. Only soils that needed liming were used. Layers from 0-20 cm and 20-40 cm depth were then incubated. In the third experiment, P compartmentalization was analyzed under *Brachiaria decumbens* growth. It was composed by three soils used in the first experimental trial (eutrophic Yellow Oxisol – LAe, dystrophic Yellow Oxisol – LAd₂ e Red Oxisol - LV). These soils were chosen according to their P fixation capacity, in which LAd₂ has the greater P fixation capacity, while LAe has the lesser among all soils from Northeast. LV from Centre-West was also used as a comparative element. The increase in incubation time changed P compartmentalization and P-H₂O was distributed between the others P fraction as P-Al (LV and LAd₂) and P-Ca (Vertisols: VX₁ and VX₂). The migration to P-Fe was modest and concentrated in LV and LAd₂. The migration to P-Al was fast, to P-Ca was moderated, and to P-Fe was slow. It was evidenced that liming promoted the displacement of P-Al, P-Fe, P-Ca, especially in LAd₂, showing that liming favored P availability. In general, greater dry mass production and nutrient uptake were obtained when P was applied in surface, independent of fertilizer solubility, because in relation to nutrient contents, triple superphosphate presented better result in this application method, when compared to natural phosphate. In general, soils from Northeast presented low P fixation capacity. To soils that presented low P fixation capacity it is recommended the application of P fertilizer in surface, independent of its solubility. P surface fertilization promoted greater biomass production compared to localized fertilization.

Key words: P fixation. P compartmentalization. Phosphorus fertilization management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo.	29
Figura 2. Esquema do fracionamento de fósforo inorgânico proposto Chang & Jackson (1957), com adaptações sugeridas por Souza Júnior et al. (2012).	34
Figura 3. Esquema do fracionamento de P orgânico e inorgânico proposto por Hedley et al. (1982), com modificações de Condon et al. (1985). Fonte: Gatiboni (2003)	36
Figura 4. Vista aérea e transversal do vaso, indicando a região de localização do fósforo a 30% do volume do vaso.....	40
Figura 5. Teores de P inorgânico referentes às frações P solúvel, P ligado ao Al, P ligado ao Fe e P ligado ao Ca a 0, 20 e 40 dias de incubação do P na camada de 0-20 cm de profundidade dos solos em estudo.....	47
Figura 6. Desdobramento do tempo dentro de cada solo. Método Chang & Jackson.....	48
Figura 7. Análise de componentes principais (ACP) dos solos a partir das variáveis indicadoras de capacidade de fixação.....	50
Figura 8. P lábil e não lábil em função do tempo de incubação das amostras de solo.	52
Figura 9. Produção de massa seca da parte aérea e raiz de <i>Brachiária decumbens</i> nos tratamentos com diferentes modos de aplicação e fontes de P de diferentes solubilidades. ...	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Solos, identificação, material de origem e procedência	29
Tabela 2. Densidade do solo e de partícula, granulometria e classe textural dos solos	30
Tabela 3. Propriedades químicas dos solos	32
Tabela 4. Minerais da fração argila dos solos, teor de óxido de ferro extraído por Oxalato de Amônio (OA), Ditionito-Citrato- Bicarbonato (DCB) e sua relação	37
Tabela 5. CMAP, energia de ligação e dose de P utilizado na incubação dos solos	38
Tabela 6. Teores de P das frações de P inorgânico em solos de diferentes mineralogias	42
Tabela 7. Correlação simples de Pearson entre frações de P dos solos e indicadores da capacidade tampão de fosfato	44
Tabela 8. Compartimentalização de P em solos de diferentes mineralogias ao longo do tempo em função da aplicação de calcário na camada superficial (0-20 cm de profundidade)	54
Tabela 9. Compartimentalização de P em solos de diferentes mineralogias ao longo do tempo em função da aplicação de calcário na camada subsuperficial (0-20 cm de profundidade)....	55
Tabela 10. Compartimentalização de P em solos de diferentes mineralogias ao longo do tempo em função da aplicação de calcário na camada subsuperficial (20-40 cm de profundidade).....	56
Tabela 11. Compartimentalização de P em solos de diferentes mineralogias ao longo do tempo em função da aplicação de calcário na camada subsuperficial (20-40 cm de profundidade).....	57
Tabela 12. Frações de P inorgânico em solos de diferentes mineralogias antes e após cultivo de <i>Brachiaria decumbens</i> por 40 dias	59
Tabela 13. Conteúdo de P, K e Ca na parte aérea de <i>Braquiaria decumbens</i> em função do modo de aplicação do adubo e da fonte de P aplicada em solos de diferentes mineralogias ...	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	19
1.1 Hipóteses.....	21
1.2 Objetivo Geral.....	21
1.3 Objetivos Específicos.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Fósforo no solo	22
2.2 Dinâmica de fósforo no solo	24
2.3 Técnicas de fracionamento de fósforo	26
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Dinâmica de P em solos de diferentes mineralogias.....	28
3.1.1 Procedência dos solos.....	28
3.1.2. Coleta e preparo das amostras	29
3.1.3. Caracterização física, química e mineralógica dos solos.....	30
3.1.4. Tratamentos e condução do ensaio.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1. Compartimentalização de P em solos de diferentes mineralogias	41
4.2. Relações entre os diferentes indicadores de capacidade tampão de fosfato dos solos e as frações de P inorgânico (Pi).....	43
4.3. Compartimentalização de P inorgânico (Pi) em solos de diferentes mineralogias.....	46
4.4. Agrupamento de solos de diferentes mineralogias em função dos indicadores de capacidade tampão de fosfato	49
4.6. Calagem de solos de diferentes mineralogias: efeitos na compartimentalização de P inorgânico (Pi) em função do tempo de incubação.....	53
4.7. Compartimentalização de P inorgânico (Pi) dos solos sob cultivo de <i>Brachiaria decumbens</i>	58
4.8. Crescimento e absorção de nutrientes por <i>Brachiaria decumbens</i> sob diferentes fontes e modos de aplicação de P em solos de diferentes mineralogias.....	60

5 CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	65
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
Apêndice A. DRX da fração argila (pó) dos solos estudados (camada 0-20 cm). 1-VHot; 2-VHt; 3- CB; 4- LAd1; 5- LAd2; 6-LAe; 7-LV	73
Apêndice B. DRX da fração argila (pó) dos solos estudados (camada 20-40 cm). 1-VHot; 2-VHt; 3- CB; 4- LAd1; 5- LAd2; 6-LAe; 7-LV	74
Apêndice C. DRX da fração argila (tratada com Mg) dos solos estudados (camada 0-20 cm). 1-VHot; 2- VHt; 3- CB; 4- LAd1; 5- LAd2; 6-LAe; 7-LV	75
Apêndice D. DRX da fração argila (tratada com Mg) dos solos estudados (camada 20-40 cm). 1-VHot; 2- VHt; 3- CB; 4- LAd1; 5- LAd2; 6-LAe; 7-LV	76

1. INTRODUÇÃO GERAL

Nos empreendimentos agrícolas brasileiros o uso de P na adubação é elevado, principalmente porque estão estabelecidos em solos tropicais com alta capacidade de fixação desse elemento químico. Essa elevada capacidade de fixação de P em regiões tropicais está relacionada com a alta interação do P com os solos em avançado estágio de intemperismo, fazendo com que a disponibilidade de P seja reduzida.

A assembleia mineralógica da fração argila dos solos altamente intemperizados é constituída, em geral, por caulinita e óxidos de Fe (hematita, goethita, maghemita e ferridrita) e de Al (gibbsita) (SCHAEFER; FABRIS; KER, 2008; MONTANARI et al., 2010; BAHIA et al., 2015). A baixa disponibilidade de P nesses solos está relacionada principalmente com a adsorção do fosfato aos óxidos de Fe e Al ocorrendo, especialmente, nas formas de baixa cristalinidade dos minerais e com alto desbalanço de cargas (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). A precipitação do P com Fe, Al ou Ca é também outro processo responsável pela baixa disponibilidade de P em solos tropicais (PENG et al., 2007; SOUZA et al., 2012).

A adsorção de P por óxidos pode envolver duas fases: uma primeira fase considerada rápida, onde ocorre atração eletrostática entre o P e a superfície adsorvente, formando ligações coordenadas simples; e uma segunda fase considerada mais lenta, que ocorre em sequência à primeira, e que, com o passar do tempo, resulta no “envelhecimento” do P adsorvido, onde os compostos adquirem alta estabilidade, tornando o P indisponível às plantas (NOVAIS; SMYTH, 1999; KIM; PHILLIPS; GREY, 2011). Assim, a fixação de P nos solos oxidicos é maior, sendo a goethita e gibbsita os principais componentes da fração argila responsáveis por este fenômeno (FERNÁNDEZ et al., 2008; BROGGI et al., 2010).

As argilas silicatadas do tipo 1:1, como a caulinita, têm menor capacidade de adsorver P, devido à sua menor área superficial específica (CELI; LUCA; BARBERIS, 2003; CHRISTOPHE et al., 2015). Outro fator responsável pela menor contribuição da caulinita na adsorção de P em comparação aos óxidos de Fe e Al é o seu menor ponto de carga zero (PCZ). De acordo com Sposito (1989), o PCZ da caulinita é em torno de 4,0. Assim, no pH dos solos cultivados, a carga superficial deste mineral torna-se mais negativa, diminuindo a adsorção entre fosfato e a superfície adsorvente.

Nesse contexto, o estudo da dinâmica de P em áreas onde a mineralogia é contrastante, como na região Nordeste e Centro-oeste, torna-se relevante. Dentre os principais compartimentos geológicos da região Nordeste destacam-se as áreas de bacias sedimentares

interioranas e costeiras com predomínio de arenitos conglomeráticos com seixos de quartzo e por feldspato (ARAÚJO et al., 2006); áreas com cobertura sedimentar; bacias calcárias e ambientes de rochas cristalinas. Neste último destacam-se granitos, gnaisses e xistos (FURRIER et al., 2006).

Dessa forma, a geologia da região Nordeste favorece o surgimento de baixos teores de óxidos de Fe e predominância de caulinita nos solos altamente intemperizados, ao contrário do que ocorre no Centro-oeste porque parte desta região está recoberta por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, onde a predominância do basalto é responsável pelos elevados teores de Fe (REIS et al., 2014).

Assim, diante da ordem preferencial de adsorção de P pelos minerais, onde: argilas 2:1 < argilas 1:1 < óxidos cristalinos de Fe e Al < óxidos amorfos de Fe e Al (FOX; SEARLE, 1978), os menores teores de óxidos de Fe e Al na região Nordeste podem ser responsáveis por uma menor fixação de P nesta região, o que possibilita a sugestão de um novo manejo de adubação fosfatada, com o objetivo de se obter uma forma mais eficiente de aplicação de P.

Na adubação fosfatada realizada atualmente nos solos dos empreendimentos agrícolas do Nordeste, o adubo é colocado de uma única vez por ocasião do plantio (adubação de fundação). Este tipo de manejo é realizado com a finalidade de minimizar o contato do fertilizante fosfatado com o solo, evitando a adsorção e, ou, precipitação de P. No entanto, a menor fixação do P nos solos dessa região pode permitir a realização da adubação fosfatada em área total, independente da solubilidade do fertilizante, favorecendo uma maior exploração do sistema radicular das plantas e, conseqüentemente, maior absorção de água e nutrientes.

A escolha do fertilizante e o modo de aplicação são as principais preocupações no fornecimento de P. Diante disso, técnicas de fracionamento de P têm sido utilizadas com o propósito de se obter melhor conhecimento da distribuição de P no solo e assim poder estabelecer métodos mais apropriados de aplicação desse nutriente, capazes de atender às exigências da planta, levando em consideração o aspecto nutricional e econômico (SANTOS et al., 2008).

O conhecimento da distribuição das diferentes frações do P no solo possibilita inferir sobre a sua disponibilidade para as plantas a curta e longo prazo, podendo dessa forma contribuir para o entendimento da dinâmica do P nos solos dos grandes empreendimentos agrícolas do Nordeste, comparativamente aos solos do Centro-oeste, visando inferir sobre um manejo mais adequado do P nesses empreendimentos.

Se a dinâmica de P em solos do Nordeste é diferente do que ocorre em solos oxidícos, principalmente do Centro-oeste, o que irá certamente interferir no manejo da adubação, é

necessário conhecer qual o melhor manejo, principalmente quanto à fonte e modo de aplicação do adubo fosfatado.

No Nordeste há poucos trabalhos que trazem informações sobre manejo de adubação fosfatada baseado nas características do solo, sendo mais comum a prática de adubação localizada de P. No entanto, esse tipo de adubação pode resultar em baixa utilização desse nutriente pelas plantas, quando não levam em consideração a interação do P com o solo. Diante da pouca informação, torna-se necessário a realização de pesquisas que contemplem esse tema, para que se possa recomendar manejo de adubação fosfatada baseada nas características do solo, especialmente quanto à mineralogia, devido à sua influência na adsorção de P.

1.1 Hipóteses

Os solos do Nordeste são menos fixadores de P do que os solos do Centro-oeste

A menor fixação de P nos solos do Nordeste possibilita recomendar a aplicação do fertilizante fosfatado em área total, independente da solubilidade da fonte utilizada na adubação.

A adubação fosfatada em área total em solos com baixa capacidade de fixação de P promove maior eficiência agrônômica quando comparado com a adubação localizada.

1.2 Objetivo Geral

Estudar a dinâmica do P em solos mineralogicamente distintos e avaliar a eficiência agrônômica em cultivo de braquiária sob diferentes fontes e modos de aplicação de P.

1.3 Objetivos Específicos

Determinar a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e correlacioná-la com características físicas, químicas e mineralógicas dos solos;

Fracionar P em solos mineralogicamente distintos após diferentes tempos de contato do P com os solos;

Correlacionar o P das frações inorgânicas, após diferentes tempos de incubação, com as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos;

Fracionar P em solo com baixa CMAP, submetido a diferentes modos de aplicação de fosfatos de solubilidade variada, durante o cultivo de braquiária;

Avaliar a produtividade agrícola da braquiária em função de diferentes modos de aplicação de P e de diferentes fontes de fertilizantes fosfatados;

Recomendar manejo de adubação fosfatada para solos com baixa CMAP

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fósforo no solo

O P ocorre no solo tanto na forma inorgânica (Pi), como orgânica (Po). As formas de Pi compreendem o fosfato precipitado com íons na solução do solo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008), e também aquelas adsorvidas aos grupos funcionais dos colóides, onde a energia de ligação aumenta na ordem inversa à sua labilidade, enquanto que as formas de Po compreendem os íons fosfatos ligados aos compostos orgânicos, com labilidade relacionada à suscetibilidade de decomposição do radical orgânico, ao qual o fosfato está ligado (GATIBONI et al., 2008a)

O Pi é representado por duas partes, o P dos minerais primários, e o P que se encontra adsorvido nos colóides do solo. Ele faz parte de grupo de fosfatos inorgânicos, de modo a formar diferentes compostos e apresentando diferentes graus de estabilidade química, podendo ser encontrado ligado aos grupos funcionais silanol e aluminol das arestas das argilas silicatadas e nos R-OH dos oxihidróxidos de ferro e alumínio e, até mesmo, adsorvido à matéria orgânica do solo por meio de pontes de cátions (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008); O P possui grandes variedades de compostos orgânicos, sendo os fosfatos de inositol, fosfolipídios, ácidos nucleicos e outros ésteresfosfatos as principais formas já identificadas (STEVENSON, 1986)

Em solos tropicais, com alto desenvolvimento pedogenético, o P predomina nas formas inorgânicas ligadas à fração mineral (P-adsorvido e nas formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente (RHEINHEIMER; GATIBONI; KAMINSKI, 2008; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Nesses solos, os óxidos de Fe e de Al são predominantes, e a adsorção de P por esses minerais ocorre de modo a formar complexo de superfície, onde os grupos $-OH$ e $-OH^{2+}$ ligados de forma monocoordenada aos metais Fe e Al são deslocados pelos íons $H_2PO_4^-$, promovendo dessa forma, alta estabilidade desses compostos e reduzindo a disponibilidade de P (LEITE, 2015), como verificado por Santos et al. (2016) ao estudar a disponibilidade P após diferentes tempos de incubação desse elemento com o solo.

A precipitação do P com Fe, Al ou Ca é também outro processo responsável pela baixa disponibilidade de P em solos tropicais, e ocorre quando em reações químicas do íon no solo se forma um novo produto, com composição definida e baixa solubilidade (SAMPLE;

SOPER; RACZ, 1980). Assim, pode-se formar fosfatos de ferro (P-Fe), de alumínio (P-Al) e de cálcio (P-Ca), sendo variáveis as quantidades de cada forma em função da disponibilidade desses cátions, que normalmente é influenciada pelo pH do solo.

Em solos com pH baixo, ocorre o predomínio das formas de P ligadas ao Fe (P-Fe) e de Al (P-Al). No entanto, à medida em que o pH aumenta, para valores próximos de 6, o P, antes precipitado com Al e Fe, torna-se disponível. Quando o valor de pH ultrapassa a faixa ideal para a maioria das culturas, o solo apresenta caráter básico e a forma de P precipitado com Ca (P-Ca) passa a ser predominante no solo. No decorrer dessas alterações de pH surgem alguns minerais, tais como strengita (Fe) variscita (Al), e fluorapatita (Ca), os quais podem ser solubilizados com a inversão do pH. Com o passar do tempo, pode ocorrer a formação de fosfatos naturais de baixa reatividade à medida em que as ligações adquirem maior estabilidade (OLSEN; KHASAWNEH, 1980).

Em solos neutros a calcários, a retenção de P é dominada por reações de precipitação (LINDSAY; VLEK; CHIEN, 1989), ocorrendo após a adsorção inicial dos íons fosfatados com cálcio (REDDY; WETZEL; KADLEC, 2005). Nesses solos o P ainda pode ser adsorvido a carbonatos e também aos minerais de argila. Quando precipitado com Ca pode originar dicálcico, o qual pode ser transformado em formas mais estáveis, como o fosfato octocálcico e a hidroxiapatita, menos disponível às plantas em de pH alcalino (ARAI; SPARKS, 2007).

O P apresenta formas aniônicas variadas (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-}), as quais ocorrem em função do pH do solo. Em solos ácidos, típicos de regiões tropicais, o P da solução do solo apresenta-se, normalmente, na forma de H_2PO_4^- (FINK et al., 2016). O P em solução, também denominado de fator intensidade (I) é suprido pelo fator quantidade (Q) (P adsorvido nos colóides), à medida que esse elemento é absorvido pelas plantas, havendo, portanto, um equilíbrio entre I e Q. Assim, esse equilíbrio entre o P-solução e o P-sólido é influenciado pela concentração P na solução e na fase sólida, bem como da resistência do solo a mudanças no fator intensidade (I), quando se põe ou se retira P do solo (Q) (NOVAIS et al., 2007).

