Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola

Luiz Francisco da Silva Souza Filho

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2014

Luiz Francisco da Silva Souza Filho
Engenheiro Agrônomo

Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **TAKASHI MURAOKA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Souza Filho, Luiz Francisco da Silva
Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola / Luiz Francisco da Silva Souza Filho. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.
127 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Fracionamento de fósforo 2. Mehlich-1 3. Oeste da Bahia 4. Resina de troca aniônica 5. Semeadura direta 6. XANES I. Título

CDD 631.41
S729f

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

À toda minha família pelo permanente apoio durante essa longa caminhada, e compreensão pela ausência em momentos importantes da vida familiar.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A conclusão de um curso de Pós-Graduação só é possível graças à ajuda, aos ensinamentos, as oportunidades que pessoas ou instituições concedem a nós durante a longa, árdua, mas acima de tudo, proveitosa caminhada. Por esse motivo, é mais do que justo expressar o meu sincero agradecimento a todos que contribuíram com essa importante etapa. Por isso, sou grato:

- A Deus, pela saúde e força necessária para que eu pudesse vencer os obstáculos que surgiram durante essa caminhada;
- Aos meus pais, Luiz Francisco e Sandra, e ao meu irmão Rafael pelo apoio em todas as etapas da minha vida e pelas palavras de incentivo principalmente nas horas de maior dificuldade;
- Ao Tio Luciano pelo apoio, incentivo, ensinamentos sobre Ciência do Solo e ajuda na realização das análises físicas;
- À minha família, em especial a minha madrinha, sempre muito preocupada comigo;
- À minha namorada, Carolina, pelo amor, por estar sempre ao meu lado nessa caminhada, pelos ensinamentos sobre Ciência do Solo e pela essencial ajuda na realização das análises químicas e mineralógicas.
- Ao Professor José Fernandes de Melo Filho, da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, grande amigo, por ter me incentivado e apoiado a buscar esse curso e pela constante demonstração de incentivo durante todo meu período na Pós-Graduação;
- À Universidade de São Paulo pela oportunidade de realização do curso no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP);
- Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) pelo ótimo ambiente de trabalho.
- Ao Professor Takashi Muraoka pela amizade e ótima convivência. Pelos valiosos ensinamentos e valorosa orientação, que sem dúvida contribuiu de maneira muito significativa para a minha formação como profissional e como pessoa;

- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo no período de Julho de 2010 a maio de 2012 e posteriormente pela bolsa de estudo para realização do estágio no exterior no período de janeiro a julho de 2013 (processo 13877-12-7);
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo nos períodos de julho a dezembro de 2012 e de agosto de 2013 até o final do curso;
- À North Carolina State University (NCSU) pela oportunidade de realização do estágio de doutorado no período de janeiro a julho de 2013;
- Ao Professor Dean Hesterberg por ter me recebido no seu laboratório no Departamento de Ciência do Solo da NCSU, pela excelente orientação e ótima convivência.
- Ao Brookhaven National Laboratory (BNL), pela possibilidade de realizar medidas na sua fonte de luz Synchrotron;
- Ao Dr. Paul Northrup, cientista de linha no BNL, pela recepção e ensinamento a respeito do funcionamento da linha de análise X15B.
- Ao Synchrotron Light Research Institute (SLRI) pela possibilidade de realizar medidas na sua fonte de luz Synchrotron;
- À Drª. Wantana Klysubun, cientista de linha no SLRI, e sua equipe pela excelente recepção e ensinamentos a respeito do funcionamento da linha de análise BL8.
- Aos colegas Valmor dos Santos e André Singer da Associação dos Engenheiros Agrônomos de Luís Eduardo Magalhães e da Inovação agrícola: pesquisa, desenvolvimento e consultoria agronômica, por intermediar o contato com a equipe da Fazenda Catarinense;
- À Fazenda Catarinense e sua excelente equipe por permitir a coleta de solo na sua área e pela inestimável contribuição durante a coleta das amostras.
- Ao Dr. Laercio Souza da Embrapa Mandioca e Fruticultura pela contribuição na escolha da área de estudo;
- Aos professores José Laves Júnior, Antonio Enedi Boaretto, Luís Reynaldo Ferraciú Alleoni, Godofredo César Vitti, Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Carlos Clemente Cerri, Sônia Maria Stéfano Piedade, Miguel Cooper, José

Leonardo de Moraes Gonçalves, Takashi Muraoka e Virgílio Franco do Nascimento Filho pelos ensinamentos durante as disciplinas cursadas.

- Aos professores José Leonardo de Moraes Gonçalves, Paulo Sérgio Pavinato e Luís Reynaldo Ferraciú Alleoni pelas sugestões durante o exame de qualificação;
- Aos grandes amigos que estão ou passaram pela nossa acolhedora “Salinha”: Fábio, Cristiano, Diogo, Rodrigo, Alinne, Róger, Fernando, Rafael, Raphael, Nericlenes, Marcos Camacho e Camila pela convivência diária durante esses anos, incentivo, companherismo e pelas ótimas conversas sobre os nossos trabalhos, o que me fez aprender muito com cada um.
- Agradeço especialmente a Fábio, Cristiano, Diogo, Rodrigo e Alinne pelo inestimável apoio desde a concepção do projeto até a finalização do curso;
- Às técnicas do Laboratório de Fertilidade do Solo do CENA/USP, Mara e Sandra;
- Aos demais amigos e colegas da Pós-Graduação pelo excelente convívio;
- Aos amigos Diego e Marina pela ótima convivência e companhia durante o estágio na NCSU;
- Aos meus amigos da minha cidade natal, Cruz das Almas-BA, por compreender a minha constante ausência;
- A todos que contribuíram de alguma forma para esse trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO 11
ABSTRACT 13
LISTA DE FIGURAS 15
LISTA DE TABELAS 21
1 INTRODUÇÃO 23
2 DESENVOLVIMENTO 27
2.1 Revisão Bibliográfica 27
2.2 Material e Métodos 43
2.2.1 Área de estudo 43
2.2.2 Amostragem e beneficiamento do solo 46
2.2.3 Determinação dos atributos químicos 47
2.2.4 Determinação dos atributos físicos 51
2.2.5 Difratometria de raios X no pó (DRXP) 52
2.2.6 Fracionamento químico de fósforo no solo 53
2.2.7 Espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) 54
2.2.8 Análise estatística 55
2.3 Resultados e Discussão 55
2.3.1 Fósforo disponível (Mehlich-1 e resina de troca iônica) 55
2.3.1.1 Sumário interpretativo de fósforo disponível (Mehlich-1 e resina de troca iônica) 61
2.3.2 Fracionamento de fósforo no solo 61
2.3.2.1 Frações Inorgânicas 61
2.3.2.1.1 Fósforo inorgânico extraído por resina de troca aniônica (Pi-RTA) 61
2.3.2.1.2 Fósforo inorgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic) . 69
2.3.2.1.3 Fósforo inorgânico extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1) 73
2.3.2.1.4 Fósforo inorgânico extraído por ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) 78
2.3.2.1.5 Fósforo inorgânico extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5) 81
2.3.2.1.6 Sumário interpretativo de frações inorgânicas 83
2.3.2.2 Frações orgânicas 84
2.3.2.2.1 Fósforo orgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic) ... 84
2.3.2.2.2 Fósforo orgânico extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1) . 87
2.3.2.2.3 Fósforo orgânico extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5) . 90