Quanto à disponibilidade de P, este pode ser dividido em formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis. Apesar dessa classificação mostrar-se imprecisa, ajuda a compreender a dinâmica da disponibilidade do P, para estudos que avaliam o acúmulo e dessorção dessas formas de P de acordo com sua labilidade (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Vários estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar a labilidade de P, principalmente em função da mineralogia do solo, adubação e manejo do solo (FINK et al., 2016; MAHARJAN; MARANGUITA; KUZYAKOVD, 2018).

A taxa de aproveitamento de P pela planta normalmente é baixa, estima-se que apenas 15 a 25% de P seja absorvido pelas culturas, e que 95 a 75 % dele é fixado no solo (FALCÃO; SILVA, 2004). Assim, há necessidade de aplicação de grande quantidade desse elemento no momento da adubação, para que se possa promover a saturação de P no solo, até formar um excedente capaz de suprir as exigências nutricionais das culturas (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Em solos altamente intemperizados, a baixa eficiência do uso de fosfato pela planta pode ser consequente da assembleia mineralogia desses solos, onde goethita e hematita, que são os óxidos de ferro pedogênicos mais comuns, acompanhados de maghemita e ferridrita, estes últimos em pequena quantidade, possuem grande afinidade pelo P (FINK et al., 2016a). Essa afinidade ocorre devido à adsorção de P na solução do solo por grupos funcionais em óxidos de ferro, resultando na formação de complexos de esfera interna, via ligação covalente (SPOSITO, 2008; FINK et al., 2016a), tornando o P indisponível às plantas.

Diante disso, torna-se evidente a necessidade de pesquisas que buscam maneiras de utilizar o P de forma eficiente na agricultura. A problemática da interação do P com os constituintes do solo, favorecendo as formas não lábeis desse elemento químico, aliada necessidade de importação de fertilizantes fosfatados (BAVEYE, 2015), é mais uma forte motivação para buscar maior eficiência na adubação fosfatada.

O uso de sistemas alternativos de manejo que possam propiciar resultados satisfatórios quanto a disponibilidade de P, torna-se cada vez mais necessário (GATIBONI et al., 2008 SILVA et al., 2011; QIAO, 2012), e o conhecimento do comportamento do P no solo é uma ferramenta capaz de fornecer informações relevantes na tomada de decisão quanto ao manejo a ser adotado. De modo geral, as mudanças na dinâmica das formas de P inorgânico e orgânico são influenciadas, em grande parte, pelo sistema de manejo de solo, além da quantidade de P exportado na colheita, da taxa de reposição do P exportado do sistema e da habilidade das plantas em utilizar as reservas de P nas formas menos lábeis (TIECHER et al., 2012), o que torna imprescindível o entendimento das formas e da dinâmica de P no solo.

2.2 Dinâmica de fósforo no solo

A dinâmica de P está associada a fatores ambientais que controlam a atividade dos microrganismos, os quais imobilizam ou liberam os íons ortofosfato, e às propriedades físicoquímicas e mineralógicas do solo. Dessa forma, em solos jovens e nos moderadamente intemperizados, ainda ocorre fósforo em minerais primários, mas a maior parte deste

elemento se encontra na forma orgânica (Po), ou na forma mineral (Pi), adsorvida fracamente aos minerais secundários (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

O intemperismo do solo causa a dissolução de minerais primários para: 1) precipitar com cátions, levando, muitas vezes à neoformação de fosfato de cálcio em solos alcalinos; 2) ser adsorvidos por grupos funcionais de óxidos de Fe ou Al para formar complexos termodinamicamente estáveis, ou 3) formar compostos orgânicos biologicamente ativos, que permanecem como P orgânico no (FINK et al., 2016a). A transformação dessas formas são condicionadas por propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo (FINK et al., 2014).

Segundo SANTOS, GATIBONI e KAMINSKI, (2008), nos solos de alto desenvolvimento pedogenético, como os Latossolos, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente. De acordo com o maior ou menor grau de estabilidade destes compostos, são enquadrados como fosfatos lábeis e não-lábeis. Esses autores ainda afirmam que a fração lábil é representada pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo, quando ele é absorvido por plantas ou por microrganismos. Assim, a labilidade do P no solo é influenciada por diversos fatores, tais como mineralogia, grau de intemperismo, manejo do solo, microrganismos e teor de matéria orgânica (LI et al., 2019; FINK et al., 2014).

As frações orgânicas de P no solo podem apresentar-se como fonte ou dreno para a solução do solo, dependendo das suas características mineralógicas, das condições ambientais, da fertilização e do manejo do solo (NOVAIS; SMITH, 1999). Em solos sob sistema de plantio direto, verifica-se que após cultivos sucessivos, as formas não lábeis de P podem atuar como tamponantes e repor P para as formas mais solúveis (GATIBONI et al., 2007), evidenciando que as formas de P são dependentes diversos fatores capazes influenciar na dinâmica desse elemento.

Em um estudo realizado sobre a dinâmica de P em função dos diversos usos do solo (MAHARJAN; MARANGUITA; KUZUYAKOVD, 2018), os autores verificaram que o Po total representou entre 18% e 42% do total de P, e que o total de Pi e Po foi maior na agricultura orgânica, quando comparada com a agricultura convencional e na floresta. Esses autores ainda observaram que a fração de P mais prontamente disponível, ou seja, $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ e $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$, foi maior na agricultura orgânica na camada mais superficial, ressaltando a importância do manejo do solo na labilidade do P.

Li et al. (2019) observaram que a dinâmica do P inorgânico e orgânico lábeis foram influenciadas por mudanças nas variáveis físico-químicas e biológicas proporcionadas pelo

cultivo agrícola de solos calcários. A partir desse estudo foi verificado que a fertilização de solos calcários aumentou significativamente a disponibilidade de Pi e Po lábeis, mas que a idade de cultivo influencia na magnitude desse efeito. Os autores ainda puderam concluir que diferenças nos solos de P lábeis entre solos cultivados e não cultivados podem ser parcialmente atribuídas a diferenças nas condições bióticas e abióticas do solo, particularmente em processos críticos envolvidos na regulação da disponibilidade de P no solo, como a dissolução do fosfato induzida pela acidificação do solo e mineralização de Po.

Costa et al. (2016) ao avaliarem o efeito residual da calagem superficial em solo tropical, verificaram que a aplicação de calcário proporcionou a absorção de P pelo sorgo. Por outro lado, Lee et al. (2011) alertam que a forma como o calcário influencia na disponibilidade do P depende do teor de cálcio. Esses autores verificaram que a adição de materiais de calcário contendo alto teor de cálcio pode converter o P solúvel em água em formas menos solúvel, o que pode acarretar em consequências nutricionais às plantas.

Bezerra et al. (2015) estudaram as frações de P e sua correlação com atributos edáficos sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária. Nesse trabalho foi possível verificar que os maiores valores de todas as frações de P na camada superficial do solo nas áreas cultivadas são decorrentes do sistema de manejo (SPD e ILP). Esses autores ainda explicam que nestes sistemas, os fertilizantes fosfatados são adicionados na superfície do solo, e que somado à constante adição de resíduos vegetais e a ausência de revolvimento do solo, intensifica a ciclagem de P na camada superficial do solo. Nesta camada, sua adsorção é menor, causada pela saturação dos sítios de adsorção e pela diminuição da energia de ligação do fosfato com os colóides do solo, proporcionando aumento do P em formas mais lábeis.

Diante do exposto, fica claro que a labilidade de P é dependente de processos que ocorrem no solo, de natureza físico-química, biológica e mineralógica, bem como do manejo do solo. Visto essa complexidade de fatores, o entendimento da dinâmica de P requer técnicas aprimoradas, capazes de fornecer informações detalhadas sobre o comportamento de P, e assim auxiliar na tomada de decisão quanto ao manejo a ser adotado.

2.3 Técnicas de fracionamento de fósforo

A divisão das formas de P no solo é fundamentada nos extratores usados para estimá-las (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Diversos trabalhos têm sido realizados com a finalidade de estabelecer bases para a identificação das formas de P a partir de extrações sequenciais desse elemento (CHANG; JACKSON, 1957; HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982). Apesar da complexidade do fracionamento de P, alguns estudos têm

utilizado dessa técnica com a finalidade de identificar formas predominantes desse elemento e a contribuição daquelas preferencialmente absorvidas pelas plantas (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Há vários métodos utilizados para avaliar a dinâmica de P no solo. No entanto, o fracionamento de P proposto por Chang e Jackson (1957) tem sido o mais utilizado. Este método baseia-se na utilização de extratores capazes de extrair seletivamente as diversas frações do P, tais como P facilmente solúvel (P-H₂O), extraído por NH₄Cl, P ligado ao Al (P-Al), extraído por NH₄F, P ligado ao Fe (P-Fe) extraído por NaOH, e P ligado ao Ca (P-Ca) extraído por H₂SO₄. A partir deste método é possível determinar a causa da deficiência de P, o que o torna de grande importância em trabalhos que tem o propósito de avaliar a dinâmica do P em função da mineralogia do solo (LACERDA et al., 2013).

Apesar do método proposto por Chang e Jackson (1957) ter muitas vantagens na quantificação do P inorgânico, ele não permite quantificar as formas orgânicas de P do solo e não estima a labilidade das formas extraídas, o que é possível de ser realizado a partir do método sugerido por Hedley, Stewart e Chauhan (1982). Nele a extração sequencial é realizada com a finalidade de se obter as formas lábeis, pouco lábeis e não lábeis do P do solo, possibilitando a separação das formas inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po).

Na técnica de fracionamento proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), são adicionados sequencialmente extratores de menor à maior força de extração, os quais removem Pi e Po das formas mais disponíveis às mais estáveis. Os extratores são Resina Trocadora de Ânions (PiRTA), NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ a pH 8,5 (Pibic e Pobic); NaOH 0,1 mol L⁻¹ (Pihid e Pohid); NaOH 0,1 mol L⁻¹ + ultrassonificação (Pison e Po son); HCl 1 mol L⁻¹ (PiHCl) e: digestão com H₂SO₄ + H₂O₂ (Pidig e Po dig).

Diante da complexidade do comportamento do P no solo, é importante ressaltar que nenhum método é capaz de fornecer informações do P na totalidade das suas frações que este se encontra no solo, diante dessa situação, muitas vezes há necessidade de utilizar-se de mais de um método, dependendo do objetivo da pesquisa.

Alguns estudos têm avaliado o comportamento do P em função do manejo do solo, para isso a extração de forma sequencial de P tem-se tornado imprescindível, sendo capaz de fornecer informações das diversas reações de sorção e precipitação desse elemento no solo. Maranguit, Guillaume e Kuzyakov (2017) avaliaram os impactos da mudança do uso do solo nas frações orgânicas e inorgânicas de P e nos estoques de P em solos tropicais altamente intemperizados. Nesse estudo, foi possível verificar que o teor de P inorgânico facilmente

disponível foi maior em plantações intensivas de seringueiras e dendê em comparação com a agroflorestal. No entanto, o P orgânico foi reduzido nas plantações intensivas.

Com a extração sequencial de P ficou possível entender a dinâmica desse elemento no sistema, e a partir daí, obter respaldo científico para a tomada de decisões, tanto no aspecto agrícola, quanto no econômico e ambiental.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo constou de três experimentos realizados em casa-de-vegetação da Universidade Federal Rural de Pernambuco. No primeiro experimento foi avaliada a dinâmica do P em solos mineralogicamente distintos, coletados na região Nordeste e no Centro-oeste do Brasil. Neste ensaio, os solos foram incubados com P e acondicionados em ambiente protegido para posterior fracionamento e avaliação da transformação de formas lábeis de P em não-lábeis. No segundo experimento utilizou-se três dos solos analisados no primeiro ensaio. Neste experimento foi avaliada a compartimentação do fósforo inorgânico em função da presença e ausência de calagem. No terceiro experimento foram combinadas fontes e modos de aplicação de P em cultivo de *Brachiaria decumbens*, procurando, desta forma, obter informações sobre o melhor manejo de adubação fosfatada. No início e no final do cultivo, o P foi fracionado, permitindo inferir de que fração de P as plantas foram supridas. Nesse experimento também foi avaliada a matéria seca e absorção de nutrientes pela gramínea em função dos diferentes modos de aplicação de P e fontes dos adubos.

3.1 Dinâmica de P em solos de diferentes mineralogias

3.1.1 Procedência dos solos

Os solos utilizados foram provenientes de áreas próximas aos grandes arranjos produtivos da região Nordeste, localizados nos Estados do Piauí, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Paraíba e Bahia. Os solos foram escolhidos em função da composição mineralógica, sendo coletadas amostras com possíveis variações de minerais (caulinita, esmectita, hematita, goethita e gibbsita) na fração argila. Como padrão de comparação para estudar a fixação de P, foi utilizado um solo do Centro-oeste (Goiás), rico em óxidos de Fe e Al (Figura 1 e Tabela 1).

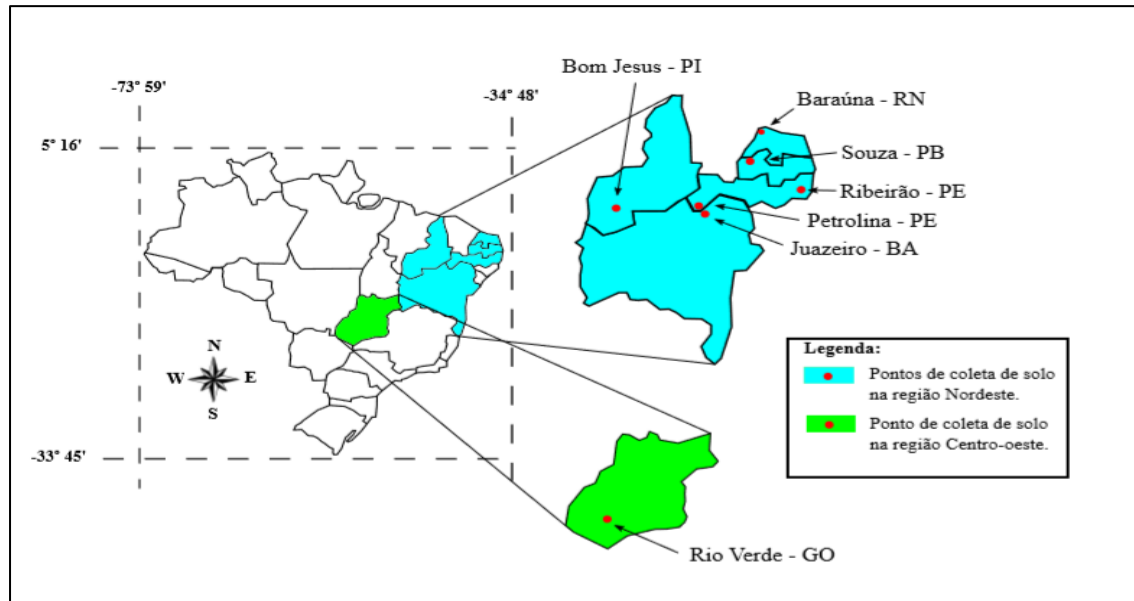


Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo

Tabela 1. Solos, identificação, material de origem e procedência

Solos	Identificação	Material de origem	Procedência
VERTISSOLO HÁPLICO Órtico típico	VX ₁	Calcário da Formação Caatinga	Juazeiro – BA
VERTISSOLO HÁPLICO típico	VX ₂	Argilito do Cretáceo	Souza – PB
CAMBISSOLO	CB	Calcário	Baraúna – RN
LATOSSOLO VERMELHO	LV	Basalto da Formação Serra Geral	Rio Verde – GO
LATOSSOLO AMARELO Distrófico	LAd ₁	Sedimento argiloarenoso pré-intemperizado	Bom Jesus – PI
LATOSSOLO AMARELO Distrófico	LAd ₂	Suítes graníticas/gnaissicas	Ribeirão – PE
LATOSSOLO AMARELO Eutrófico	LAe	Recobrimento sedimentar (pedimentar)	Petrolina – PE

3.1.2. Coleta e preparo das amostras

As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, em áreas próximas aos grandes empreendimentos agrícolas do Nordeste, sem histórico de adubação fosfatada.

Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em peneira com malha de 2 mm, com a finalidade de se obter a terra fina seca ao ar (TFSA), para a realização das análises físicas, químicas e mineralógicas, bem como para a realização do experimento.

3.1.3. Caracterização física, química e mineralógica dos solos

a) Análises físicas

Foi determinada a composição granulométrica pelo método da pipeta, com modificações propostas por Ruiz (2005). A densidade do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico com o uso de amostras de solo indeformadas e pelo método da proveta. A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico. Todas as análises físicas seguiram a metodologia descrita pela EMBRAPA (1997) (Tabela 2).

Tabela 2. Densidade do solo e de partícula, granulometria e classe textural dos solos

Profundidade cm	Ds g cm ⁻³	Dp g cm ⁻³	Granulometria			Classe textural
			Areia	silte	Argila	
-----g kg ⁻¹ -----						
VX ₁ – Juazeiro - BA						
0-20	1,64	2,18	233	318	450	Argila
20-40	1,73	2,23	212	336	452	Argila
VX ₂ – Souza - PB						
0-20	1,39	2,15	200	284	516	Argila
20-40	1,49	2,24	183	285	532	Argila
CB – Baraúna - RN						
0-20	1,67	2,83	536	57	407	Argila Arenosa
20-40	1,57	2,92	504	48	448	Argila Arenosa
LV – Rio Verde - GO						
0-20	1,24	2,44	502	91	407	Argila Arenosa
20-40	1,44	2,74	430	94	476	Argila
LAd ₁ – Bom Jesus - PI						
0-20	1,32	2,71	848	11	141	Franco Arenoso
20-40	1,35	2,89	858	1	141	Franco Arenoso
LAd ₂ – Ribeirão - PE						
0-20	1,20	2,63	444	88	468	Argila
20-40	1,39	2,80	400	33	567	Argila
LAe – Petrolina - PE						
0-20	1,44	2,83	810	49	141	Franco Arenoso
20-40	1,49	2,89	408	451	141	Franca

b) Análises químicas

Os solos foram caracterizados pelo pH (H₂O), pH (KCl), Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Al³⁺, Na⁺, (H+Al), P, carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT). O Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos por KCl 1,0 mol L⁻¹, enquanto que o P, K⁺ e Na⁺ foram extraídos por Mehlich-1. A acidez potencial (H+Al) foi extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ e dosada por titulometria. O Ca²⁺ e Mg²⁺ foram dosados por espectrofotometria de absorção atômica. O K⁺

e Na^+ foram dosados por fotometria de chama, enquanto que o P foi dosado por colorimetria e o Al^{3+} por titulometria. O COT foi determinado por combustão úmida com dicromato de K e o NT foi quantificado nas amostras de solo submetidas à digestão sulfúrica e dosado por destilação Kjeldhal. Todas as análises foram realizadas conforme metodologias descritas pela EMBRAPA (2011) (Tabela 3).

A partir dos resultados obtidos foram calculados soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions potencial (CTCp), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e percentagem de sódio trocável (PST).