2.3.2.2.4 Sumário interpretativo de frações orgânicas 93
2.3.2.3 Fósforo residual (P-Residual) 94
2.3.2.3.1 Sumário interpretativo de fósforo residual 96
2.3.2.4 Fósforo total 97
2.3.2.4.1 Sumário interpretativo de fósforo total 101
2.3.3 Espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) 102
2.3.3.1 Características espectrais dos padrões 102
2.3.3.2 Características espectrais e ajuste de combinação linear (LCF) das áreas em estudo 106
2.3.3.3 Sumário interpretativo de XANES 112
3 CONCLUSÕES 113
REFERÊNCIAS 115

RESUMO

Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola

Não há dúvidas que a exitosa exploração do Cerrado só foi possível graças às pesquisas que desenvolveram tecnologias de correção e adubação específicas para esse ambiente. Apesar de estar consolidado como um dos principais ambientes de produção agropecuária do mundo, as pesquisas devem avançar contribuindo, cada vez mais, com aumento na eficiência do uso do fósforo (P), por ser o elemento mais limitante para produção agrícola nesse ambiente. Devido às características dos solos dessa região, parte do P aplicado é retido pelo solo em formas que as plantas não conseguem absorver, resultando na acumulação de quantidades significativas do nutriente no solo. Apesar de não ser um assunto relativamente novo e do grande número de trabalhos, o tema avaliação da disponibilidade de fósforo do solo ainda provoca dúvidas. Além dos estudos em que é avaliada a eficiência de diversos extratores como Mehlich-1 e resina de troca aniônica, outras técnicas passaram a ser utilizadas para esse fim. Estudos objetivando avaliar a distribuição (dinâmica) do fósforo nas diferentes frações do solo e as mudanças nessa distribuição em função do manejo aplicado aos cultivos e, também, do tempo de cultivo, têm sido conduzidos com crescente intensidade. Estudos também têm sido conduzidos buscando identificar as formas de acumulação de P no solo. Para isso, modernas técnicas espectroscópicas, como por exemplo, a espectroscopia baseada em luz synchrotron, têm sido utilizadas como uma poderosa ferramenta, auxiliando na identificação dos compostos presentes no solo. Face ao exposto, objetivou-se avaliar as alterações no fósforo disponível e nas frações e formas de fósforo em solo de Cerrado submetido ao manejo em semeadura direta com diferentes tempos de cultivo. Foram coletadas amostras compostas em quatro áreas que se encontravam no momento da coleta com 5, 8, 12 e 18 anos de cultivo desde a abertura das áreas, e também numa área sob vegetação nativa. O fósforo disponível foi extraído por Mehlich-1 e resina de troca aniônica. As amostras foram submetidas ao fracionamento químico de fósforo e espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure). Observou-se que, de maneira geral, os teores de fósforo no solo foram sempre mais altos nas áreas cultivadas, principalmente na camada superficial, em comparação aos da área com vegetação nativa, o que reflete o impacto das adubações fosfatadas. A aplicação superficial do fertilizante fosfatado gerou nítidos gradientes de P no perfil do solo, principalmente para as frações lábeis e moderadamente lábeis, sendo essas frações as que sofreram maior influência do fertilizante quando comparadas às frações de menor disponibilidade. Considerando-se os mesmos extratores, os teores das frações orgânicas foram maiores em comparação às correspondentes frações inorgânicas. As formas de fósforo nos solos estudados foram predominantemente associadas ao alumínio e ao ferro, com destaque para o nutriente associado ao alumínio, sendo que, com o ferro, a associação ocorreu predominantemente por meio de fenômenos de adsorção em detrimento de fenômenos de precipitação.

Palavras-chave: Fracionamento de fósforo; Mehlich-1; Oeste da Bahia; Resina de troca aniônica; Semeadura direta; XANES

ABSTRACT

Forms of phosphorus in Cerrado´s Oxisol as function of agricultural usage time

There is no doubt that the successful exploitation of the Cerrado was only possible due to the research that developed specific correction and fertilization technologies to this particular environment. Due to the characteristics of soils in the region, part of applied phosphorus (P) is retained by the soil in plant unavailable forms, resulting in accumulation of significant amounts of nutrient in the soil. Despite not being a relatively new issue and the large number of research performed on this topic, the assessment of the soil P availability still raise important questions. In addition to studies in which the efficiency of various extractants have been tested, such as Mehlich-1 and anion exchange resin, other techniques are being used for this purpose. Studies for evaluating the P distribution (dynamic) in different soil fractions and the changes in this fractions due to the management applied to crops and also the time of cultivation have been conducted with increasing intensity. Studies have also been carried out in order to identify the forms of P accumulation in soils. For this purpose, modern spectroscopic techniques such as spectroscopy based on synchrotron light source, have been used as a powerful tool, assisting in the identification of P compounds presents in the soil. The aims of this study were to evaluate the changes in available, fractions and forms of P in soils of Cerrado with different times under no-till cultivation system. Composite soil samples were collected in four areas under 5, 8, 12 and 18 years of no-till cultivation since the areas were opened, and also in a area under native vegetation. The soil in the area was classified as Typic Hapludox and the areas were cultivated alternating crops of soybeans, corn and cotton. Available P was extracted by Mehlich - 1 and anion exchange resin. The samples were subjected to Hedley´s chemical fractionation of P and X- ray absorption near edge structure (XANES). It was observed that, in general, the levels of P in the soil were always higher in cultivated areas, mainly in the topsoil, when compared to the area under native vegetation, which reflects the impact of phosphate fertilization. Surface application of phosphate fertilizer produced sharp gradients of P in the soil profile, especially for both labile and moderately labile fractions, and these fractions suffered the greatest influence of fertilizer compared to fractions of lower availability. Considering the same extractants, the organic P fractions contents were higher compared to the corresponding inorganic fractions. Forms of phosphorus in soils were predominantly associated with aluminum (Al) and iron (Fe), especially P associated with Al, and with Fe the association occurred predominantly through adsorption phenomenon rather than precipitation reactions.

Keywords: Anion exchange resin; Mehlich-1; No-till; Phosphorus fractionation; Western Bahia; XANES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa do Brasil, sendo destacada em cinza a área correspondente a região do Cerrado (SANO et al., 2010) 28
Figura 2 – Mapa do Brasil e em destaque a região do Cerrado demonstrando os principais tipos de uso do solo (SANO et al., 2008) 29
Figura 3 – Vista aérea da Fazenda Catarinense com a indicação das áreas amostradas e, em destaque, a situação de cada uma delas no momento da amostragem..... 45
Figura 4 – Sonda utilizada na amostragem 46
Figura 5 – Croqui das áreas mostrando o critério de amostragem utilizado para as áreas com 5, 8, 12 e 18 anos de cultivo agrícola 47
Figura 6 – Difratometria de Raios-X no pó (DRXP) da fração argila na camada de 0-0,10 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Ct: Caulinita; Gb: Gibsita; Gt: Goethita; Hm: Hematita e Fh: Ferrihidrita 53
Figura 7 – Fósforo inorgânico extraído por resina de troca aniônica (Pi-RTA) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média..... 62
Figura 8 – Distribuição percentual das frações de fósforo obtidas por meio do fracionamento químico de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989), na camada 1 (0-0,10 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Frações inorgânicas extraídas por: resina de troca aniônica (Pi-RTA), bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1), ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5). Frações orgânicas extraídas por: bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1), e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5).. 64

Figura 9 – Distribuição percentual das frações de fósforo obtidas por meio do fracionamento químico de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989), na camada 2 (0,10 - 0,20 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Frações inorgânicas extraídas por: resina de troca aniônica (Pi-RTA), bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1), ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5). Frações orgânicas extraídas por: bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1), e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5)..... 65

Figura 10 – Distribuição percentual das frações de fósforo obtidas por meio do fracionamento químico de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989), na camada 3 (0,20 - 0,30 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Frações inorgânicas extraídas por: resina de troca aniônica (Pi-RTA), bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1), ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5). Frações orgânicas extraídas por: bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1), e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5)..... 66

Figura 11 – Distribuição percentual das frações de fósforo obtidas por meio do fracionamento químico de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989), na camada 4 (0,30 - 0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Frações inorgânicas extraídas por: resina de troca aniônica (Pi-RTA), bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1), ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5). Frações orgânicas extraídas por: bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1), e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5)..... 67

Figura 12 – Fósforo inorgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas da mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média 70

Figura 13 – Fósforo inorgânico extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média 74

Figura 14 – Fósforo inorgânico extraído por ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas da mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média 79

Figura 15 – Fósforo inorgânico extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas da mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média 82

Figura 16 – Fósforo orgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas da mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo

teste de Tukey (p<0,05). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média.. 85
Figura 17 – Fósforo orgânico extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05). As barras nos topos das colunas representam os erros padrão da média.. 88
Figura 18 – Fósforo orgânico extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média.. 91
Figura 19 – Fósforo residual (P-Residual) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média.. 95
Figura 20 – Fósforo obtido pela soma das frações (P-SF) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média. 98
Figura 21 – Fósforo obtido pela digestão total do solo (P-Total) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey

(p<0,05). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média.....99
Figura 22 – Diferença percentual entre o fósforo obtido pela digestão total do solo (P-Total) e o fósforo obtido pela soma das frações do fracionamento químico proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos.. . 101
Figura 23 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo dos padrões em que o fósforo está associado ao alumínio e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.....103
Figura 24 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo dos padrões em que o fósforo está associado ao ferro e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.....104
Figura 25 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo dos padrões em que o fósforo está associado ao cálcio e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.....105
Figura 26 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo dos padrões em que o fósforo está em formas orgânicas e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.....106
Figura 27 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo em solo sob vegetação nativa (VN) e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF). 108
Figura 28 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo em solo cultivado por 5 anos e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF). 109
Figura 29 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do

fósforo em solo cultivado por 8 anos e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF)..... 110
Figura 30 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo em solo cultivado por 12 anos e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF)..... 111
Figura 31 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo em solo cultivado por 18 anos e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF)..... 112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Histórico das áreas utilizadas no estudo 44

Tabela 2 – Atributos químicos em quatro camadas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos 50

Tabela 3 – Análise granulométrica em quatro camadas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos 51

Tabela 4 – Porosidade total, marco e microporosidade, densidade do solo, retenção de água e diâmetro médio ponderado de agregados secos em quatro camadas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos 52

Tabela 5 – Fósforo disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina, e fósforo remanescente em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos 56

Tabela 6 – Distribuição relativa do fósforo estimada por meio do ajuste de combinação linear (LCF) na camada 0-0,10 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos 107

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o setor agropecuário brasileiro vem recebendo amplo destaque, em razão da sua contribuição para o Produto Interno Bruto (PIB) do País e da expressiva importância no abastecimento nacional, assim como de outros países do Mundo, com alimentos, fibras e matérias-primas para geração de energia.