O P remanescente (P-rem) foi determinado de acordo com Alvarez et al. (2000). Para a avaliação da CMAP, as amostras de solo receberam doses de P baseadas no valor de P-rem. Amostras de TFSA de cada solo foram saturadas com soluções de concentrações crescentes de P em CaCl_2 $0,01 \text{ mmol L}^{-1}$. Cada solo recebeu 11 doses de P (KH_2PO_4 p.a.) no intervalo de 0 a 100 mg L^{-1} para o Vht na camada de 0-20 cm e 20-40 cm, LV e LAd_2 na camada de 0-20 cm; 0 a $54,0 \text{ mg L}^{-1}$ para o LAd_2 na camada 20-40 cm; 0 a 210 mg L^{-1} para o LV na camada de 20-40 cm; 0 a 60 mg L^{-1} para LAe, Vht, LAd_1 e CB, em ambas as camadas. Adotou-se a isoterma de Langmuir ($C/q = 1/ab + 1/bC$) para determinar a CMAP (b), expressa em mg cm^{-3} ; e a constante (a), relacionada com a energia de adsorção (EA), expressa em $(\text{L mg}^{-1})^{-1}$.

c) Fracionamento de P inorgânico

As frações de fósforo inorgânico foram determinadas, conforme o método descrito por Chang e Jackson (1957), com adaptações sugeridas por Souza Júnior et al. (2012). Com base nessa metodologia, o solo foi submetido à extrações sequencias de P inorgânico, conforme os procedimentos descritos abaixo, e apresentados de forma esquemática (Figura 2).

Extração do Pi facilmente solúvel (P- H_2O)

Foi colocado 0,5 g de solo (TFSA) em erlenmeyer de 125 mL contendo 25 mL de NH_4Cl 1 mol L^{-1} , seguido de agitação durante 30 min em agitador horizontal. Passado esse período, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 1.800 rpm, sendo o sobrenadante filtrado em papel de filtração lenta e transferido para balão volumétrico de 50 mL, que teve seu volume completado com água deionizada (extrato A), no qual determinou-se a concentração de P e calculou-se o teor de P- H_2O no solo.

Tabela 3. Propriedades químicas dos solos

Prof.	pH	Δ pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	(H+Al)	SB	CTCp	V	m	PST	COT	NT	P	P-rem	CMAP						
cm	H ₂ O	KCl	-----cmol _c dm ⁻³ -----															-----%-----			-----g kg ⁻¹ -----	mg dm ⁻³	mg L ⁻¹	mg cm ⁻³
VX ₁ – Juazeiro - BA																								
0-20	8,54	7,25	-1,29	44,52	1,19	0,33	0,15	0	0,74	46,19	46,93	98	0	0	5,64	0,17	1,54	26	0,69					
20-40	8,53	7,03	-1,5	45,45	1,01	0,13	0,23	0	0,66	46,82	47,48	98	0	0	4,5	0,14	1,13	25,79	0,68					
VX ₂ – Souza - PB																								
0-20	7,54	5,78	-1,76	26,67	7,42	1	0,56	0	1,79	35,65	37,44	95	0	1	5,69	0,19	23,03	32,91	0,34					
20-40	7,96	6,12	-1,84	28,9	6,96	0,78	1,19	0	1,65	37,83	39,48	95	0	3	4,14	0,1	23,58	32,17	0,46					
CB – Baraúna - RN																								
0-20	7,21	6,14	-1,07	7,63	0,91	0,87	0,04	0	1,1	9,45	10,55	89	0	0	14,83	0,38	1,88	37,29	0,35					
20-40	7,21	5,85	-1,36	5,81	0,29	1,12	0,04	0	1,35	7,26	8,61	84	0	0	6,58	0,19	1,03	31,61	0,41					
LV – Rio Verde - GO																								
0-20	5,98	5	-0,98	1,63	0,46	0,29	0	0,05	2,12	2,38	7,3	32	2	0	20,02	0,25	3,25	29,38	0,64					
20-40	5,55	5,87	0,32	0,14	0,06	0,12	0	0,78	4,92	0,32	2,44	13	70	0	4,42	0,24	0,71	5,08	1,67					
LAd ₁ – Bom Jesus - PI																								
0-20	5,48	3,71	-1,77	0,07	0,02	0,03	0,03	1,28	6,82	0,15	6,97	2	89	0	17,8	0,2	2,7	47,34	0,13					
20-40	5,02	4,15	-0,87	0,06	0	0,01	0,02	0,72	3,41	0,09	3,5	2	88	0	7,14	0,11	1,32	46,32	0,1					
LAd ₂ – Ribeirão - PE																								
0-20	4,31	3,52	-0,79	0,15	0,2	0,09	0,03	1,83	6,52	0,54	7,06	7	77	0	32,53	0,36	2,58	25,4	0,68					
20-40	4,16	3,68	-0,48	0,22	0,04	0,03	0,01	2,02	12,18	0,23	12,41	2	89	0	14,9	0,29	1,25	18,2	0,71					
LAe – Petrolina - PE																								
0-20	6,37	5,47	-0,9	2,81	0,32	0,22	0,03	0,05	1,65	3,38	5,03	67	1	0	9,35	0,21	26,97	59,27	0,19					
20-40	5,66	4,79	-0,87	0,94	0,17	0,14	0,03	1,1	1,87	1,28	3,15	40	46	1	3,06	0,15	3,66	57,58	0,22					

Extração do Pi ligado ao alumínio (P-Al)

O resíduo de solo do tubo de centrífuga foi transferido para erlenmeyer de 125 mL, no qual foram adicionados 25 mL de NH_4F $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (pH 8,2), seguido de agitação em agitador horizontal por uma hora. Após esse período, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 1.800 rpm, e o sobrenadante filtrado em papel-filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL (extrato B). O resíduo de solo foi lavado duas vezes com porções de 12,5 mL de NaCl saturado e depois centrifugado. Essas soluções de lavagem foram misturadas com o extrato B, e o volume ajustado para 50 mL com água deionizada, no qual foi determinada a concentração de P e calculado o teor de P-Al no solo.

Extração do Pi ligado a ferro (P-Fe)

O resíduo de solo do tubo de centrífuga foi transferido para erlenmeyer de 125 mL, seguido da adição de 25 mL de NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e agitação por 17 h. Após esse período, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 1.800 rpm, e o sobrenadante, filtrado em papel de filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL (extrato C). O resíduo de solo foi lavado duas vezes com porções de 12,5 mL de NaCl saturado e, a seguir, centrifugado. Essas soluções de lavagem foram misturadas com o extrato C, e o volume foi ajustado para 50 mL com água deionizada. Para eliminar a turbidez do extrato C, adicionaram-se 4 mL de H_2SO_4 1 mol L^{-1} , seguido de agitação deste com bastão de vidro. Quando necessário, adicionaram-se gotas de H_2SO_4 concentrado até a floculação completa dos colóides. Na sequência, o extrato C foi centrifugado novamente durante 5 min a 1.800 rpm e filtrado em papel-filtro para obtenção de um extrato límpido a ser transferido para balão volumétrico de 50 mL. Em seguida, determinou-se a concentração de P no extrato C e calculou-se o teor de P-Fe no solo.

Extração do Pi ligado a cálcio (P-Ca)

O resíduo de solo remanescente da extração do P-Fe foi transferido para erlenmeyer de 125 mL, no qual foram adicionados 25 mL de H_2SO_4 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$; a seguir, a suspensão foi agitada durante uma hora. Após esse período, a suspensão foi centrifugada durante 10 min a 1.800 rpm e filtrada em papel-filtro, e o sobrenadante, transferido para balão volumétrico de 50 mL (extrato D). O resíduo de solo foi lavado duas vezes com porções de 12,5 mL de NaCl saturado e, em seguida, a suspensão foi centrifugada. Essas soluções de lavagem foram misturadas com o extrato D, e o volume, ajustado para 50 mL com água deionizada. Na sequência, foi determinada a concentração de P no extrato D e calculado o teor de P-Ca no solo.

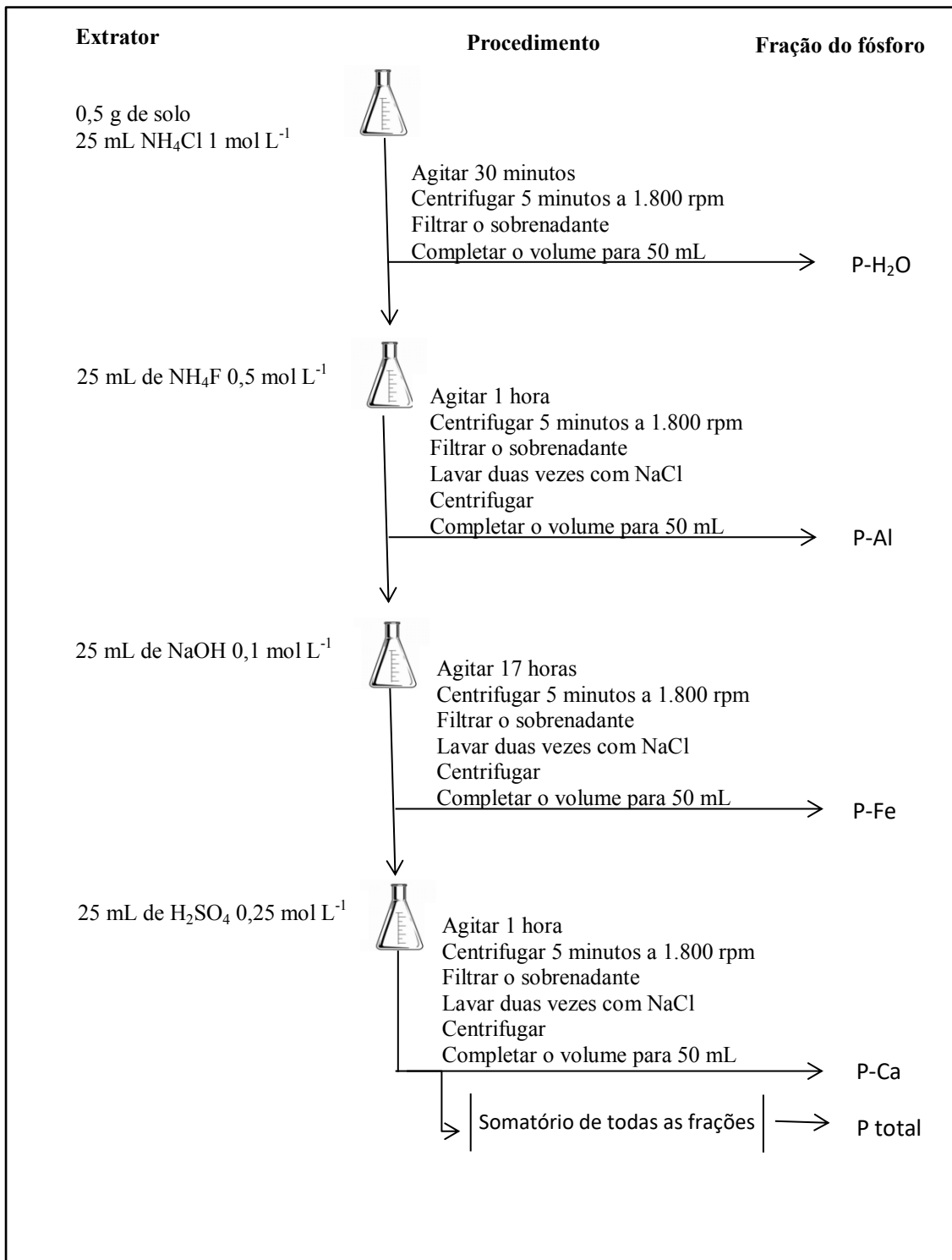


Figura 2. Esquema do fracionamento de fósforo inorgânico proposto Chang e Jackson (1957), com adaptações sugeridas por Souza Júnior et al. (2012)

A dosagem de P nos extratos foi feita por colorimetria, conforme Braga e Defelipo (1974). O Pi total (Pi-total) foi obtido mediante a soma dos teores de P-H₂O, P-Al, P-Fe e P-Ca. Os teores das frações de Pi em cada um dos sete solos foram determinados em quatro repetições, e a média foi calculada.

d) Fracionamento do P orgânico e inorgânico

Nas amostras de solo foi realizado o fracionamento químico de P de acordo com a metodologia de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com as modificações propostas por Condon, Goh e Newman (1985), e descrita por Gatiboni (2003). Amostras de 0,50 g foram extraídas, sequencialmente, com resina trocadora de ânions (placas AMI-7001S), NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹, NaOH 0,1 mol L⁻¹, HCl 1,0 mol L⁻¹ e NaOH 0,5 mol L⁻¹. Após as extrações anteriores, o solo remanescente foi seco em estufa e submetido à digestão com H₂SO₄ + H₂O₂ + MgCl₂ saturado (BROOKES; POWSON, 1981). O P inorgânico dos extratos alcalinos de NaHCO₃ e NaOH foi analisado pelo método de Dick e Tabatabai (1977). Nos extratos alcalinos foi determinado o P total por digestão com persulfato de amônio + ácido sulfúrico em autoclave (USEPA, 1971), sendo o Po obtido pela diferença entre P total e P inorgânico. O P dos extratos ácidos foi determinado segundo a metodologia de Murphy e Riley (1962). O procedimento laboratorial para realização do fracionamento de Hedley está apresentado de forma esquemática (Figura 3).

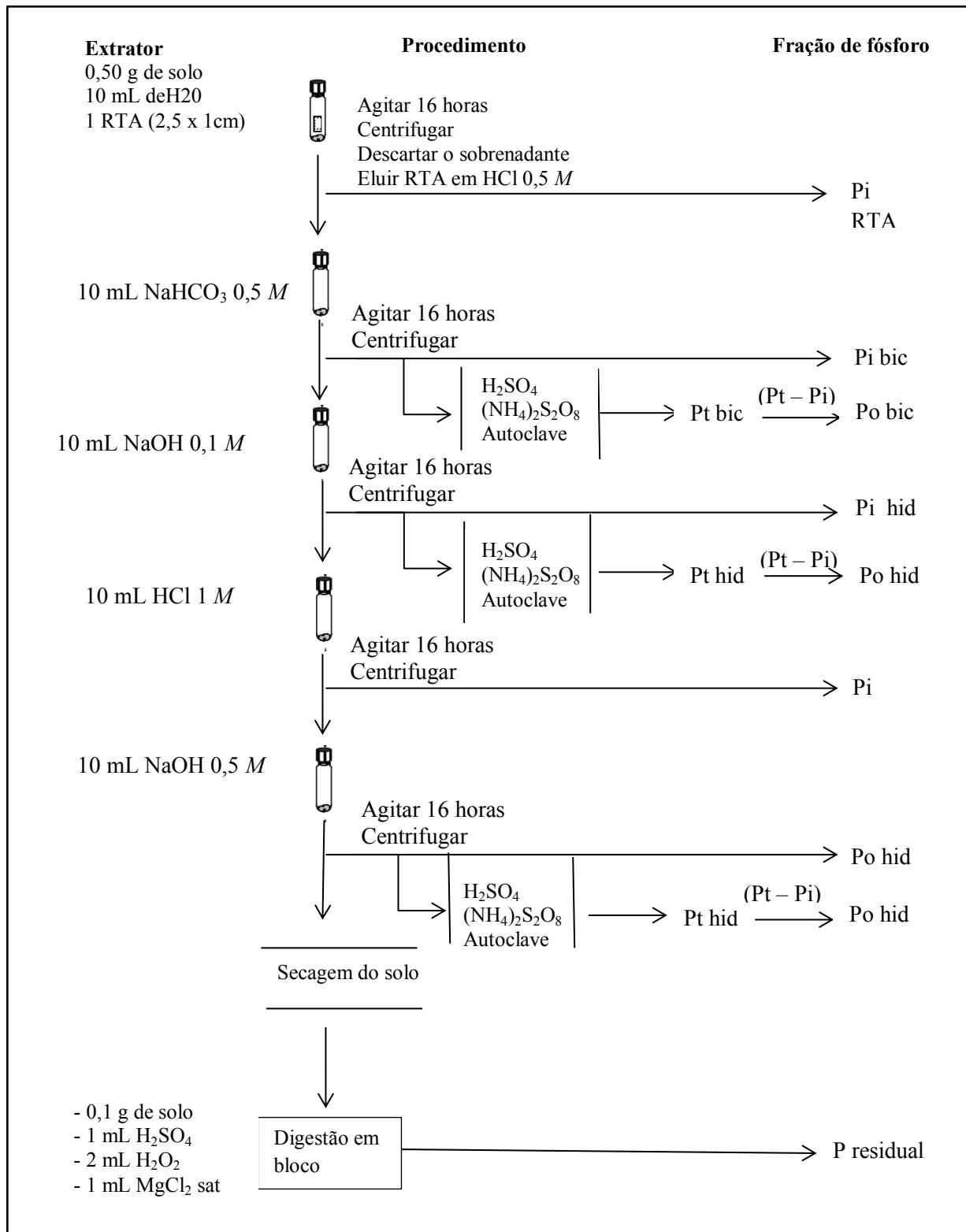


Figura 3. Esquema do fracionamento de P orgânico e inorgânico proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações de Condon, Goh e Newman, (1985). Fonte: Gatiboni (2003)

e) Análises mineralógicas

A caracterização mineralógica da fração argila foi determinada por difratometria de raios-x (JACKSON, 1969). As leituras das amostras foram realizadas em difratômetro equipado com tubo de cobre, utilizando-se radiação $\text{CuK}\alpha$ operado a 20 mA e 40 kV.

As formas livres de Fe foram extraídas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), pelo método de Mehra e Jackson (1960). Na extração dos óxidos mal cristalizados de Fe foi utilizado o oxalato ácido de amônio (CAMARGO et al., 1986). As formas cristalinas de Fe foram obtidas por diferença entre as formas extraídas por DCB e por oxalato. Os dados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Minerais da fração argila dos solos, teor de óxido de ferro extraído por Oxalato de Amônio (OA), Ditionito-Citrato- Bicarbonato (DCB) e sua relação

Solo	Prof. cm	Minerais	-----g kg ⁻¹ -----			
			Fe DCB	Fe oxa	Fe cristalino	Feoxa/FeDCB
VX ₁	0-20	Ct, Mi	20,49	1,59	18,9	0,07
	20-40	Ct, Mi	18,63	1,74	16,89	0,09
VX ₂	0-20	Es e Mi	16,93	6,74	10,19	0,40
	20-40	Es e Mi	19,82	5,74	14,08	0,30
CB	0-20	Mi, Ct e Gh	60,27	0,79	59,48	0,01
	20-40	Mi, Ct e Gh	67,14	0,64	66,5	0,01
LV	0-20	Ct, Gb, Gh e Hm	119,01	4,56	114,45	0,03
	20-40	Ct, Gb, Gh e Hm	146,07	6,99	139,08	0,04
LAd ₁	0-20	Mi, Ct e Gh	23,18	1,01	22,17	0,04
	20-40	Mi, Ct e Gh	46,57	0,81	45,76	0,01
LAd ₂	0-20	Ct, Gh, Gb	66,80	7,59	59,21	0,11
	20-40	Ct, Gh, Gb	71,17	7,03	64,14	0,10
Lae	0-20	Mi, Ct, Gh	16,30	0,77	15,53	0,04
	20-40	Mi, Ct, Gh	9,35	0,44	8,91	0,04

Es = esmectica; Mi = mica; Ct = caulinita; Gh = goethita; Gb = gibbsita, e Hm = hematita.