Acreditava-se que apenas as regiões de clima temperado poderiam ser capazes de, com eficiência, produzir alimentos para o Mundo. Essa ideia foi contrariada a partir do momento em que trabalhos de pesquisa começaram a disponibilizar, com sucesso, novas variedades de diversas culturas e forrageiras, associadas com práticas agrícolas direcionadas para o ambiente tropical, criando uma agricultura moderna e fortemente competitiva (PEREIRA et al., 2012).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de julho a setembro de 2013 o PIB nacional apresentou crescimento de 2,4 %, em relação ao mesmo período do ano anterior, com destaque para o setor agropecuário, cujo crescimento de 8,1 % foi o maior dentre todos os setores que compõem esse indicador (IBGE, 2013).

Dentro desse panorama vale destacar, para o setor agropecuário, a contribuição das culturas agrícolas, principalmente a soja e o milho, hoje denominadas, também, de “commodities” agrícolas.

Grande parte do sucesso do setor agropecuário brasileiro deve-se, principalmente, às pesquisas desenvolvidas nas mais diversas áreas do conhecimento agrícola, dentre elas as pesquisas em solos e nutrição de plantas, que possibilitaram a exploração de grandes áreas na região central do Brasil, conhecidas como o Cerrado brasileiro.

O Cerrado brasileiro caracteriza-se, do ponto de vista edáfico, por possuir solos sem impedimentos de caráter físico ao crescimento das plantas, porém com impedimentos de caráter químico, como alto teor de alumínio trocável (Al^{3+}), baixo teor de bases trocáveis [cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^{+})] e baixo teor de fósforo (P) disponível às plantas (LOPES; COX, 1977).

Em função disso, tornaram-se necessárias práticas agrícolas, como calagem e adubação, visando à correção do solo a níveis que possibilitassem as plantas se desenvolverem de maneira satisfatória, expressando todo seu potencial na forma de máxima quantidade e qualidade de produtos agrícolas por unidade de área plantada.

Estima-se que de 30 a 50 % da produção agrícola mundial seja dependente da aplicação de fertilizantes e corretivos. No Brasil, essa dependência é ainda maior. No primeiro cultivo após a abertura das áreas (corte e queima da vegetação nativa) essa dependência não passa de 40 %. Porém em cultivos subsequentes, a dependência das culturas pelos fertilizantes e corretivos nunca é menor que 90 % (STEWART et al., 2005).

Devido às características dos solos dessa região, parte do P aplicado é retido pelo solo em formas que as plantas não conseguem absorver, resultando na acumulação de quantidades significativas do nutriente no solo e, por isso, a eficiência no seu uso geralmente é baixa. Como consequência, são necessárias grandes quantidades de fertilizante fosfatado para que o solo passe a ser fonte de P ao invés de dreno (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Estudos têm demonstrado a exaustão gradual das reservas de rochas fosfáticas, principalmente as de melhor qualidade, que são matéria-prima para produção de fertilizantes fosfatados, acarretando no aumento de seu preço (ROSEMARIN et al., 2009). Essa situação é ainda mais crítica no Brasil devido à baixa qualidade das reservas de rocha fosfática, ocasionando dependência externa do país em relação a fertilizantes fosfatados. Face ao exposto, são necessárias pesquisas que visem o aumento na eficiência de uso do nutriente e, consequentemente, concorram para a otimização no uso dos recursos naturais, que são finitos.

Estudos objetivando avaliar a distribuição (dinâmica) do P nas diferentes frações do solo e as mudanças nessa distribuição em função do manejo aplicado aos cultivos e, também, do tempo de cultivo têm sido conduzidos com crescente intensidade. Para esse tipo de avaliação, os fracionamentos químicos são as técnicas que vêm sendo utilizadas no Brasil com maior frequência nos últimos anos, com destaque para os fracionamentos propostos por Chang e Jackson (1957) e Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e suas respectivas modificações. Tais estudos são importantes, pois permitem avaliar, por exemplo, se há reversibilidade, em longo prazo, de formas consideradas moderadamente indisponíveis a indisponíveis para formas que as plantas possam absorver.

Estudos também têm sido conduzidos para buscar identificar as formas de acumulação de P no solo. Para isso, modernas técnicas espectroscópicas, como por exemplo espectroscopia baseada em luz synchrotron, têm sido utilizadas como uma

poderosa ferramenta, auxiliando na identificação dos compostos presentes no solo que pode, por exemplo, se tornar informação de grande valia para programas de melhoramentos genéticos de plantas visando aumentar a eficiência no uso de P, e com isso possibilitar a redução das adubações fosfatadas. Para o aumento de tal eficiência podem ser consideradas características de uso do P pelas plantas, da cinética de solubilização do fertilizante e da interação com o solo do P liberado dos fertilizantes minerais ou orgânicos. Essa interação com os coloides do solo, seja com fertilizantes minerais ou orgânicos, vai depender da forma como o elemento se apresenta no fertilizante e de suas transformações imediatamente após a solubilização.

Diante do exposto, a hipótese testada neste trabalho foi que as aplicações de fertilizantes fosfatados e corretivos, por longo período de tempo, durante os cultivos em semeadura direta, alteram o fósforo disponível, o acúmulo de fósforo nas diferentes frações do solo, determinadas pelo fracionamento químico de Hedley, e as formas de fósforo do solo, com o passar dos anos de cultivo.