3.1.4. Tratamentos e condução do ensaio

Para avaliação da dinâmica de P, foram realizados três ensaios:

1. *Compartimentalização de P em função do tempo de incubação dos solos*

O experimento constou de 21 tratamentos: sete solos e três tempos de incubação com P (1, 20 e 40 dias). O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições, num esquema fatorial (7 x 3), totalizando 84 unidades experimentais para cada camada de solo. Nesse ensaio incubou-se com fósforo as camadas 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade e analisou-se cada camada de solo. As doses de P foram

determinadas para atender 100 % da CMAP de cada solo, conforme descrito na Tabela 5. Nesse experimento, o P foi fracionado utilizando-se o método proposto por Chang e Jackson (1957).

Tabela 5. CMAP, energia de ligação e dose de P utilizado na incubação dos solos

Solo	Prof. cm	CMAP	EA	Dose de P
		mg cm ⁻³	L mg ⁻¹	mg
VX ₁	0-20	0,69	0,09	690
	20-40	0,68	0,10	680
VX ₂	0-20	0,34	0,64	340
	20-40	0,46	0,31	460
CB	0-20	0,35	0,37	350
	20-40	0,41	0,63	410
LV	0-20	0,64	0,70	640
	20-40	1,67	1,31	1.670
LAd ₁	0-20	0,13	0,97	130
	20-40	0,10	0,20	100
LAd ₂	0-20	0,68	0,61	680
	20-40	0,71	0,74	710
LAe	0-20	0,19	0,18	190
	20-40	0,22	0,14	220

Para estudar o envelhecimento da labilidade de P, os solos descritos acima ficaram incubados por mais um período de tempo (1, 20, 40 e 60 dias) e avaliou-se apenas a camada subsuperficial (20-40 cm) com o objetivo de evitar a influência da matéria orgânica, que se concentra mais na camada superficial. Nesse caso o ensaio foi realizado com os sete solos e quatro tempos, com quatro repetições, totalizando 112 parcelas experimentais. Nesse ensaio, o P foi fracionado utilizando-se o método proposto por Hedley et al. (1982).

2. Compartimentalização de P com e sem calagem

Nesse experimento utilizaram-se apenas três solos que precisavam de calagem (LAe, LAd₁ e LAd₂). O experimento constou de três solos, com e sem calagem e quatro tempos de incubação de P (3 x 2 x 4), com quatro repetições, perfazendo 96 unidades experimentais. As parcelas foram distribuídas em delineamento de blocos ao acaso. Nesse ensaio incubou-se as camadas 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade e analisou-se cada camada de solo.

A dose de $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$, que foi utilizada para o tratamento que recebeu calagem, foi determinada por ensaio de incubação dos solos. Neste ensaio, $0,5 \text{ dm}^{-3}$ de cada solo que necessitou de calagem foi colocado em sacos plásticos com capacidade volumétrica de 1 dm^{-3} . Em seguida, foram aplicadas seis doses de $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ (P.A.) numa relação molar de 3:1. As doses foram calculadas de forma que corresponderam a 0, 1, 2, 3, 4 e 5 t ha^{-1} do corretivo.

O ensaio foi realizado com quatro repetições e os solos ficaram incubados por 60 dias, com a umidade mantida a 80% da capacidade de pote. Com isso obteve-se equações de regressão lineares de pH em função da quantidade do corretivo aplicado, estabelecendo-se a dose do corretivo que foi necessária para atingir o pH 6,0 para cada solo.

Com a conclusão da etapa anterior, amostras de TFSA de cada solo foram colocadas em sacos plásticos com capacidade volumétrica de 2 dm^{-3} . Em cada saco, foram colocados $1,0 \text{ dm}^{-3}$ de cada solo e aplicada a dose do corretivo obtida no ensaio de incubação da calagem apenas para o tratamento em que os solos precisavam ser corrigidos. Posteriormente, foi realizada a completa homogeneização do solo com o corretivo, e transferido para vasos de polietileno, onde ficaram incubados pelo período de tempo definido no ensaio da calagem. Durante esse período a umidade foi mantida a 80% da capacidade de pote. Para aplicar as mesmas condições experimentais para todos os tratamentos, os solos que não foram corrigidos também ficaram incubados e receberam o mesmo manejo dos que foram corrigidos.

Concluída a correção dos solos, em cada vaso contendo solo foi aplicada uma dose de P, calculada para atender 100% da CMAP (ALVAREZ et al., 2000). Após a aplicação, o P foi homogeneizado em todo o volume de solo de cada vaso, para garantir o completo contato dos solos com o P aplicado. A fonte de P utilizada para incubação dos solos foi o fosfato diácido de potássio [KH_2PO_4 (P.A.)].

Todos os solos foram incubados em um único dia. Para se obter amostras com diferentes períodos de equilíbrio solo-P, foram coletadas amostras de cada solo no primeiro dia de incubação e aos 20, 40 e 60 dias. Nestas amostras foi realizado o fracionamento de P inorgânico (Pi) pelo método proposto por Chang e Jackson (1957) até 40 dias e em todo o período pelo método proposto por Hedley et al. (1982).

3. *Compartimentalização de P sob cultivo de Braquiaria decumbens*

O experimento foi realizado em casa-de-vegetação, em três dos solos utilizados no primeiro ensaio (LAe, Lad₂ e LV). A escolha desses solos foi realizada de acordo com a

capacidade de fixação de P, sendo assim, escolheu-se o solo de maior (LA_{d2}) e o de menor (LA_e) capacidade de fixação de P dentre os solos do Nordeste e, para efeito de comparação utilizou-se o LV, do Centro-Oeste. Neste ensaio utilizou-se apenas a camada de 0-20 cm de cada solo.

Os tratamentos consistiram de três solos, dois modos de aplicação de P: em área total e localizado, combinados com duas fontes de P: superfosfato triplo (ST) e fosfato natural reativo (FR). A cultura utilizada foi a *Brachiaria decumbens* cv Basilisk. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições, num esquema fatorial ($3 \times 2 \times 2$), totalizando 48 unidades experimentais (vasos). A dose de P foi definida de forma que atendesse 100% da capacidade máxima de adsorção de P.

A caracterização física, química e mineralógica dos solos foi realizada quando da montagem do primeiro ensaio, assim como a necessidade de $CaCO_3/MgCO_3$ para elevar o pH do solo até 6,0.

O $CaCO_3/MgCO_3$ foi aplicado no solo e homogeneizado em 100% do volume de cada solo contido no vaso. Completado o período de reação do corretivo com o solo, procedeu-se a aplicação das diferentes fontes de P em diferentes modos: em área total, onde todo o volume do solo teve contato com o P aplicado; e localizado, onde o P foi concentrado em 30% do volume do solo contido no vaso (Figura 4). A localização do P foi realizada com o auxílio de um caixote de madeira, com as seguintes dimensões 10 cm x 11 cm x 7 cm (altura, largura e comprimento, respectivamente).

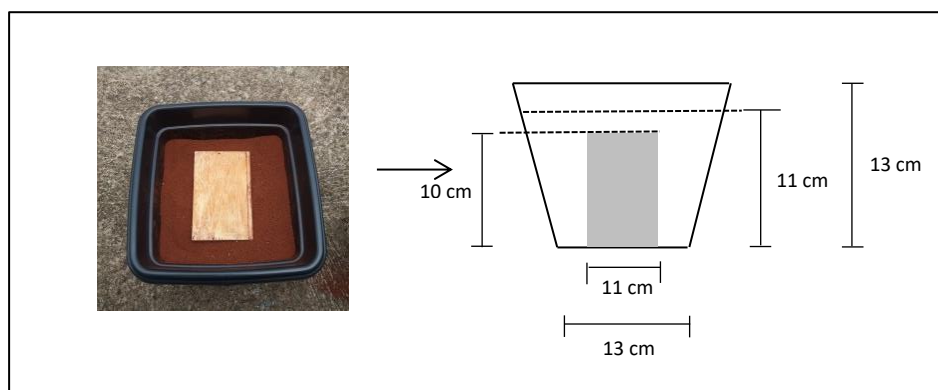


Figura 4. Vista aérea e transversal do vaso, indicando a região de localização do fósforo a 30% do volume do vaso

Em seguida foram semeadas cinco sementes por vaso, as quais foram colocadas na região central. Uma semana após a emergência das plântulas deixou-se apenas uma planta por vaso, escolhendo-se as mais uniformes.

O N e K foram aplicados na ocasião do plantio. A fonte de N utilizada foi o nitrato de amônio e a fonte de K foi o KCl. Um coquetel de micronutrientes e S foram aplicados, consistindo na seguinte adição: 1,2 mg dm⁻³ de cobre (CuSO_{4.5}H₂O), 1,5 mg dm⁻³ de ferro (FeSO_{4.7}H₂O), 4,0 mg dm⁻³ de zinco (ZnSO_{4.7}H₂O), 0,8 mg dm⁻³ de boro (H₃BO₃), 3,5 mg dm⁻³ de Mn (MnCl_{2.4}H₂O), 0,15 mg dm⁻³ de Mo (H₂MoO₃), e 60 mg dm⁻³ de S (Na₂SO₄).

No início e no final do cultivo foram retiradas amostras de solo, nas quais foram realizadas o fracionamento do P inorgânico nas formas precipitadas pela metodologia proposta por Chang e Jackson (1957), com adaptações sugeridas por Souza Júnior et al. (2012). Com isso, pode-se inferir de qual fração a planta foi suprida de P durante o experimento.

O corte das plantas foi realizado 40 dias após a semeadura. Após o corte, as plantas foram pesadas, determinando-se sua massa fresca, tanto da parte aérea como da raiz. Em seguida, foram secas em estufa a 65 °C até atingirem o peso constante para obtenção da massa seca. Concluída a etapa anterior, foram moídas em moinho tipo Willey. Os nutrientes P, K e Ca foram extraídos por digestão nitro-perclórica, sendo o P dosado por colorimetria, o K por fotometria de chama e o Ca por espectrofotometria de absorção atômica (EMBRAPA, 2009). Obtidos os teores desses nutrientes e massas secas, foram calculados seus respectivos conteúdos.

3.1.5. Análise estatística

Os dados dos teores de P de cada fração em solos corrigidos e não corrigidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Quando os efeitos principais e, ou, as interações foram significativas realizaram-se os desdobramentos necessários e se aplicou o teste de médias de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Foram feitas correlações entre as formas de P e as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Compartmentalização de P em solos de diferentes mineralogias

Os solos apresentaram diferença quanto aos teores de P inorgânico total (Pi-total), com valores variando de 11,94 a 34,75 mg kg⁻¹ (Tabela 6). Os maiores teores dessa fração foram observados no VX₁ e VX₂, com 34,75 e 26,75 mg kg⁻¹, respectivamente. Teores de Pi total diferenciados entre os solos, podem ser atribuídos, provavelmente, ao teor de argila, ao

material de origem destes e às condições ambientais que cada um encontra-se inserido (REDEL et al., 2016; ANTONIADIS et al., 2016).

Tabela 6. Teores de P das frações de P inorgânico em solos de diferentes mineralogias

Solo	Prof. cm	Pi-Total ⁽¹⁾	P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca
-----mg kg ⁻¹ -----						
VX ₁	0-20	34,75	8,41(24)	2,05 (6)	5,51 (16)	18,78 (54)
	20-40	26,83	7,77 (29)	1,85 (7)	5,06 (19)	12,15 (45)
VX ₂	0-20	26,75	7,51 (28)	0,34 (1)	2,40 (9)	16,5 (62)
	20-40	27,46	7,38 (27)	0,34 (1)	1,24 (5)	18,5 (67)
CB	0-20	11,94	7,77 (65)	0,54 (5)	1,24 (10)	2,39 (20)
	20-40	14,20	7,90 (56)	0,14 (1)	4,09 (29)	2,07 (15)
LV	0-20	17,58	6,62 (38)	0,24 (1)	9,06 (52)	1,66 (9)
	20-40	17,83	8,15 (46)	2,46 (14)	4,09 (23)	3,13 (18)
LAd ₁	0-20	12,68	7,04 (56)	1,65 (13)	1,60 (13)	2,39 (19)
	20-40	15,24	7,77 (51)	1,35 (9)	4,92 (32)	1,20 (8)
LAd ₂	0-20	15,90	6,74 (42)	0,14 (1)	5,42 (34)	3,60 (23)
	20-40	14,30	5,33 (37)	4,50 (31)	0,89 (6)	3,58 (24)
Lae	0-20	14,23	6,74 (47)	2,05 (14)	2,04 (14)	3,40 (24)
	20-40	15,54	8,41 (54)	1,45(9)	3,38 (22)	2,30 (15)

⁽¹⁾Pi total = P-H₂O + P-Al + P-Fe + P-Ca. Valores em parêntese são expressos em percentagem e referem-se à contribuição de cada fração de Pi para o Pi-Total

Nos solos analisados, a fração P solúvel apresentou o maior teor de P dentre as demais frações, com exceção do VX₁ e VX₂, que apresentaram o maior teor de P na fração P-Ca. Dentre os solos que tiveram maior representatividade da fração P solúvel, o LAe e CB foram os que apresentaram maior teor de P, com valores percentuais de 54 e 65 % do Pi- total, respectivamente (Tabela 6). Comumente vê-se na literatura baixos teores de P solúvel em solos com alto grau de desenvolvimento pedogenético (RANNO; SILVA; MALLMANN, 2007; SOUZA JÚNIOR et al., 2012), no entanto, nem sempre isso irá ocorrer, já que a fixação de P é dependente, em grande parte, dos constituintes mineralógicos que compõem a fração argila dos solos (BROGGI et al., 2010), bem como da concentração de elementos, como Fe, Al e Ca, que possam a vir precipitar com P.

As frações P-Al e P-Fe foram mais expressivas na camada de 20-40 cm do LAd₂ e LV, que são solos de alto teor de argila, baixo pH e bastante intemperizados. Além dessas características, vale ressaltar que esses solos apresentaram altos teores de ferro livre (Fe-DCB) (Tabela 4), levando a uma maior fixação de P, em decorrência da precipitação desse elemento com o Fe, como verificado por Antoniadis et al. (2016), em solos da Grécia Central.

Os solos alcalinos (VX₁, CB e VX₂) apresentaram baixos teores de P precipitado com alumínio, não ultrapassando 7%. Por outro lado, nesses solos a fração P-Fe foi representativa, estando condizente com os altos teores de Fe na sua forma livre (Tabela 4).

Na fração P-Ca, os vertissolos (VX₁ e VX₂) apresentaram o maior teor de P, com valores percentuais na camada superficial de 54 e 62 %, respectivamente, estando condizente com os altos teores de Ca nesses solos. Resultado semelhante foi observado por Souza Júnior et al. (2012), que ao avaliarem solos de diferentes graus de intemperismo, verificaram em solos de pH neutro a alcalino que a fração P-Ca foi a predominante, representando em média 55% do Pi- total.

4.2. Relações entre os diferentes indicadores de capacidade tampão de fosfato dos solos e as frações de P inorgânico (Pi)

De um modo geral, as frações de P dos solos não se correlacionaram com os indicadores de capacidade tampão de fosfato (Tabela 7). A fração P-H₂O (P prontamente disponível) apresentou uma correlação negativa com a fração P-Al (Tabela 6), sugerindo que nesses solos os minerais responsáveis pela fixação de P foram alumínicos, como a gibbsita, que foi encontrada nos solos LV e LAd₂ (Tabela 4). A presença de minerais férricos, como goethita e hematita, encontrados na maioria dos solos (Tabela 4), não influenciou a fixação de P.

Tabela 7. Correlação simples de Pearson entre frações de P dos solos e indicadores da capacidade tampão de fosfato

	P-total ¹	P-H ₂ O ¹	P-Al ¹	P-Fe ¹	P-Ca ¹	Argila	P-rem ²	CMAP ³	EA ⁴	Fe-Oxa ⁵	Fe-DCB ⁶	COT ⁷
P-total	-	0,324 ^{ns}	-0,123 ^{ns}	0,266 ^{ns}	0,934 ^{ns}	0,459°	-0,315 ^{ns}	0,219 ^{ns}	-0,330 ^{ns}	0,220 ^{ns}	-0,327 ^{ns}	-0,334 ^{ns}
P-H ₂ O	-	-	-0,574*	0,212 ^{ns}	0,215 ^{ns}	-0,274 ^{ns}	0,186 ^{ns}	-0,016 ^{ns}	-0,234 ^{ns}	-0,473°	-0,191 ^{ns}	-0,481°
P-Al	-	-	-	-0,145 ^{ns}	-0,175 ^{ns}	0,106 ^{ns}	-0,310 ^{ns}	0,363 ^{ns}	0,174 ^{ns}	0,361 ^{ns}	0,133 ^{ns}	0,323 ^{ns}
P-Fe	-	-	-	-	-0,060 ^{ns}	0,088 ^{ns}	-0,259 ^{ns}	0,304 ^{ns}	-0,007 ^{ns}	0,054 ^{ns}	0,409 ^{ns}	0,236 ^{ns}
P-Ca	-	-	-	-	-	0,479°	-0,219 ^{ns}	0,065 ^{ns}	-0,340 ^{ns}	0,222 ^{ns}	-0,473°	-0,412 ^{ns}
Argila	-	-	-	-	-	-	-0,839***	0,582*	0,259 ^{ns}	0,697**	0,339 ^{ns}	0,058 ^{ns}
P-rem	-	-	-	-	-	-	-	-0,869***	-0,528*	-0,686**	-0,650*	-0,091 ^{ns}
CMAP	-	-	-	-	-	-	-	-	0,549*	0,587*	0,719**	-0,027 ^{ns}
EA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,540*	0,705**	0,298 ^{ns}
Fe-Oxa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,448°	0,320 ^{ns}
Fe-DCB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,299 ^{ns}
COT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Frações de P inorgânico (Chang & Jackson, 1957); ²P remanescente; ³Capacidade máxima de adsorção de P; ⁴Energia de adsorção; ⁵Fe oxalato (Fe amórfio); ⁶Fe ditionito-citrato-bicarbonato (Fe total); ⁷C orgânico total. °, *, ** e *** significativos a 10, 5, 1 e 0,1%, respectivamente. ^{ns} Não significativo

Na Literatura, relação entre minerais gibbsíticos, goethíticos e hematíticos com a fixação de P são muito discutidas (GÉRARD, 2016; FINK et al., 2016a; FINK et al., 2016b). Estudo realizado por Wei et al. (2014), mostrou que a gibssita foi a mais responsável pela restrição a desorção de P lábil do solo. O comportamento qualitativo da gibssita, como indicadora da fixação de P, também foi constatado por Lins, Cox e Souza (1989) em solos do Cerrado brasileiro.

O teor de argila dos solos se correlacionou com o P-rem (Tabela 7). O surgimento da análise do P-rem, como estimador da capacidade tampão de fosfato dos solos, em substituição ao teor de argila, ocorreu com a justificativa de que a fixação de P se relacionava melhor com a qualidade da argila e não apenas com a quantidade (ALVAREZ et al., 2000). Por essa perspectiva, não se esperaria que o relacionamento entre esses dois estimadores da capacidade tampão de fosfato dos solos fosse bom. Nesse estudo, com solos de diferentes mineralogias (Tabela 4), teores de P-rem variando de 5,08 a 59,27 mg L⁻¹ (Tabela 3) e teores de argila variando de 141 a 567 g kg⁻¹, a relação entre as variáveis foi muito significativa ($r = -0,839^{***}$) (Tabela 7), sugerindo que a determinação de um desses indicadores pode ser utilizada para estimar adequadamente o outro. Freire (2001) mostrou o relacionamento entre argila e P-rem em muitas amostras de solo no Brasil e constatou que o relacionamento se aprimora em solos de maiores teores de argila.

No entanto, o melhor estimador da capacidade tampão de fosfato dos solos foi o P-rem por ter apresentado uma melhor correlação com a CMAP, EA, Fe-Oxa e Fe-DCB. Outros estudos (BONFIM et al., 2004; BROGGI et al., 2010; SIMÕES NETO et al., 2015) também constataram que o P-rem estimou melhor a CMAP e o FCP. Simões neto et al. (2015) sugeriram que em laboratório de rotina de fertilidade do solo no Brasil, a realização da análise do P-rem para estimar a capacidade tampão de fosfato é mais vantajosa do que a determinação de argila.

Os teores dos óxidos de Fe (Fe-Oxa e Fe-DCB) também se correlacionaram com a CMAP e a EA (Tabela 7), sugerindo que são bons indicadores da capacidade tampão de fosfato desses solos. Vários estudos têm confirmado a importante contribuição de óxidos de Fe no processo de fixação de P, especialmente aqueles de baixa cristalinidade e com alto desbalanço de cargas (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008), excedendo, normalmente, a contribuição da caulinita, ilita e montmorilonita.

Em um estudo realizado por Wei et al. (2014) comparando a adsorção de fosfato entre a caulinita e goethita, foi possível verificar que a capacidade máxima de adsorção para as

partículas de goethita foi de aproximadamente 300 mmol/g, seis vezes maior que na caulinita, que apresentou capacidade de adsorver P na ordem de aproximadamente 50 mmol/g.

4.3. Compartimentalização de P inorgânico (Pi) em solos de diferentes mineralogias

A compartimentalização do P inorgânico (Pi) dos solos não era muito diferente em sua condição natural antes da incubação com P, com exceção dos Vertissolos (VX₁ e VX₂) (Tabela 6). Com a incubação, a compartimentalização tornou-se variável entre solos após cada período de incubação, e variou também com o tempo de incubação (Figura 5).

No primeiro dia após a incubação, em todos os solos houve um aumento da fração P-H₂O, P-Al e P-Fe, porém com pouca alteração do P-Ca, tanto na camada 0-20 cm de profundidade, como na camada 20-40 cm (Figura 5). Os solos se diferenciaram na locação do P aplicado, tendo o VX₁ na camada 0-20 cm de profundidade e o LV na camada 20-40 cm locado mais P na forma disponível (Figura 5). Ambos são cauliniticos, porém com o VX₁ tendo um importante componente de argila 2:1 (mica) e o LV gibsítico, goethítico e hematítico (Tabela 4). O caráter caulinitico de ambos pode ter favorecido a compartimentalização do P-H₂O e a presença de gibbsita favorecido o compartimento P-Al no LV. Nesse tempo de incubação, o compartimento P-Fe foi pouco alterado em todos os solos e o compartimento P-Ca não foi alterado.

O aumento do tempo de incubação modificou a compartimentalização de P, e o P-H₂O se distribuiu entre as outras frações de P, como P-Al (LV e LAd₂) e P-Ca (VX₁ e VX₂). A migração para P-Fe foi pequena e se concentrou mais no LV e LAd₂. A migração para o compartimento P-Al foi rápida, para o P-Ca foi moderada e para o P-Fe parece ser mais lenta, podendo essa última ser favorecida com o maior tempo de incubação.

É notório que, de forma geral, houve maior alocação de P nas formas precipitadas com Al, Fe e Ca na camada mais subsuperficial (20-40 cm). O menor teor de P nesses compartimentos supracitados na camada de menor profundidade (0-20 cm) pode ser atribuído à contribuição dos compostos orgânicos no solo, já que os ácidos orgânicos são capazes de bloquear as hidroxilas expostas na superfície dos minerais, diminuindo a fixação do P no solo, e conseqüentemente, aumentando a sua disponibilidade, como foi observado por Kurnain (2016) ao estudar adsorção de P em solos goethíticos da Indonésia.

Quando se estudou a variação do tempo de incubação para cada solo (Figura 6), evidenciou-se a migração do P-disponível para P-Al no LV e LAd₂ e para P-Ca nos Vertissolos. Resultado semelhante foi encontrado em um estudo realizado em solos da Paraíba, onde os autores observaram que nos Latossolos, ou seja, solos mais intemperizados,

houve aumento considerável de P precipitado com alumínio, enquanto que nos Vertissolos a fração P-Ca foi predominante (SOUZA JÚNIOR et al., 2012).

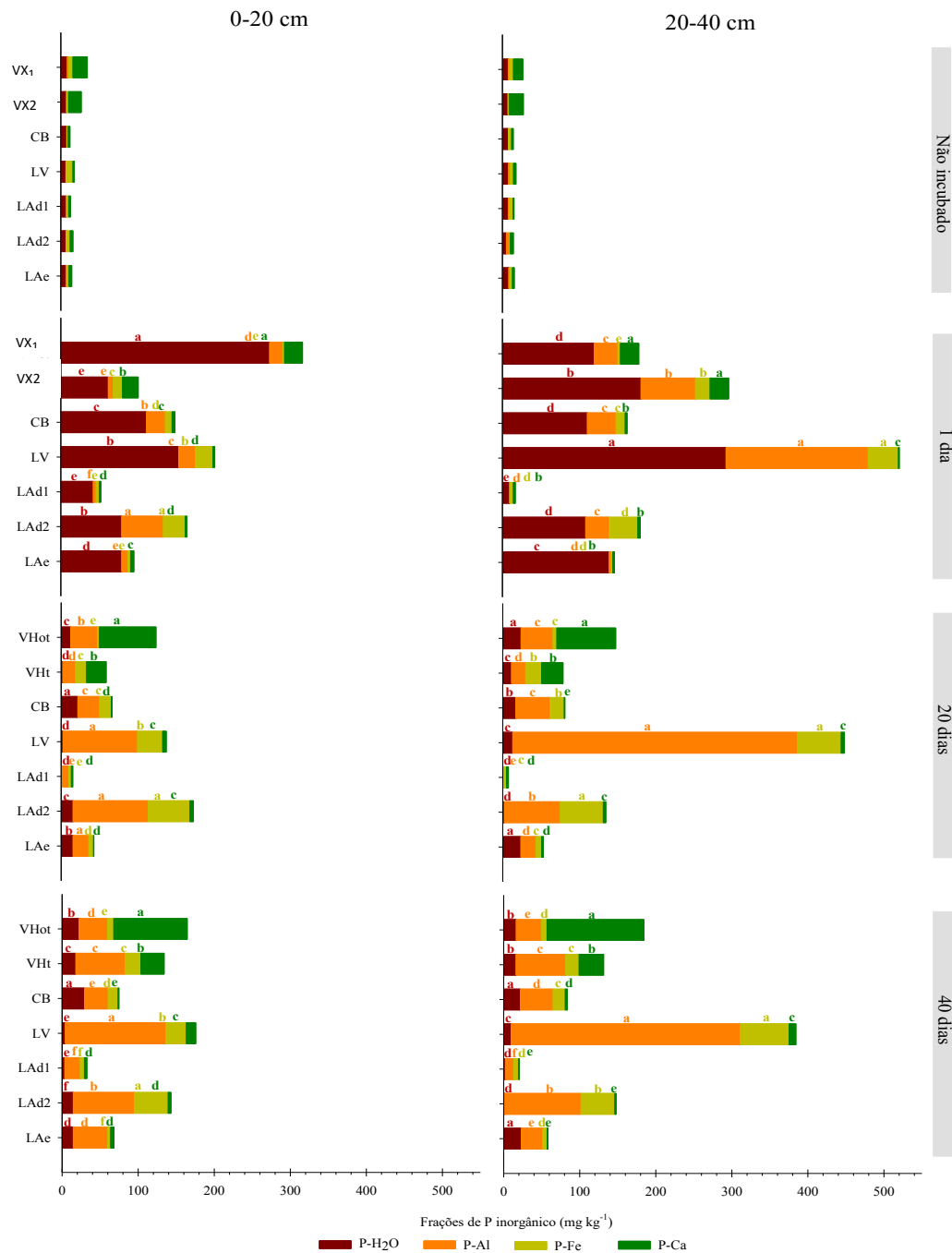


Figura 5. Teores de P inorgânico referentes às frações P solúvel, P ligado ao Al, P ligado ao Fe e P ligado ao Ca a 0, 20 e 40 dias de incubação do P na camada de 0-20 cm de profundidade dos solos em estudo

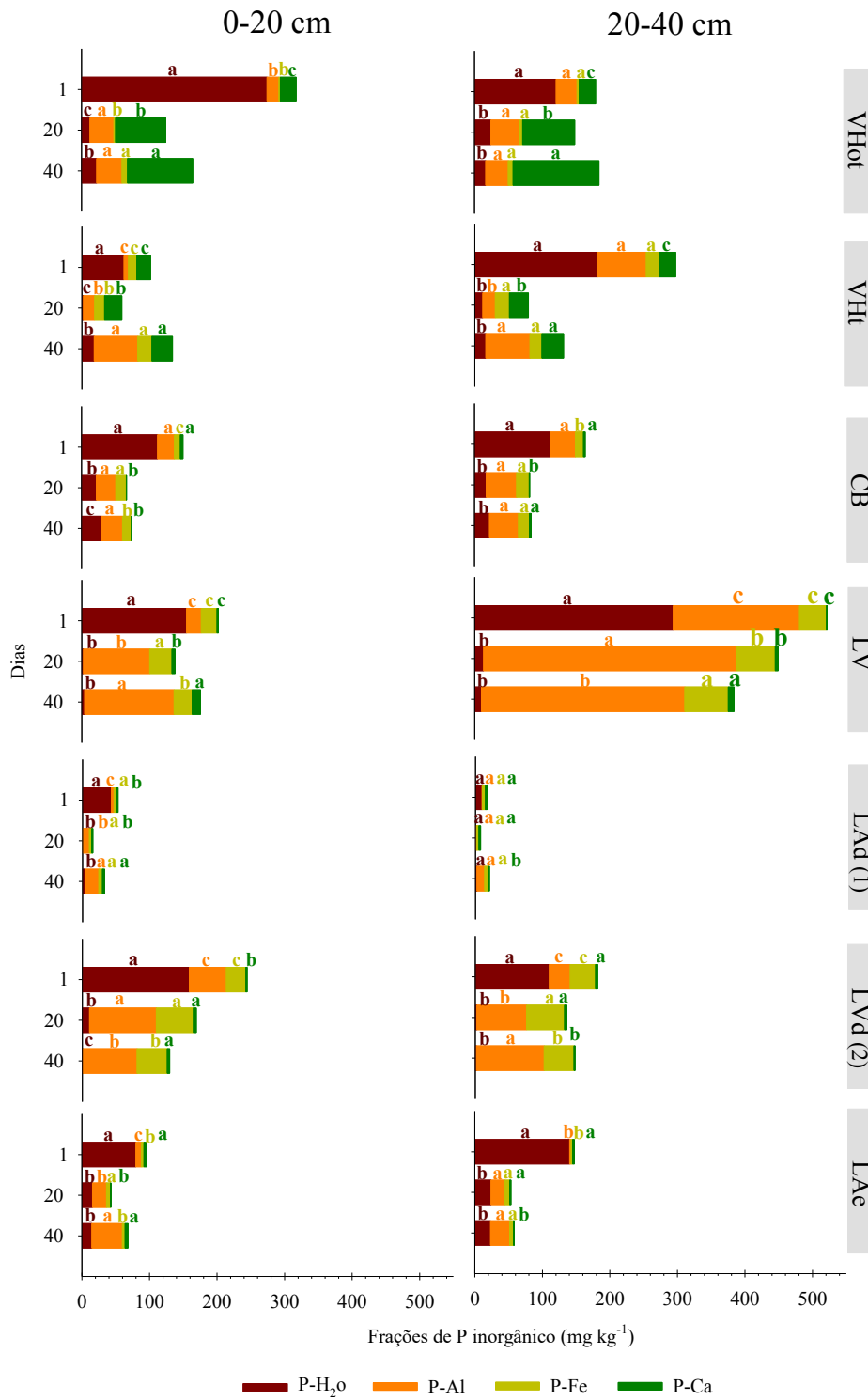


Figura 6. Desdobramento do tempo dentro de cada solo. Método Chang e Jackson, 1957

4.4. Agrupamento de solos de diferentes mineralogias em função dos indicadores de capacidade tampão de fosfato

Estudou-se como os solos se agruparam em relação aos indicadores de fixação de P (Figura 7). Na camada superficial (0-20 cm de profundidade) (Figura 7A), formou-se quatro grupos de solos: a. LV e LAd₂ foram os solos mais influenciados pelos indicadores de capacidade tampão de P; b. Os vertissolos, VX₁ e VX₂, foram influenciados pelo P-Ca; c. O CB e o LAd₁ foram pouco influenciados; e d. O LAe não se agrupou. Isso sugere que a mineralogia dos solos foi responsável pelo agrupamento: Os solos LV e LAd₂ são caulíníticos, com a presença de óxidos de Al e Fe; Os vertissolos têm muita argila 2:1 (mica), sendo o VHt mais esmectítico e o VHot mais caulínítico; e o LAe, CB e LAd₁ são caulíníticos com presença de goethita (Tabela 4). Esse grupo foi o menos fixador de P e são largamente encontrados nos empreendimentos agrícolas do Nordeste do Brasil (Figura 2).

Na camada subsuperficial (Figura 7B), onde a influência da matéria orgânica foi menor, o agrupamento se tornou mais evidenciado com a maior separação dos solos. O LV e o LAd₂, que apesar de serem caulíníticos, o LV é mais gibsítico do que o LAd₂, além de expressar picos de hematita. Os Vertissolos se separam mais, evidenciando a condição mais esmectítica do VX₁ e caulínítica do VX₂. O LAe, CB e LAd₁ se agruparam ainda mais nessa camada, pela maior semelhança mineralógica (Tabela 4).

Analisando, os componentes de P indicadores da capacidade tampão de fosfato e a distribuição dos solos, evidenciou-se o maior relacionamento do LV com a CMAP, EA, Fe-DCB e P-Al; O LAd₂ relacionou-se mais com o Fe-Oxa, argila e P-Al; O VHot e VHt se relacionaram com o P-Ca e o P-rem; O LAe, CB e LAd₁ se relacionaram com o P-Fe e P-rem. Esses agrupamentos permitiram identificar que os solos mais fixadores foram aqueles que se relacionaram com o P-Al; Os solos moderadamente fixadores foram aqueles que se relacionaram com o P-Ca; e os menos fixadores foram os que se relacionaram com o P-Fe.

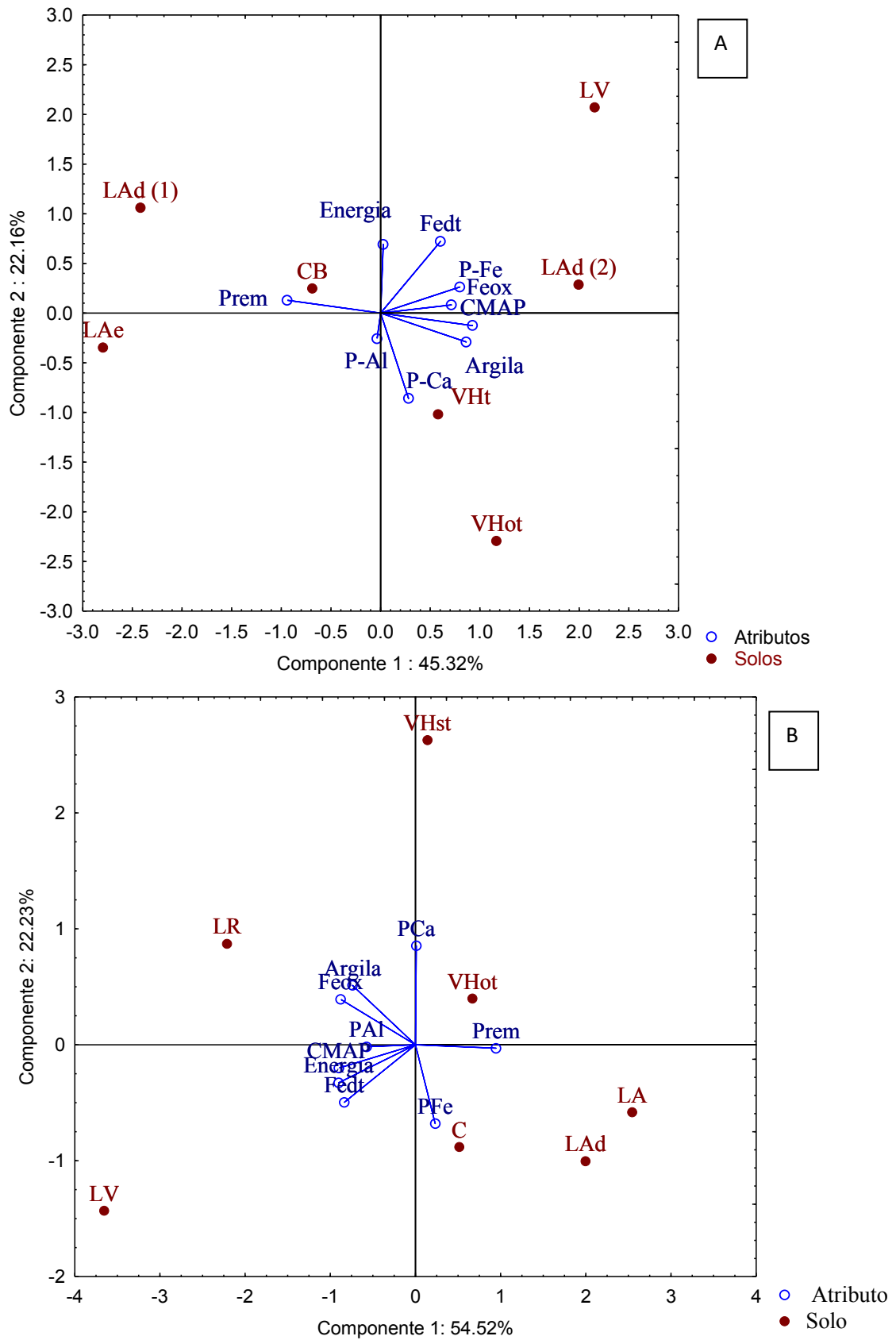


Figura 7. Análise de componentes principais (ACP) dos solos a partir das variáveis indicadoras de capacidade de fixação

4.5. “Envelhecimento” da labilidade de P em solos de diferentes mineralogias

A labilidade de P orgânico e inorgânico foi diferenciada nos diferentes solos estudados ao longo do tempo. De modo geral, verificou-se que houve decréscimo do compartimento lábil ao longo do tempo, diferentemente do compartimento não lábil, que apresentou aumento do teores de P à medida em que aumentou o tempo de incubação de P, com exceção do VX₁ e VX₂. No primeiro dia de incubação do P, nota-se, pelas análises de regressão, que o LV foi o solo que apresentou maior teor de P lábil, apesar de ter sido o solo que mais expressou características indicadoras de fixação de P (Tabela 3). Isso pode ser explicado pelo fato de esse solo ter recebido maior dose de P, e de a primeira análise sequencial de P ter sido realizada no mesmo dia de incubação do P, não favorecendo uma adsorção considerável desse elemento pelos colóides do solo. No LV pode-se observar que aos 40 dias de incubação de P, mais da metade do P disponível já tinha sido distribuídas para o compartimento não lábil.