Objetivou-se, assim, avaliar as alterações no fósforo disponível, nas frações e formas de fósforo em solo de Cerrado submetido ao manejo em semeadura direta com diferentes tempos de cultivo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

No Brasil, em um tempo que pode ser considerado pequeno, algumas regiões experimentaram mudanças expressivas, incorporando padrões modernos de estruturas viárias e energéticas. Em muitas situações tais mudanças foram altamente influenciadas pela descoberta de impensadas vocações dos solos para atividades agrárias rentáveis (AB'SABER, 2003). É o caso típico de áreas de Cerrado do país, nas quais as modificações dependeram de transformações na produtividade dos seus solos. O domínio dos chapadões recobertos por cerrados e penetrados por florestas-galeria, de diversas composições, constitui um espaço físico, ecológico e biótico, de primeira ordem de grandeza (AB'SABER, 2003).

Os Cerrados, denominação dada ao conjunto específico de solo, vegetação e clima da região central do Brasil, fazem parte do ecossistema das savanas, que ocupa grande porção da região tropical do Mundo, sendo que a maior parte está localizada nos continentes americano e africano. Na região central do Brasil ocupam uma área heterogênea e não contínua de aproximadamente 180 a 210 milhões de hectares (Figura 1), ou seja, em torno de 20 a 25 % do território nacional e abrangem, geralmente, áreas de relevo plano ou suave ondulado, com boas possibilidades para o emprego de práticas agrícolas mecanizadas (GOEDERT, 1989; PEREIRA et al., 1997; BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007).

Esse bioma cobre os estados da Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, São Paulo e Tocantins.

No Cerrado, o clima é sazonal, ocorrendo estação fortemente chuvosa de verão e chuvas pouco frequentes no inverno, com três a quatro meses de períodos secos. As precipitações médias anuais variam entre 1.300 e 1.800 mm, com temperatura anual média de 20 a 26 °C, e clima classificado como Aw segundo a classificação de Koppen (ADAMOLI et al., 1987; GOEDERT, 1989; AB'SABER, 2003; BIGARELLA; BECKER; SANTOS, 2007).

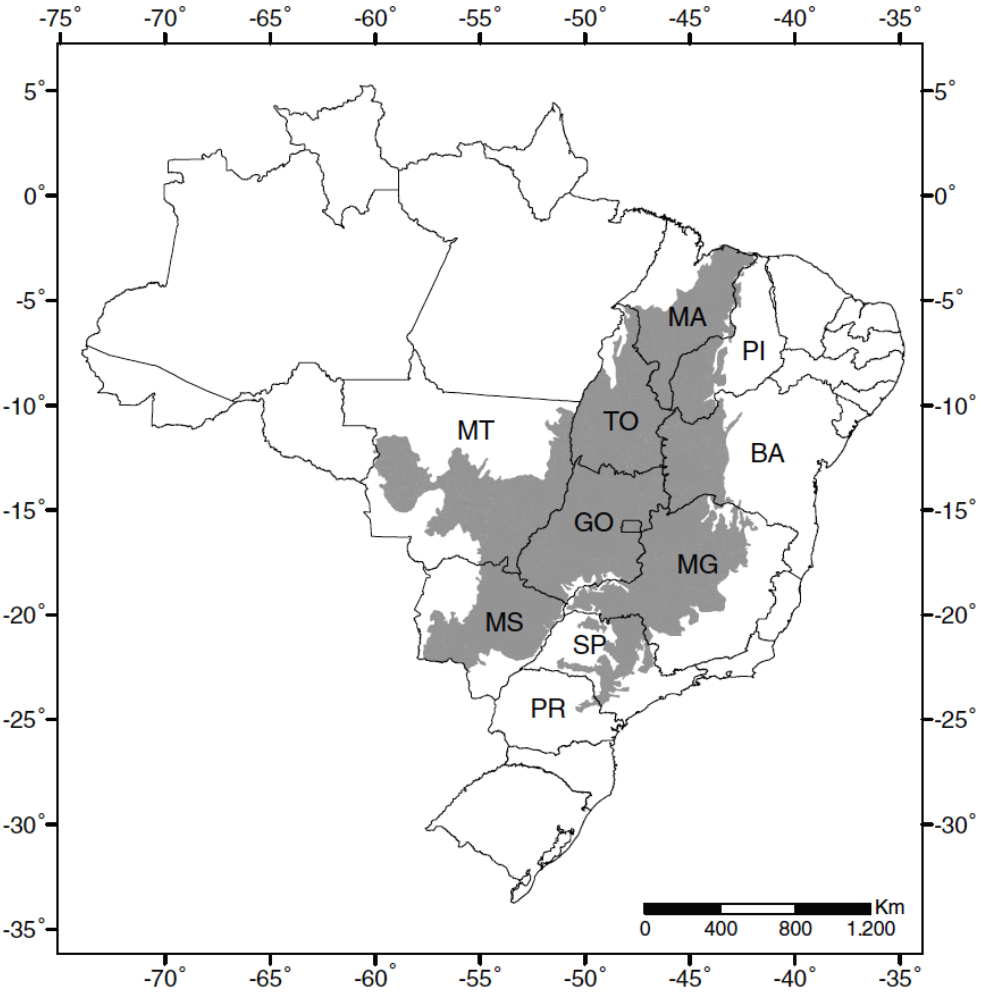

Figura 1 – Mapa do Brasil, sendo destacada em cinza a área correspondente a região do Cerrado (SANO et al., 2010)

Nas últimas décadas, o Cerrado sofreu mudanças drásticas, como consequência da sua incorporação ao processo produtivo brasileiro. Essas mudanças têm causado impactos negativos do ponto de vista ambiental, em função da substituição de vegetações nativas pelo estabelecimento de cultivos agrícolas, mas forneceu grande suporte para o crescimento populacional, fornecendo alimentos e outros produtos originários de biomassa vegetal (BARRETO et al., 2013).

Mesmo com o intenso uso desse bioma para a produção de alimentos, fibras e culturas energéticas, tem-se evidenciado uma redução na taxa de conversão de áreas com vegetação nativa para áreas com cultivo agrícola, o que reflete um uso mais eficiente de terras anteriormente incorporadas ao processo produtivo. No período compreendido entre os anos de 2002 e 2008 foram desmatados 14.179 km^2

por ano. Já no período de um ano entre os anos de 2009 e 2010 foram desmatados 6.469 km^2 (IBAMA, 2009, 2011).

Os estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul apresentam os menores índices de área coberta pela vegetação natural com 13, 32 e 32 % respectivamente. Oposto a essa realidade, os estados do Piauí, Maranhão, Tocantins e Bahia apresentam os maiores índices de cobertura pela vegetação natural com 91, 89, 79 e 74 %, respectivamente, o que os expõe como os estados com maior potencial de abertura de novas áreas para cultivo. As duas classes mais representativas de uso da terra no Cerrado são as pastagens cultivadas, que cobrem cerca de 54 milhões de hectares, e os cultivos agrícolas, que cobrem cerca de 22 milhões de hectares (Figura 2) (SANO et al., 2008, 2010).

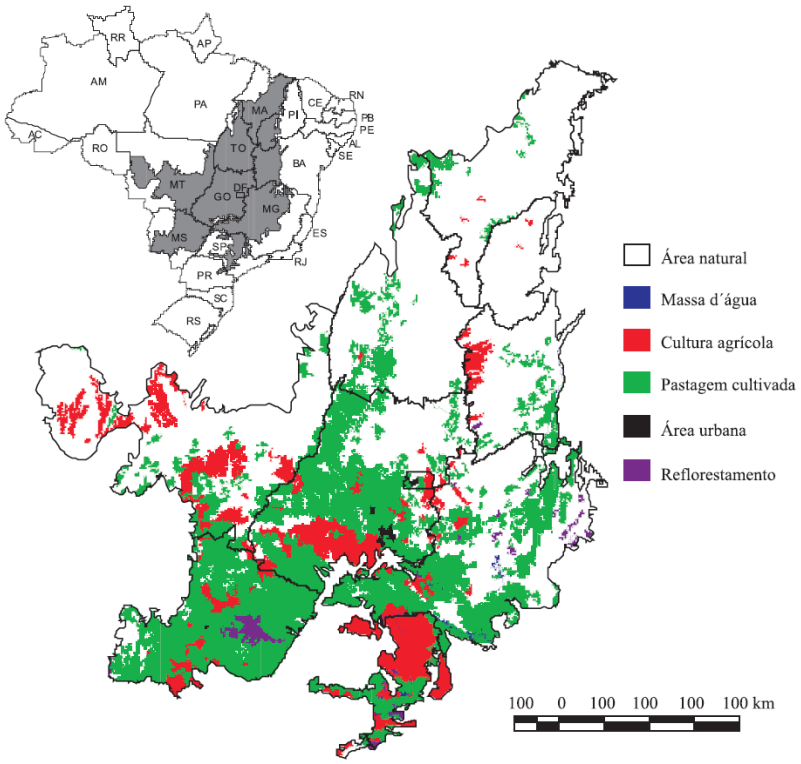

Figura 2 – Mapa do Brasil e em destaque a região do Cerrado demonstrando os principais tipos de uso do solo (SANO et al., 2008)

Os principais fatores que contribuem para a variabilidade de solos no Cerrado são o material de origem e o relevo. As combinações desses fatores deram origem às seguintes classes de solo: Latossolo, Neossolo, Argissolo, Plintossolo, Gleissolo, Nitossolo e Cambissolo (CORREIA; REATTO; SPERA, 2004). Os Latossolos predominam nesse domínio, com participação em torno de 45,7 % da área total. São de textura argilosa e média e com propriedades que limitam o crescimento das

raízes das plantas, exigindo práticas de manejo adequadas. Possuem baixa capacidade de troca de cátions (CTC), com acidez elevada e baixo teor de nutrientes, especialmente de P. São, assim, solos com alto grau de desenvolvimento, apresentando problemas de acidez e deficiência de nutrientes em todo o perfil (LOPES, 1983; SOUSA; LOBATO, 2004).

Na Bahia, o Cerrado ocupa uma área de aproximadamente 15 milhões de hectares, situada na Região Oeste do Estado, o que representa em torno de 7,5 % da área de cerrado do País e 27 % do território baiano (SANO et al., 2010). Desde a década de 1980 essa região vem sendo utilizada de forma crescente com cultivos agrícolas. Nesse processo de ocupação agrícola do oeste baiano, as políticas públicas e suportes econômicos e políticos têm desempenhado papel importante para os produtores terem acesso às terras (SANO et al., 2011).

Assim como ocorreu em âmbito nacional, no Estado da Bahia houve, também, redução na remoção da vegetação natural do Cerrado. No período compreendido entre os anos de 2002 e 2008 foram desmatados 1.544 km^2 por ano. Já no período de 1 ano entre os anos de 2009 e 2010 foram desmatados 726 km^2 (IBAMA, 2009, 2011).

A área plantada no Oeste baiano, com culturas agrícolas, passou de aproximadamente 225 mil hectares, em 1985, para mais de 1,8 milhão de hectares em 2005, o que equivale a um acréscimo de 352 %. Dentre os municípios que compõem a região agrícola do oeste da Bahia, destaca-se o município de São Desidério pela sua contribuição para produção agrícola da região, sendo esse o município que apresentou, em 2005, a maior extensão de culturas agrícolas, 475 mil hectares (SANO et al., 2011). De acordo com Spagnolo et al. (2012), no ano de 2008 a vegetação natural cobria 57,19 % da área do município, enquanto que a agricultura estava presente em 32,54 % frente aos 4 % no ano de 1984. Esses dados evidenciam um considerável crescimento (desenvolvimento) da área utilizada para fins agrícolas nesse município.

Dentre as principais culturas produzidas no Cerrado baiano, destacam-se a soja, o milho e o algodão, que na safra 2012/2013 produziram, juntas, aproximadamente 5,8 Tg, o que correspondeu a um valor bruto de produção (VBP) de aproximadamente 4,8 bilhões de reais. Para essa mesma região, considerando as mesmas culturas, estima-se uma produção de aproximadamente 13 Tg na safra

2020/2021, chegando até 30 Tg na safra 2050/2051 (ASSOCIAÇÃO DE AGRICULTORES E IRRIGANTES DA BAHIA - AIBA, 2013).