O LAe apresentou o menor teor de P na fração solúvel, o que estar de acordo com a baixa dose de P recebida por esse solo. O comportamento mais diferenciado foi verificado no Lad₁, que teve os teores de P na fração lábil quase que constante, estando de acordo com baixa CMAP desse solo (0,20 mg L⁻¹).

Quanto ao compartimento não lábil, verificou-se que os solos que apresentaram maior teor de P foi LAe, LAd₂ e LV, neste último a velocidade de fixação foi maior, onde aos 40 dias de incubação de P, mais da metade desse elemento já tinha sido fixado. Isso condiz com a sua alta capacidade de fixação, resultante dos elevados teores de Fe e Al contidos nele.

O VX₁ e o VX₂ tiveram sua fração não lábil inalterada, durante todo o período de tempo. Isto ocorreu porque a fração moderadamente lábil, representada pelo P inorgânico contido no fosfato de cálcio, foi a mais expressiva nesses solos, já que tem suas origens a partir do carbonato de cálcio.

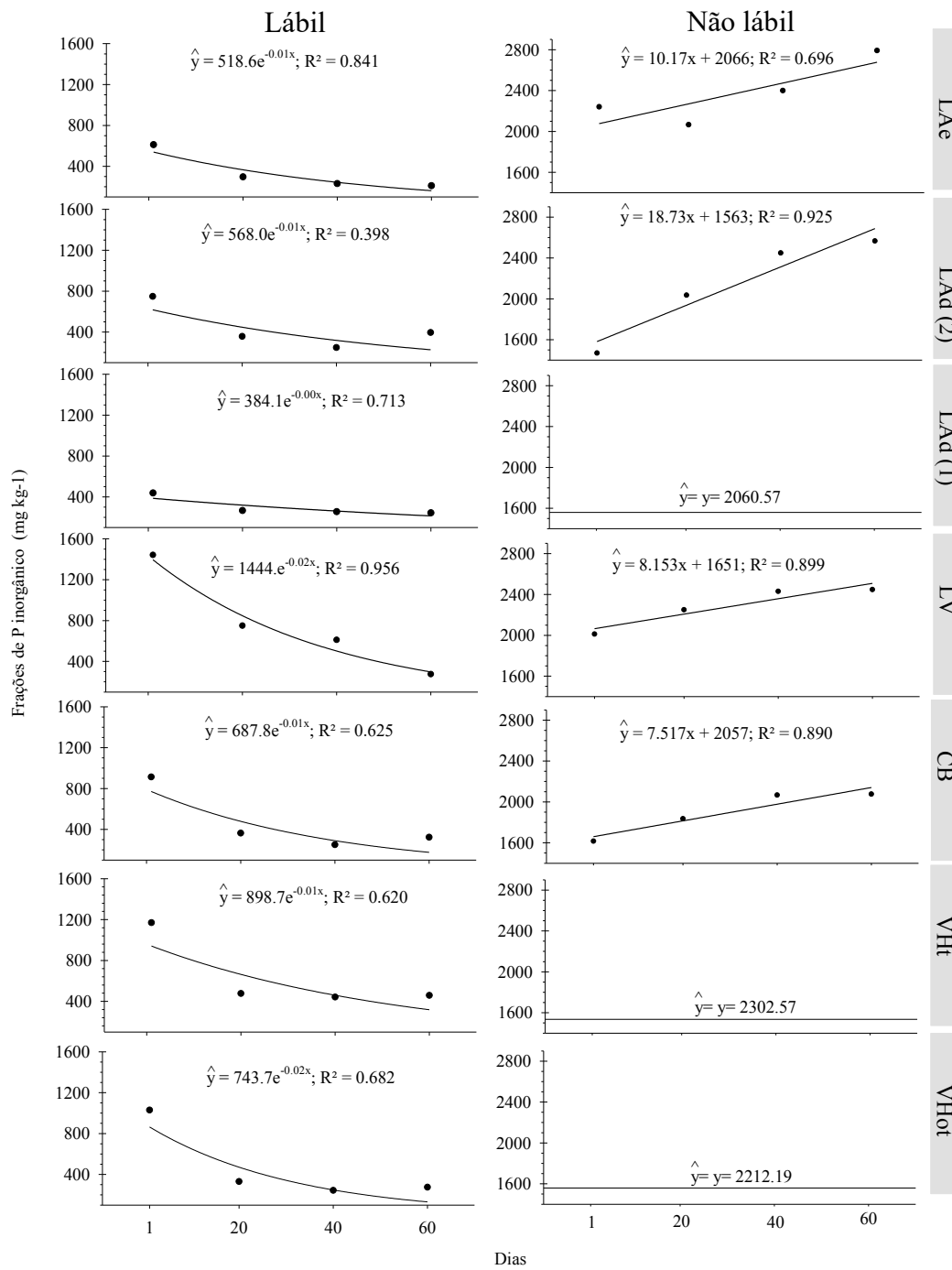


Figura 8. P lábil e não lábil em função do tempo de incubação das amostras de solo

4.6. Calagem de solos de diferentes mineralogias: efeitos na compartimentalização de P inorgânico (Pi) em função do tempo de incubação

O efeito da calagem na camada superficial dos solos sobre a compartimentalização de P em função do tempo de incubação do P aplicado foi pouco evidente, porque nessa camada há efeito da matéria orgânica, que dependendo de seu estágio de decomposição pode interferir na dinâmica de P do solo. No entanto, de modo geral constatou-se que a calagem promoveu o deslocamento do P-Al, P-Fe, P-Ca, principalmente no LAd₂. Portanto, pode-se inferir que a calagem favoreceu a disponibilidade de P. Vale salientar que a aplicação de P em solos corrigidos com calcário inicialmente (primeiro dia) promoveu redução do P-H₂O, embora tenha também reduzido as frações de P-Al e P-Ca. Se o P liberado dessas frações não migrou para a fração P-H₂O, outras formas de P podem ter sido favorecidas, como por exemplo, P-orgânico.

Na camada subsuperficial, menos influenciada pela matéria orgânica e normalmente baixo valor de pH, ficou mais evidente a ação da calagem sobre as frações de P-Al, P-Fe e P-Ca, mostrando migração para P-H₂O. A calagem promoveu aumento da disponibilidade de P, sugerindo sua recomendação no manejo da adubação fosfatada.

A calagem interfere, principalmente, na atividade de H e Al³⁺ da solução do solo. Carbonatos de cálcio e magnésio, na presença de água, sofrem ionização e promovem a hidrólise da água, ocasionando o ânion hidroxila. Isto ocorre devido à presença do ânion acompanhante CO₃²⁻, que é a base conjugada de um ácido fraco. A hidroxila reage tanto com os íons H⁺ como Al³⁺, reduzindo suas quantidades na solução do solo, e conseqüentemente, na superfície das partículas (ALLEONI et al., 2009). Em um estudo realizado com experimento de calagem em depósitos quaternários, os autores verificaram aumento da solubilidade de P em detrimento dos teores de Al e Fe (SIMONSSON et al., 2018).

Tabela 8. Compartimentalização de P em solos de diferentes mineralogias ao longo do tempo em função da aplicação de calcário na camada superficial (0-20 cm de profundidade)

Solo	P-H ₂ O		Média	P-Al		Média	P-Fe		Média	P-Ca		Média
	S/C ¹	C/C ²		S/C	C/C		S/C	C/C		S/C	C/C	
	Um dia de incubação											
	mg kg ⁻¹											
LAc ³	80,03 Ab	80,03 Ab	80,03	8,11 Ab	8,11 Ab	8,11	3,61	3,61	3,61 a	4,14	4,14	4,14 A
LAd ⁴	42,60 Ac	39,31 Ac	40,95	3,94 Ac	2,06 Bc	3	4	4,53	4,26 a	1,93	1,57	1,75 B
LAd ⁵	158,36 Aa	123,80 Ba	141,08	54,82 Aa	26,54 Ba	40,68	28,84	38,74	33,79 b	1,84	0,92	1,38 B
Média	93,66	81,05		22,29	12,24		12,15	15,63		2,64 A	2,21 B	
Solo	F			F			F			F		
	922,939***			7377,940***			35,685***			139,799***		
Calagem	43,242***			1339,034***			1,087 ^{ns}			8,197**		
Solo × Calagem	32,975***			1103,928***			0,929 ^{ns}			3,174 ^{ns}		
CV (%)	5,38			3,9			58,76			15,18		
	20 dias de incubação											
LAc ¹	15,67	15,67	15,67 a	20,68 Ab	20,68 Ab	20,68	6,18 Ab	6,18 Ab	6,18	0,34	0,34	0,34 c
LAd ²	0,4	2,85	1,63 c	9,69 Ac	10,94 Ac	10,31	3,38 Ac	3,38 Ac	3,38	1,69	1,06	1,37 b
LAd ³	10,58	9,62	10,10 b	98,91 Ba	118,17 Aa	108,54	54,85 Aa	49,95 Ba	52,4	420	4,65	4,42 a
Média	8,88	9,38		43,09	49,93		21,47	19,84		2,08	2,02	
Solo	F			F			F			F		
	51,241***			1269,512***			9221,814***			65,443***		
Calagem	0,189 ^{ns}			15,283***			24,368***			0,039 ^{ns}		
Solo × Calagem	0,791 ^{ns}			12,662***			24,368***			1,062 ^{ns}		
CV (%)	30,59			9,21			3,93			36,28		

Sem calagem; ²Com calagem; ³Latossolo Amarelo eutrófico; ⁴Latossolo Amarelo distrófico; ⁵Latossolo Amarelo distrófico. *, **, e *** significativo a 5, 1, 0,1%, respectivamente. ^{ns}Não significativo.

(Continua)

Tabela 9. Compartimentalização de P em solos de diferentes mineralogias ao longo do tempo em função da aplicação de calcário na camada superficial (0-20 cm de profundidade)

Solo	P-H ₂ O		Média	P-Al		Média	P-Fe		P-Ca		Média	
	S/C ¹	C/C ²		S/C	C/C		S/C	C/C	S/C	C/C		
	40 dias de incubação											
LAc ¹	15,61	14,71	15,16 a	45,26	45,26	45,26 b	3,89 Ab	3,89 Ac	3,89	3,16 Aa	3,16 Aa	3,16
LAd ^{1 2}	3,68	2,96	3,32 b	20,31	14,45	17,38 c	5,37 Ab	6,57 Ab	5,97	3,77 Aa	4,26 Aa	4,02
LAd ^{2 3}	0,81	1,87	1,34 c	80,19	81,56	80,87 a	44,63 Aa	40,37 Ba	42,5	3,44 Aa	0,59 Bb	2,01
Média	6,7	6,51		48,59	47,09		17,96	16,94		3,46	2,67	
		F		F			F			F		
Solo	339,607****			28,740****			3543,055****			13,601****		
Calagem	0,154 ^{ns}			0,048 ^{ns}			5,846*			6,221*		
Solo × Calagem	1,782 ^{ns}			0,104 ^{ns}			15,474****			10,904****		
CV (%)	17,36			35,1			5,91			25,2		

¹Com calagem; ²Latosso Amarelo eutrófico; ³Latosso Amarelo distrófico 1; ⁴Latosso Amarelo distrófico 2; ⁵Latosso Amarelo distrófico 3; *, ** e *** significativos a 5, 1 e 0,1%, respectivamente. ^{ns} Não significativo.

(Conclusão)

Tabela 10. Compartimentalização de P em solos de diferentes mineralogias ao longo do tempo em função da aplicação de calcário na camada subsuperficial (20-40 cm de profundidade)

Solo	P-H ₂ O		Média	P-Al		Média	P-Fe		Média	P-Ca		Média
	S/C ¹	C/C ²		S/C	C/C		S/C	C/C		S/C	C/C	
Um dia de incubação da aplicação de P												
LAe ³	140,46 Aa	95,08 Bb	117,77	27,98 Aa	12,82 Ba	3,58	2,22 Ab	1,95 Ac	2,09	2,39 Ab	2,85 Aa	2,62
LAd ₁ ⁴	116,16 Ab	25,16 Ba	16,7	2,55 Ab	4,61 Ab	0,39	4,35 Ab	5,51 Ab	4,93	2,39 Ab	1,84 Ab	2,12
LAd ₂ ⁵	9,09 Bc	24,31 Aa	70,66	0,44 Ab	0,34 Ac	20,4	37,61 Aa	21,41 Ba	29,51	3,13 Aa	1,29 Bb	2,21
Média	88,57	48,18		10,32	5,93		14,73	9,62		2,64	1,99	
	F			F			F			F		
Solo	775,770***			269,727***			408,381***			3,905*		
Calagem	371,102***			33,875***			35,086***			16,742***		
Solo × Calagem	251,275***			51,353***			41,687***			17,881***		
CV (%)	7,51			22,78			17,33			16,65		
20 dias de incubação da aplicação de P												
LAe ¹	23,06 Ba	35,35 Aa	29,16	20,11	15,68	17,89 b	7,32	6,53	6,92 b	1,93 Bb	3,84 Aa	2,88
LAd ₁ ²	0,47 Bc	11,35 Ab	5,91	1,09	1,13	1,11 c	3,29	1,72	2,50 c	2,41 Ab	1,81 Ab	2,11
LAd ₂ ³	2,58 Ab	0,66 Bc	1,62	73,54	71,08	72,31 a	56,43	52,14	54,28 a	3,21 Aa	2,32 Bb	2,76
Média	8,7	15,75		31,58 A	29,30 B		22,34 A	20,13 B		2,51	2,65	
	F			F			F			F		
Solo	2041,941***			2364,298***			2357,176***			4,013*		
Calagem	346,657***			6,671*			10,552**			0,335ns		
Solo × Calagem	141,414***			2,131 ^{ns}			2,414 ^{ns}			13,646***		
CV (%)	7,59			7,11			7,87			22,88		

Sem calagem; ¹Com calagem; ²Latossolo Amarelo eutrófico; ³Latossolo Amarelo distrófico; ⁴Latossolo Amarelo distrófico; ⁵Latossolo Amarelo distrófico. *, **, e *** significativos a 5, 1 e 0,1%, respectivamente; ^{ns} Não significativo.

(Continua)

Tabela 11. Compartimentalização de P em solos de diferentes mineralogias ao longo do tempo em função da aplicação de calcário na camada subsuperficial (20-40 cm de profundidade)

Solo	P-H ₂ O		Média	P-Al		Média	P-Fe		Média	P-Ca		Média
	S/C ¹	C/C ²		S/C	C/C		S/C	C/C		S/C	C/C	
	40 dias de incubação da aplicação de P											
LAe ¹	23,34 Ba	37,05 Aa	30,2	28,18 Bb	34,23 Ab	31,21	5,65	4,26	4,95 b	1,08 Aa	0,59 Bb	0,83
LAd ₁ ²	2,24 Ab	0,90 Bb	1,57	11,72 Ac	9,12 Ac	10,42	6,39	5,74	6,06 b	0,68 Ab	0,68 Ab	0,68
LAd ₂ ³	1,67 Ab	0,51 Ab	1,09	94,86 Aa	76,29 Ba	85,57	44,38	44,54	44,46 a	1,28 Ba	6,47 Aa	3,87
Média	9,08	12,82		44,92	39,88		18,81	18,18		1,01	2,58	
	F											
Solo	2853,636****		2040,187****		964,254****		457,117****					
Calagem	107,673****		25,826****		0,563 ^{ns}		258,617****					
Solo × Calagem	191,642****		52,845****		0,284 ^{ns}		348,061****					
CV (%)	8,06		5,73		11,08		13,27					

¹Sem calagem; ²Com calagem; ³Latosso Amarelo eutrófico; ⁴Latosso Amarelo distrófico; ⁵Latosso Amarelo distrófico. *, **, e **** significativos a 5, 1 e 0,1%, respectivamente. ^{ns} Não significativo.

(Conclusão)

4.7. Compartimentalização de P inorgânico (Pi) dos solos sob cultivo de *Brachiaria decumbens*

O cultivo de *Brachiaria decumbens* em solos de diferentes mineralogias (LV, LAd₂ e LAe) mostrou que as plantas absorveram P-H₂O e tiveram acesso ao P-Fe e P-Ca. Isso ocorreu mesmo no LV e LAd₂ que são muito fixadores de P. Essas frações se mostraram moderadamente lábeis. A única fração que as plantas não tiveram acesso foi o P-Al, que inclusive cresceu, mostrando que essa fração é dreno de P, concorrendo com a planta pelo P-aplicado. Nesse estudo, o P-Al foi a fração mais fixadora de P. Solos com predomínio dessa fração devem ser cuidadosamente manejados, minimizando seus efeitos sobre a absorção de P pelas plantas.

Tabela 12. Frações de P inorgânico em solos de diferentes mineralogias antes e após cultivo de *Brachiaria decumbens* por 40 dias

Solo	P-H ₂ O		Média	P-AI		Média	P-Fe		P-Ca			
	S/cultivo	Após/cultivo		S/cultivo	Após/cultivo		S/cultivo	Após/cultivo	S/cultivo	Após/cultivo		
	(mg kg ⁻¹)											
LV ¹	7,46 Aa	4,11 Bb	5,79	1,20 Bc	3,62 Aa	2,41	8,98 Aa	5,74 Ba	7,36	1,24 Aa	0,06 Bb	0,65
LAd ₂ ²	7,32 Aa	5,41 Ba	6,37	1,41 Ab	1,76 Ac	1,59	6,62 Ab	4,54 Bb	5,58	0,43 Ac	0,06 Bb	0,25
LAe ³	7,60 Aa	1,52 Bc	4,56	1,57 Ba	1,84 Ab	1,71	4,26 Ac	2,42 Bc	3,34	0,61 Ab	0,12 Ba	0,37
Média	7,46	3,68		1,39	3,61		6,62	4,23		0,76		0,08
Solo x	F			F			F			F		
	3,37 ^{ns}			6,52**			51,49***			5,69*		
Tempo/cultivo	42,83***			17,24***			12,77**			46,50***		
Solo x Tempo/cultivo	4,49*			16,43***			22,48***			6,32**		
CV (%)	25,378			25,864			14,647			58,782		

¹Latosso Vermelho; ²Latosso Amarelo distrófico; ³Latosso Amarelo eutrófico. *, ** e *** significativos a 5, 1 e 0,1%, respectivamente. ^{ns} Não significativo.

4.8. Crescimento e absorção de nutrientes por *Brachiaria decumbens* sob diferentes fontes e modos de aplicação de P em solos de diferentes mineralogias

A partir da Figura 9 pode-se observar que, em geral, os teores de massa seca da parte aérea diferiram nos solos em função dos tratamentos utilizados. No LAe, o tratamento em que o P foi aplicado em área total, utilizando o superfosfato triplo, apresentou maior produção de matéria seca, com valor de 4 g da parte aérea da planta (Figura 9A e 9D), quando comparado ao tratamento em que o P foi aplicado de forma localizada (1 g). Entretanto, quando se utilizou o fosfato natural reativo não foi constatando diferença significativa entre os modos de aplicação de P. Vale ressaltar que, para o solo em questão, a massa seca da raiz não apresentou diferença estatística entre os fertilizantes, e nem quando se avaliou a influência dos modos de aplicação de P.

No LAd₂ não houve diferença estatística entre os fertilizantes aplicados em área total (Figura 9B), diferentemente do modo de aplicação de forma localizada, em que o fosfato natural promoveu maior produção de massa seca da parte aérea e também de raiz, em relação ao superfosfato triplo. Ao verificar o comportamento dos fertilizantes em função dos modos de aplicação de P (Figura 9E), é possível verificar que a aplicação do P em área total favoreceu maior produção de massa seca, tanto para o ST, quanto para o FNR, com valores de 11 g e de 9 g, respectivamente.

No LV pode-se observar que os fosfatos de diferentes solubilidades apresentaram diferença estatística entre eles para os dois modos de aplicação, tendo o superfosfato triplo como maior promissor no aumento de massa seca tanto da parte aérea, quanto da raiz (Figura 9C). Ao comparar os modos de aplicação de P, pode-se observar que não houve diferença quando utilizou o superfosfato triplo, diferentemente do fosfato natural, que favoreceu maior valor de massa seca quando aplicado em área total (Figura 9F).

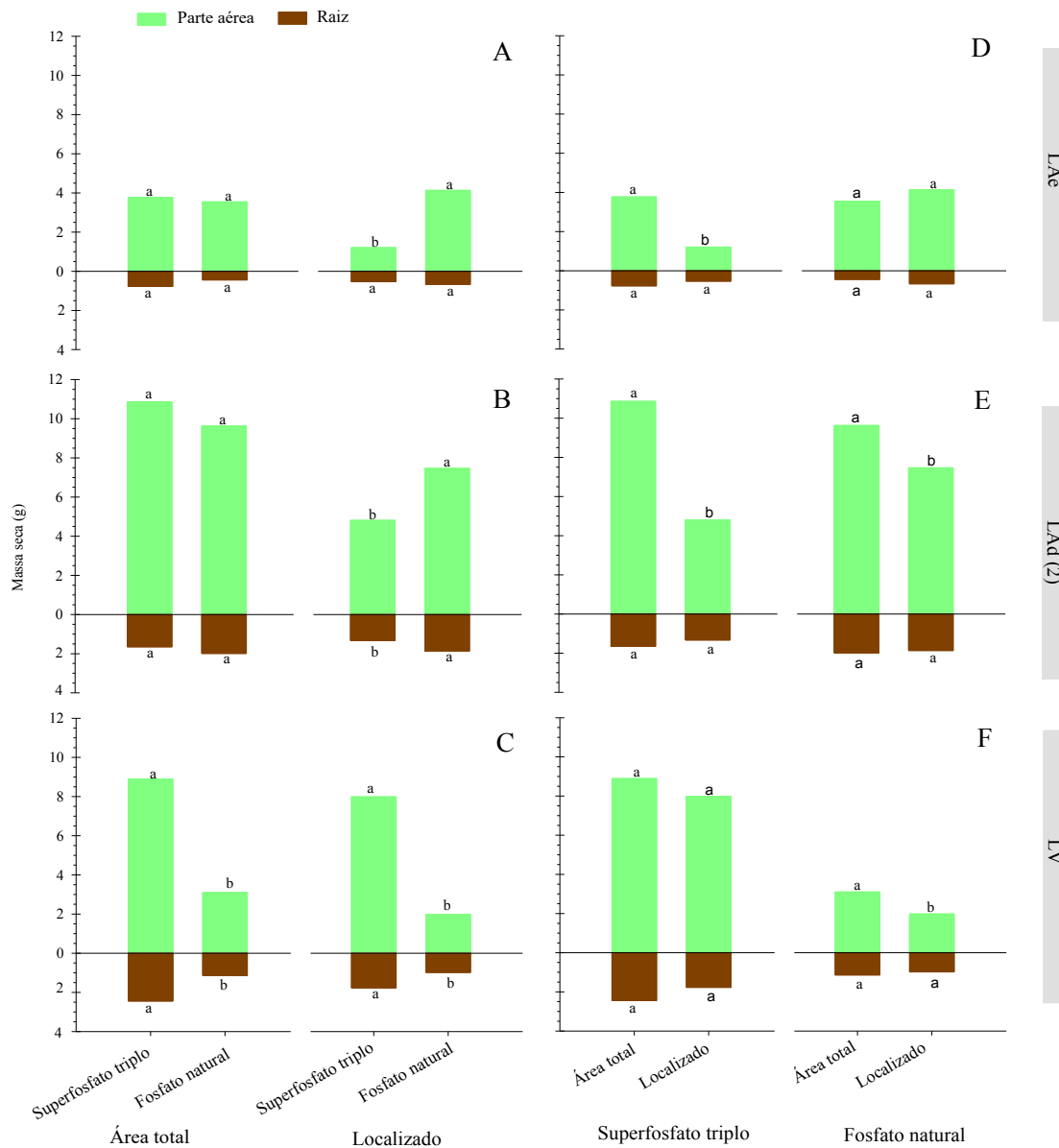


Figura 9. Produção de massa seca da parte aérea e raiz de *Brachiária decumbens* nos tratamentos com diferentes modos de aplicação e fontes de P de diferentes solubilidades

Quanto ao conteúdo de nutrientes na parte aérea da planta apresentado na Tabela 11, pode-se observar que no LV, o ST em área total proporcionou maior conteúdo de P, K e Ca, quando comparado com FNR, fosfato menos solúvel. Para o modo de adubação localizada, o ST apresentou-se inferior em relação ao FNR apenas para o K. Analisando o conteúdo dos elementos em função dos modos de aplicação, verificou-se que a aplicação de P em área total, promoveu aumento no conteúdo de P quando se utilizou o FNR, e de K e Ca quando se aplicou o ST.

No LAD₂ e no LAE, observou-se que, de modo geral, o ST apresentou melhor resultado de conteúdo de nutriente quando aplicado em área total, diferentemente do FNR, que

mostrou-se mais eficiente quando aplicado no solo de forma localizada. Num comparativo entre as formas de adubação fosfatada, o ST propiciou maior conteúdo de P, K e Ca quando aplicado em área total, diferentemente do FNR, que, em geral, foi mais eficiente quando aplicado num menor volume de solo.

De modo geral, foi possível observar que quando o P, foi aplicado em área total, proporcionou aumento da matéria seca e na absorção de nutrientes pela planta, principalmente quando se utilizou o ST. Isto pode ser explicado pelo fato de o modo de aplicação em área total favorecer maior contato do sistema radicular com o P, e conseqüente, absorção deste e dos demais nutrientes.

Tabela 13. Conteúdo de P, K e Ca na parte aérea de *Braquiaria decumbens* em função do modo de aplicação do adubo e da fonte de P aplicada em solos de diferentes mineralogias

Modo de aplicação	P			K			Ca		
	Fonte do adubo		Média	Fonte do adubo		Média	Fonte do adubo		Média
	ST ¹	FNR ²		ST	FNR		ST	FNR	
Área total	22,57 Aa	9,31 Ba	15,94	482,86	158,78	320,82 a	310,63	92,25	201,44 a
Localizado	25,37 Aa	4,18 Bb	14,77	69,36	398,35	233,86 b	254,77	56,19	155,48 b
Média	23,97	6,74		440,61 A	114,07 B		282,70 A	74,22 B	
Modo de aplicação	F			F			F		
Fonte do adubo	0,508 ^{ns}			35,577****			15,785****		
Modo × Fonte	111,136****			501,566****			324,872****		
	5,831*			0,028 ^{ns}			0,733 ^{ns}		
CV (%)	21,28			10,51			12,96		
Área total	35,84 Aa	21,85 Bb	28,85	407,72	575,27	491,49 a	13,33 Aa	8,56 Ab	10,94
Localizado	25,87 Ab	27,46 Aa	26,67	240,47	400,05	335,26 b	6,84 Ba	247,55 aA	127,19
Média	30,86	24,66		339,09 B	487,66 A		10,08	128,05	
Modo de aplicação	F			F			F		
Fonte do adubo	1,902 ^{ns}			58,755****			942,429****		
Modo × Fonte	15,406**			53,131****			970,524****		
	24,335****			0,868 ^{ns}			1050,639****		
CV (%)	11,38			9,86			10,97		
Área total	17,01 Aa	10,80 Ba	13,91	178,69 Aa	177,56 Ab	178,12	168,51 Aa	155,29 Aa	161,90
Localizado	3,50 Bb	13,53 Aa	8,51	29,64 Bb	225,50 Aa	127,57	49,41 Bb	187,68 Aa	118,54
Média	10,25	12,17		201,53	104,16		108,96	171,48	
Modo de aplicação	F			F			F		
Fonte do adubo	15,677**			11,632**			5,067*		
Modo × Fonte	1,981 ^{ns}			43,143****			10,536**		
	35,574****			44,151****			15,463**		
CV (%)	24,29			19,40			27,47		

5 CONCLUSÕES

De modo geral, os solos do Nordeste apresentaram baixa fixação de P;

A menor fixação de P nos solos do Nordeste possibilita recomendar a aplicação de fertilizante fosfatado em área total, independente da solubilidade do fertilizante;

A adubação fosfatada em área total promoveu maior produção de biomassa às plantas, quando comparado com a adubação localizada, principalmente quando se utilizou o ST.

REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C.; SOARES, M. R. Química dos solos altamente intemperizados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. Química e mineralogia do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.2, p. 381-447. 2009.
- ALVAREZ, V.H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 27-33, 2000 (Boletim Informativo).
- ANTONIADIS V.; KOLINIATI, R.; EFSTRATIOU, E.; GOLIA, E. ; PETROPOULOS S. Effect of soils with varying degree of weathering and pH values on phosphorus sorption. **Catena**, Amsterdam, v. 139. p 214 -219, 2016.
- ARAI, Y.; SPARKS, D. Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: A multiscale approach. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 94, p. 135-179, 2007.
- ARAÚJO, V. D.; REYES-PERES, Y. A.; LIMA, R. O.; PELOSI, A. P. M. R.; MENEZES, L.; CÓRDOBA, V. C.; LIMA-FILHO, F. P. Fácies e sistema deposicional da Formação Barreiras na região da Barreiras do Inferno, litoral oriental do Rio Grande do Norte. **Revista do Instituto de Geociências**, Rio Claro, v. 6, p. 43-49, 2006.
- BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES JÚNIOR, J; SIQUEIRA, D. S. Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 5, p. 150-156, 2015.
- BAVEYE, P. C. Looming scarcity of phosphate rock and intensification of soil phosphorus research. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p.637- 642, 2015.
- BEZERRA, R. P. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Frações de fósforo e correlação com atributos edáficos sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no Cerrado Goiano. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 3, p. 1287-1306, 2015.
- BONFIM, E. M. S.; FREIRE, F.J.; SANTOS, M. V. F.; SILVA, T. J. A.; FREIRE, M. B. G. S. dos S. Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 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**, Viçosa, v.21, p.73-85, 1974.
- BROGGI, F.; OLIVEIRA, A. C. de; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. dos S.; NASCIMENTO, C. W. A. do. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p.32-38, 2010.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of the Science Food Agriculture**, London, v.32, p. 671-674, 1981.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, **Instituto Agronômico de Campinas**. (Boletim Técnico, 106), 94p., 1986.

CELI, L.; LUCA, G.; BARBERIS, E. Effects of interaction of organic and inorganic P with ferrihydrite and kaolinite iron oxide systems on iron release. **Soil Science**, Baltimore, v. 168, p. 479-488, 2003.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, p.133-144, 1957.

CHRISTOPHE, T.; BOURG, I. C.; STEEFEL, C. I.; BERGAYA, F. Surface Properties of Clay Minerals. **Developments in Clay Science**, Oxford, v.6, p. 5-31, 2015.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by P31 nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Filadélfia, v.36, p. 199-207, 1985.

COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERRARI NETO, J; CASTRO, G. S. A. Residual effects of superficial liming on tropical soil under no-tillage system. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1633-1642, set. 2016.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 6, p. 82-85, 1977.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 230p, 2011.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF:Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 212p., 1997.

FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 34, n. 3, p. 337- 342, 2004.

FERNÁNDEZ, R. I. E.; NOVAIS, R. F.; NUNES, F. N.; KER, J. C. Reversibilidade de fósforo não-lável em solos submetidos à redução microbiana e química. II-Extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p. 2319-2330, nov./dez., 2008.

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 & Tillage Research**. Amsterdam, v. 155, p. 62-68, 2016 b.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; TIECHER, T.; BARRÓN, V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, p. 369-379, 2016 a.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAYER, C.; BARRÓN, J. T. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 3, p. 379-387, 2014.

FOX, R. L.; SEARLE, P. G. E. Phosphate adsorption by soils of the tropics. In: DROSDOFF, M. Diversity of soils in the tropics. **American Society of Agronomy**, Madison, p.97-119, 1978.

FREIRE, F. J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 156 f., 2001.

FURRIER, M. **Caracterização geomorfológica e do meio físico da Folha João Pessoa - 1: 100.000**. 2007. 213f. Tese (Doutorado) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. dos S.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1753-1761, 2008.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BRUNETTO, G. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 43 n.8, 2008a.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. ; KAMINSKI, J. ; PANDOLFO, C. M. ; VEIGA, M. ; FLORES, A. F. C. ; LIMA, M. A. S. ; GIROTTO, EDUARDO ; COPETTI, A. C. . Spectroscopic quantification of soil phosphorus forms by ³¹p-nmr after nine years of organic or mineral fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 640-648, 2013.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. (Tese de Doutorado). Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 245 p., 2003.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.691-699, 2007.

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

HARRISON A F. Soil Organic Phosphorus - A Review of World Literature. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, p 257, 1987.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 970-976, 1982.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis-advanced course**. Madison: University of Wisconsin, 1969.

KIM, J.; LI, W.; PHILLIPS, B. L.; GREY, C. P.; Phosphate adsorption on the iron oxyhydroxides goethite (α -FeOOH), akaganeite (β -FeOOH), and lepidocrocite (γ -FeOOH): a ^{31}P NMR Study. **Energy & Environmental Science**, Cambridge, v. 4, p. 4298-4305, 2011.

KURNAIN, A. Inhibition of Phosphorus Adsorption to Goethite and Acid Soil by Organic Matter. **International Journal of Soil Science**, EUA, v. 11, P. 87-93, 2016.

LACERDA, J. J. J.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; SANTOS, J. Z. L.; CARNEIRO, L. F.; OLIVEIRA, C. H. C. Crop growth response and dynamics of inorganic phosphorus fractions after application reactive Arad phosphate rock in Oxisol with different land use histories. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 26, p. 3454-3461, 2013.

LEE, C.H.; HONG, C. O.; KIM, S. Y.; SHUMACHER, T. KIM, P. J. Reduction of phosphorus release by liming from temporary flooded rice rotational system in greenhouse upland soil. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 37, p. 1239-1243, 2011.

LEITE, J. N. F. **Formas orgânicas e inorgânicas de fósforo no solo em função de plantas de cobertura e adubação nitrogenada**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 56 f, 2015.

LI, F. R.; LIU, L. L.; LIY, J. L.; YANG, K. Abiotic and biotic controls on dynamics of labile phosphorus fractions in calcareous soils under agricultural cultivation. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 681, p 163-174, 2019.

LINDSAY W L, VLEK P L G AND CHIEN S H. Phosphate minerals. In Minerals in soil environment, 2nd edn. Eds J B Dixon and S B Weed. pp. 1089–1130, 1989. **Soil Science Society of America**, Madison, WI, USA.

LINDSAY W L, VLEK PLG, CHIEN SH. Phosphate minerals. In: Dixon JB, Weed SB (eds) Minerals in soil environments, 2nd ed. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, Wisconsin, USA, p. 1089-1130, 1989.

LINS, I. D. G.; COX, F. R.; SOUZA, D. M.G. Teste de um modelo matemático para otimizar a adubação fosfatada na cultura da soja em solos sob Cerrado com diferentes teores e tipos de argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, p. 65-73, 1989.

MAHARJAN, M. M. MARANGUITA, D.; KUZYAKOVD, Y. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use. **European Journal of Soil Biology**, Les-Moulineaux, v. 87, p. 17-24, 2018.

- MARANGUIT, D.; GUILLAUME, T.; KUZYAKOV, Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils, **Catena**, Amsterdam, n. 149, p. 385-393, 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**, 7, London. Proceedings. London, v.7, p.317-327, 1960.
- MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; CAMARGO, L. A. Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, p. 191-199, 2010.
- MURPHY, J.; RILLEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytic Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, 1962.
- 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.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, 399 p., 1999
- OLSEN, S. R.; KHASAWNEH, F. E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J., eds. The role of phosphorus in agriculture. **American Society of Agronomy**, Madison, p.361-410, 1980.
- PENG, J.; WANG, B.; SONG, Y.; YUAN, P.; LIU, Z. Adsorption and release of phosphorus in the surface sediment of wastewater stabilization pond, **Ecological Engineering**. Amsterdam, v. 31, p. 92-97, 2007.
- QIAO, S. M. Y. Distribution of inorganic and organic phosphorus fractions in two phosphorus-deficient soils as affected by crop species and nitrogen applications. **Communications in Soil Science Plant Analysis**, New York, v. 43, p. 631-644, 2012.
- RANNO, S.K.; SILVA, L.S.; MALLMANN, F.J.K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzea do rio grande do sul. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 13, p. 47-54, 2007.
- REDDY, K. R.; WETZEL, R. G.; KADLEC, R. H. Biogeochemistry of phosphorus in wetlands. In: SIMS, J. T. et al. Phosphorus: agriculture and the environment. **American Society of Agronomy**, Madison, p.263-316, 2005
- REDEL, Y; CARTES, P.; DEMANET, R.; VELÁSQUEZ, G.; POBLETE-GRANT, P.; BOL R.; MORA, M. L. Assessment of phosphorus status influenced by Al and Fe compounds in volcanic grassland soils Y. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 16, p. 490-506, 2016.