Diversos materiais deram origem aos solos do Oeste da Bahia. Entre eles estão siltitos, argilitos, calcários e ardósias do Grupo Bambuí, dando origem aos solos mais argilosos, eutróficos ou distróficos, em função do aparecimento, ou não, do material calcário. Outros materiais seriam arenitos da Formação Urucuia, dando origem aos solos menos argilosos, sendo essa a formação predominante do local, como também sedimentos areno-argilosos da Formação Vazantes e sedimentos do Holoceno (VALLADARES, 2002).

Diversos estudos voltados para a área de solos e nutrição de plantas, em especial à dinâmica dos nutrientes, têm sido realizados envolvendo os solos do Cerrado. Esses estudos têm como ponto comum o fato de estarem relacionados a solos pobres em nutrientes, destacando-se na maioria das situações a necessidade de calagem e adubação fosfatada (ALVIM; ARAÚJO, 1952; McCLUNG et al., 1958; ALVIM; SANTANA; MIRANDA, 1968). Sem dúvidas, a importância crescente das regiões de Cerrado no contexto da produção agrícola brasileira, tem requerido que tais estudos se tornem cada vez mais eficientes no sentido de apontar caminhos mais adequados para o manejo do suprimento nutricional às plantas, naquelas condições.

Alvim e Araújo (1952), avaliando o solo como fator ecológico para o desenvolvimento da vegetação na região Centro-Oeste do Brasil, já indicavam a condição de solos altamente desenvolvidos, ácidos e com baixo teor de bases trocáveis, especialmente Ca^{2+}. Os autores concluíram que, em função da migração contínua da população para a região Centro-Oeste do Brasil, estudos deveriam ser feitos para avaliar o potencial econômico da região e que, como o crescimento e distribuição das diversas vegetações de Cerrado foram regulados pelo fator solo, o solo deveria ser corrigido em caso de uso agrícola.

Diferentemente do estudo conduzido por Alvim e Araújo (1952), que estudaram o solo para explicar a variação de ocorrência de espécies vegetais nativas do Cerrado, McClung et al. (1958), vislumbrando a premente necessidade de uso das áreas de Cerrado para aumentar a produção agrícola, avaliaram essas áreas do ponto de vista do potencial de produção desses solos. A conclusão desse trabalho já demonstrava uma deficiência pronunciada de P nesses solos. Quando todos os nutrientes menos o P eram fornecidos às plantas, a produção de matéria seca era

de 5 a 10 % da quantidade produzida no tratamento completo. Os autores ressaltam a importância da adubação fosfatada para essas áreas, além da prática da calagem, indicando a nutrição fosfatada como o problema número um ao considerar o futuro agrícola dessa região, destacando que os resultados eram animadores tendo em vista o uso agrícola dessas áreas, sem se esquecer dos estudos sobre doses e modo de aplicação dos fertilizantes.

Em função da interação benéfica entre a calagem e a disponibilidade de P, demonstrada por outros autores (McCLUNG et al., 1961; MIKKELSEN; FREITAS; McCLUNG, 1963), Malavolta et al. (1965), usando ^{32}P comprovaram que, de fato, a calagem teve efeito significativo sobre a disponibilidade de P, indicando que doses crescentes de calcário aumentaram de modo linear a quantidade de P disponível às plantas.

A partir da década de 1970, os estudos relativos a solos e nutrição de plantas na região do Cerrado cresceram de maneira significativa, culminando em diversos trabalhos que permitiram de fato o uso mais intensivo e em larga escala dessa região.

Um amplo e importante estudo desenvolvido por Lopes e Cox (1977), permitiu uma caracterização química em âmbito regional dos solos sob Cerrado, possibilitando comprovar o que já vinha sido colocado pontualmente por outros pesquisadores. Nesse trabalho foram coletadas 518 amostras compostas numa área de, aproximadamente, 600.000 km^2 abrangendo os solos mais representativos do Cerrado. Esse estudo demonstrou que 98 % dessas amostras apresentavam pH em água abaixo de 6,0, sendo que a média foi 5,0, e que a saturação por alumínio atingiu valores de até 89,4 %, com 91 % das amostras apresentando valores maior que 20 %. Em relação ao P, 92 % das amostras apresentaram teores abaixo de 2 mg dm^{-3}, extraído por Mehlich-1. Para Ca^{2+} e Mg^{2+}, observou-se, que a maioria das amostras apresentava também valores abaixo dos limites considerados baixos para a região.

Em função da grande limitação imposta pelo baixo teor de P às altas produtividades agrícolas almejadas e da necessidade de definições de esquemas de adubação visando à máxima eficiência da prática, o P passou a ser amplamente estudado nos solos dessa região.

A dinâmica do P em ecossistemas naturais e manejados é estabelecida em grande parte pelas interações do nutriente com as fases inorgânica e orgânica do

solo, e com os microrganismos. Portanto, pesquisas detalhadas sobre a dinâmica e a disponibilidade do P requerem a separação e a identificação das diferentes formas do nutriente no solo.

Dentro deste enfoque foram conduzidos diversos trabalhos sobre doses, modo, época e local de aplicação dos fertilizantes, interação do P com as frações minerais e orgânicas do solo, com o objetivo de entender a dinâmica desse nutriente no solo, dar suporte ao uso de fosfatos parcialmente ou totalmente acidulados, entre outros temas relacionados ao nutriente.