REIS, G. R.; MIZUSAKI, A. M.; ROISENBERG, A.; RUBERT, R. R. Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 41, p. 155-168, 2014.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, p.576-586, 2008.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p.297-300, 2005.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reaction of phosphate fertilizers in soils. In: Khasawneh FE, Sample EC, Kamprath EJ (eds) The role of phosphorus in agriculture. **ASA-CSSA-SSSA**, Madison, p. 263-304, 1980.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, L. C. G. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, p.576-586, 2008.

SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; CURI, N. CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfato em diferentes modos de aplicação e cultivo com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 705-714, 2008.

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

SILVA, T. O.; NETO, A. E. F.; CARNEIRO, V. P. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v.32, p.1315-1326, 2011.

SIMÕES NETO DE; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE M. B.G. S.; OLIVEIRA, E. C. A., ROCHA, A. T. Adubação fosfatada para cana-de-açúcar em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, p. 73-81, 2015.

SIMONSSON, M.; ÖSTLUNDA, A.; RENFJÄLLA, L.; SIGTRYGGSSONA, C; BÖRJESSONA, G., KÄTTERERB, T. Pools and solubility of soil phosphorus as affected by liming in long-term agricultural field experiments. **Geoderma**, Amsterdam v. 315, 208-2019, 2018.

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

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, p. 277, 1989.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press. p. 321, 2008.

STEVENSON, F.J. **Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients.** New York, John Wiley & Sons, 380p., 1986.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p.271-281, 2012.

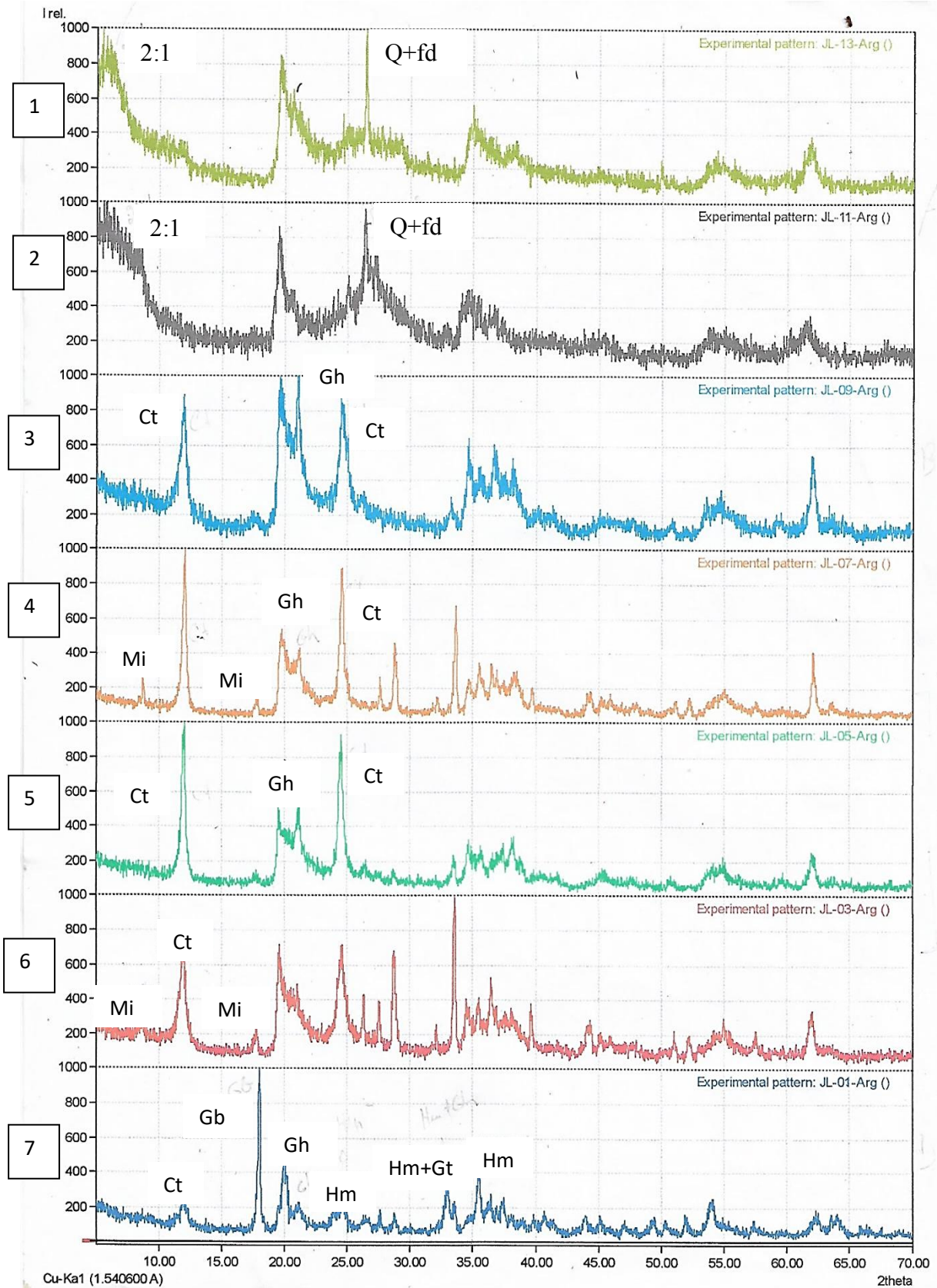
UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Methods of chemical analysis for water and wastes.** Cincinnati, 1971.

WEI, S.; TAN, W.; LIU, F.; ZHAO, W.; WENG, L. Surface properties and phosphate adsorption of binary systems containing goethite and kaolinite. **Geoderma**, Amsterdam, 213:478–484, 2014.

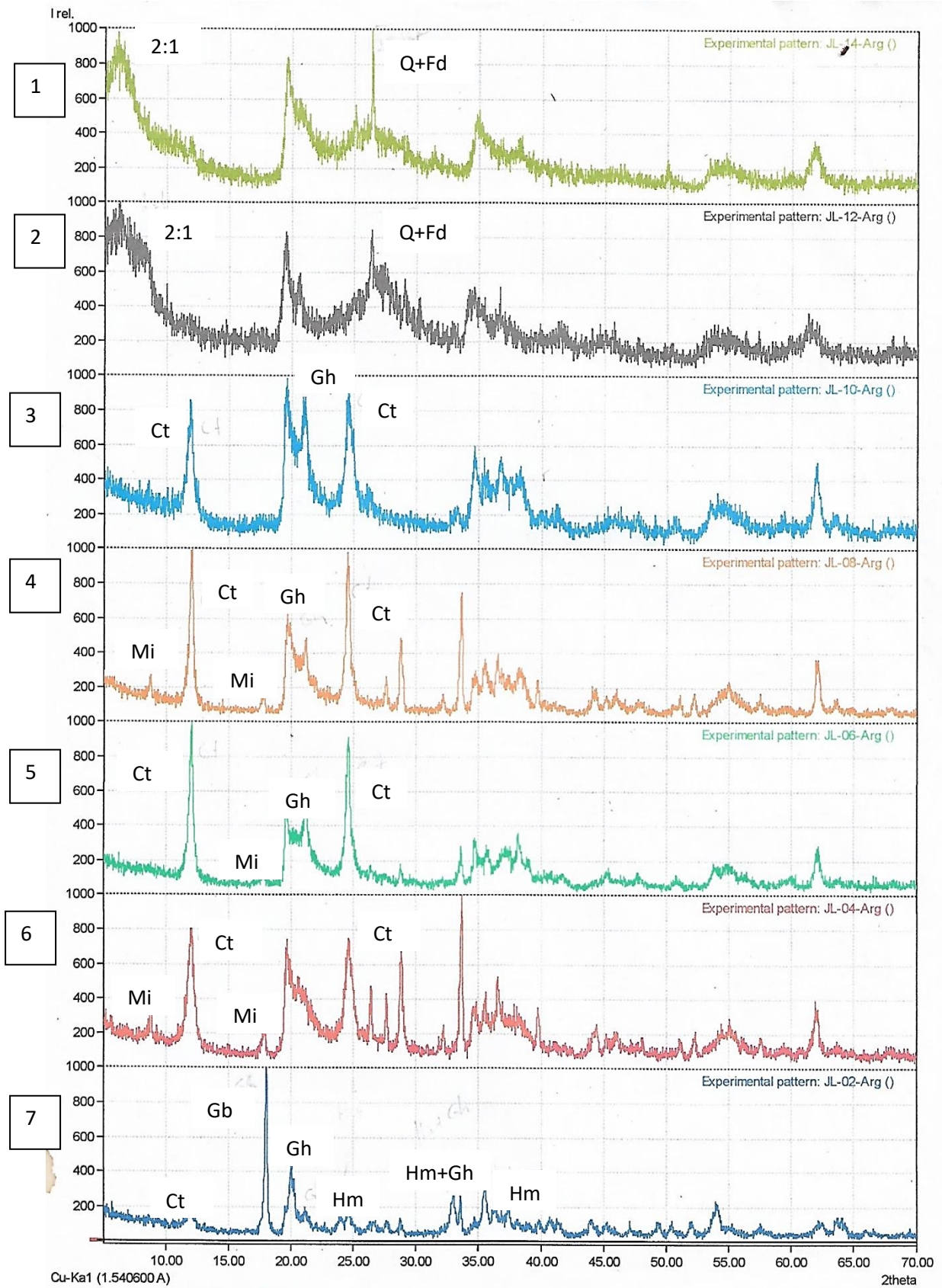
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da dinâmica de P é complexa, contudo compreender o comportamento do fósforo, de como ocorrem os processos de troca envolvendo adsorção e dessorção, torna-se necessário, especialmente quando há necessidade de se obter respaldo científico para adoção de manejo de adubação fosfatada.

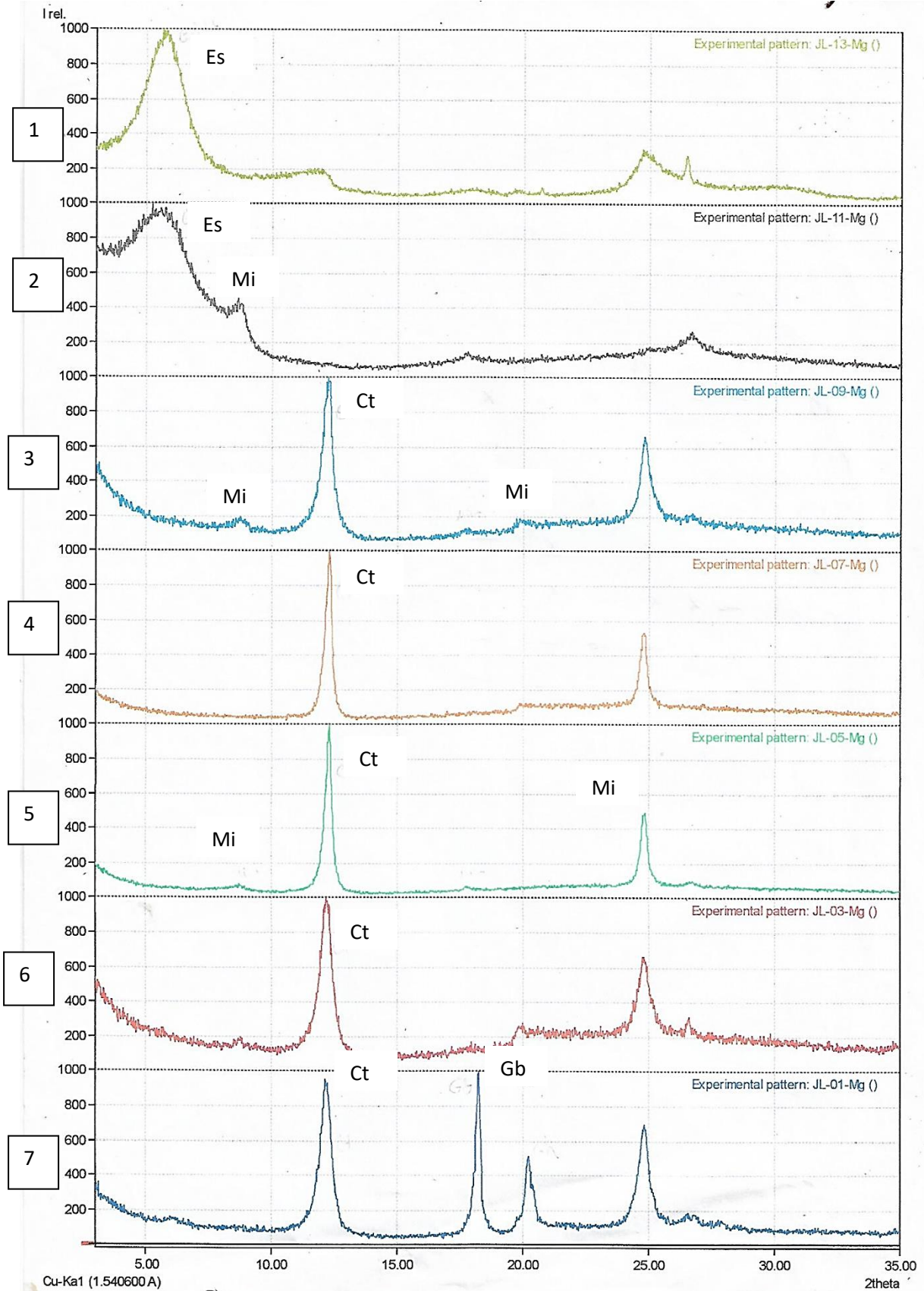
Nos modelos de adubação fosfatada atuais, o P é utilizado em grandes quantidades apenas na fundação por ocasião do plantio, podendo estar resultando em prejuízo nutricional para a planta. No entanto, em solos com baixa capacidade de adsorção de P, sugere-se que a aplicação deste elemento seja realizado em área total, mesmo de fontes solúveis, favorecendo o melhor aproveitamento pela cultura, com reflexos positivos na produtividade.



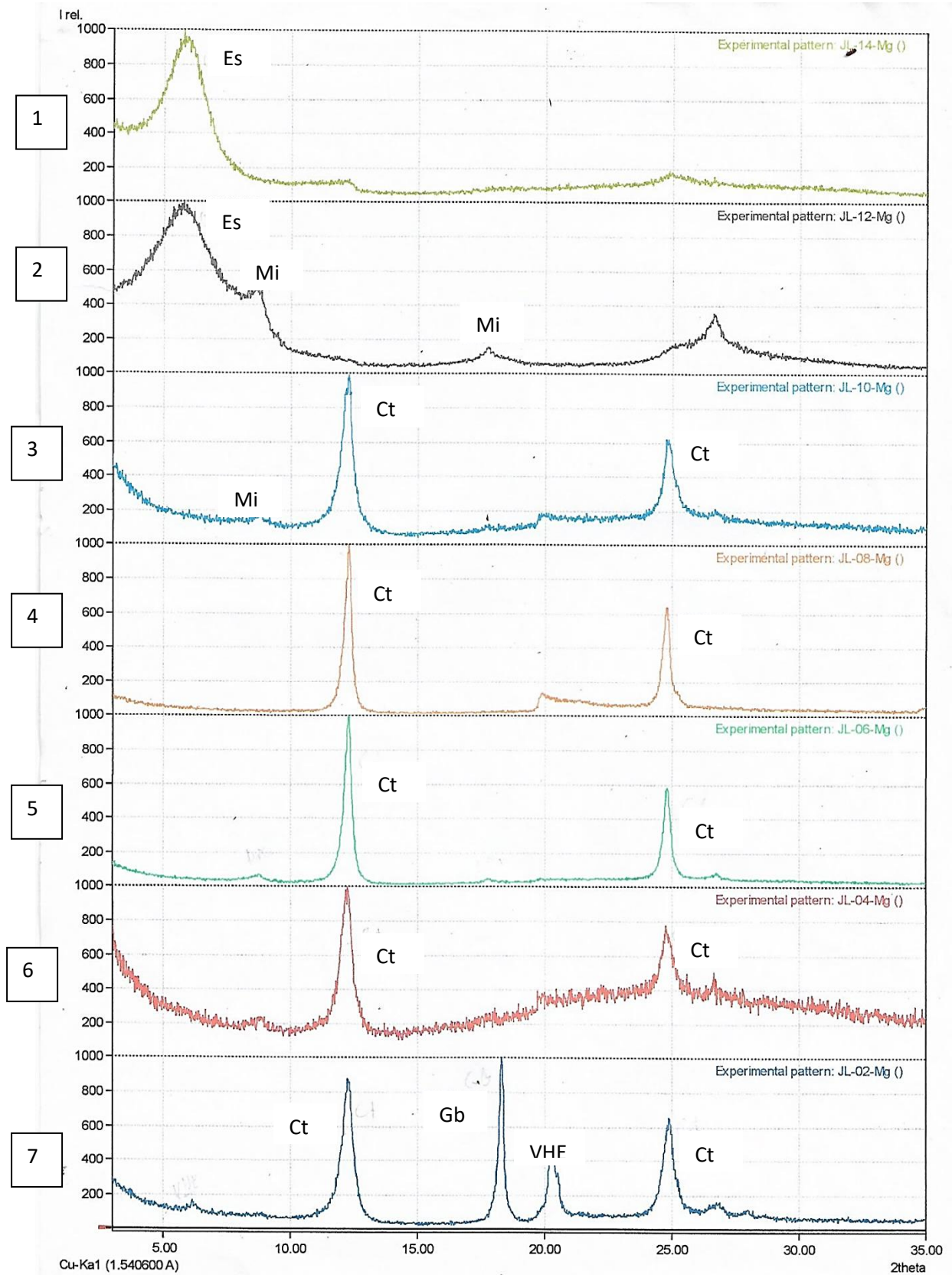
Apêndice A. DRX da fração argila (pó) dos solos estudados (camada 0-20 cm). 1-VHot; 2- VHT; 3- CB; 4- LAd1; 5- LAd2; 6-LAe; 7-LV



Apêndice B. DRX da fração argila (pó) dos solos estudados (camada 20-40 cm). 1-VHot; 2- VHT; 3- CB; 4-LAd1; 5- LAd2; 6-LAe; 7-LV



Apêndice C. DRX da fração argila (tratada com Mg) dos solos estudados (camada 0-20 cm). 1-VHot; 2- VHt; 3-CB; 4- LAd1; 5- LAd2; 6-LAe; 7-LV



Apêndice D. DRX da fração argila (tratada com Mg) dos solos estudados (camada 20-40 cm). 1-VHot; 2- VHT; 3- CB; 4- LAd1; 5- LAd2; 6-LAe; 7-LV