Após a aplicação de fertilizantes fosfatados, a maioria do P adicionado não é absorvida pelas plantas, pois se transforma em formas insolúveis ou adsorvidas a coloides minerais do solo (óxidos de Fe e Al) (NEPTUNE; MURAOKA; STEWART, 1979; STEVENSON; COLE, 1999). Os óxidos possuem uma superfície muitas vezes porosa, que possibilita a difusão do P, inicialmente adsorvido à superfície externa, para seu interior. Nos solos tropicais em avançado grau de desenvolvimento, como em alguns Latossolos do Cerrado, o solo é um forte dreno de P e, para torná-lo fonte, são necessárias altas doses de fertilizantes fosfatados. Esses solos podem adsorver mais de 2 mg cm^{-3} de P (KER, 1995), quando a incorporação do fertilizante é feita na camada de 0 a 0,20 m (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

Inicialmente, os trabalhos que objetivavam compreender a dinâmica do P por meio da interação com os componentes minerais e orgânicos do solo foram efetuados basicamente pela adição de P ao solo, em quantidades conhecidas visando determinar a sua fixação e, por consequência, a sua (in)disponibilidade, como no estudo desenvolvido por Almeida Neto e Brasil Sobrinho (1977). Esses autores, estudando a fixação de fósforo em solos sob Cerrado do Estado de Goiás, observaram que a fixação foi sempre maior no solo menos argiloso (236 g kg^{-1} de argila) em relação ao solo mais argiloso (502 g kg^{-1} de argila) independentemente da dose de P aplicada que variou de 50 até 1.500 mg kg^{-1}. O solo menos argiloso apresentou um teor de fósforo total de 413 mg kg^{-1} e extraído por Mehlich-1 de 1,4 mg kg^{-1}, enquanto que solo mais argiloso apresentou um teor de fósforo total de 1.835 mg kg^{-1} e extraído por Mehlich-1 de 6,6 mg kg^{-1}. Era de se esperar que o solo mais argiloso apresentasse maior potencial de fixação de fosfato. Porém, em função das quantidades de fósforo total e disponível do solos estudados serem naturalmente mais altas no solo mais argiloso, pelo material de origem, os sítios de

adsorção possivelmente já estavam parcialmente saturados resultando numa menor fixação do fosfato do que no solo menos argiloso.

Com o crescente interesse no uso agrícola dessas áreas, os trabalhos de pesquisa passaram a buscar um melhor entendimento sobre os fenômenos que regulam a disponibilidade de P às plantas.

Nesse sentido, Lopes e Cox (1979), avaliando a relação entre características físicas, químicas e mineralógicas com a fixação de fósforo, verificaram que, em todos os casos estudados, a porcentagem de argila e de matéria orgânica apresentaram excelente correlação com a adsorção máxima de P. Os autores ainda ressaltaram que, diferentemente dos solos menos desenvolvidos da região temperada e subtropical, em que o Al^{3+} livre se correlaciona bem com a fixação de P (SYERS et al., 1971), o processo de precipitação de fosfatos com o Al^{3+} livre foi de menor importância que a adsorção de fósforo pelos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, mesmo com baixos níveis de fósforo na solução do solo; observaram ainda, que, entre os compostos de ferro e alumínio a reatividade do fósforo foi maior com os compostos de alumínio.

Esses resultados confirmam aqueles obtidos por Leal e Velloso (1973), que estudando a adsorção de fosfato em horizontes A de nove Latossolos sob vegetação de Cerrado, obtiveram correlação altamente significativa entre adsorção máxima de fósforo e teores de óxidos de alumínio pouco cristalinos ($r = 0,867$), alta correlação entre a adsorção de fósforo e argila ($r = 0,938$) e matéria orgânica ($r = 0,922$), baixa correlação entre a adsorção de fósforo e óxidos de Fe pouco cristalinos ($r = 0,417$) e nenhuma correlação entre os teores de Al^{3+} livre e a adsorção de fósforo.

Essas informações foram de fundamental importância, por evidenciar a importante participação dos óxidos de Al e Fe na fixação de P em solos sob Cerrado em detrimento do Al^{3+}, contrapondo-se ao conhecimento mais difundido na época, que atribuía ao Al^{3+} maior relevância em relação à fixação do fósforo, com base em estudos com solos de regiões temperadas, com suas peculiaridades e diferenças em relação ao ambiente tropical.

Resultados semelhantes aos de Leal e Velloso (1973) e Lopes e Cox (1979) foram obtidos por Bahia Filho et al. (1983), em relação à alta e significativa correlação entre a adsorção máxima de fósforo e o carbono e o conteúdo de argila do solo. Uma informação relevante, originária desse trabalho, é que embora a fração argila apresente estreita correlação com a adsorção, é importante a identificação dos

componentes dessa fração, pois podem ocorrer variações em função do tipo e da quantidade dos componentes da fração argila (LOPES; COX, 1979; BAHIA FILHO et al., 1983). Esta informação foi posteriormente levada em consideração em outros estudos que buscavam entender a disponibilidade de P e na recomendação de adubação fosfatada.

Buscando melhorar a eficiência no uso do P em solos tropicais, os pesquisadores passaram a estudar, também, o tempo em que as reações de fixação do P ocorriam, objetivando a obtenção de subsídios para nortear o planejamento de aplicação de fertilizantes, visando minimizar a fixação de P e, por consequência, o aumento na sua disponibilidade às plantas.

Gonçalves et al. (1985), avaliando a cinética de adsorção de fósforo em solos de Cerrado, observaram que 75 % de adsorção foi completada em um tempo de equilíbrio entre menos de meia hora até 12 horas, em função da capacidade de adsorção de cada solo, e que, com a calagem a adsorção de fósforo foi reduzida na maioria dos solos. Os resultados demonstraram que, embora mais de 90 % do fósforo aplicado sejam adsorvidos na primeira hora de contato, as reações podem demorar vários dias.

Gonçalves et al. (1989) demonstraram, mediante a extração com diversos extratores químicos, entre eles Mehlich-1 e resina de troca aniônica, que ocorrem duas fases distintas de adsorção. A primeira, mais rápida, com uma diminuição brusca dos teores de fósforo extraídos pelos extratores químicos desde o tempo zero até os primeiros quinze dias de incubação, e a segunda mais lenta, onde após 15 até 300 dias foram detectadas alterações discretas nos teores de fósforo. Vale ressaltar o comportamento da produção de matéria seca de plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) nesse estudo. Mesmo havendo uma redução considerável nos teores de fósforo nos primeiros quinze dias e mantendo-se no mesmo patamar após esse período, esse efeito só foi detectado nas plantas a partir dos 30 a 60 dias de incubação, onde a produção de matéria seca atingiu valores semelhantes aos do tratamento sem aplicação de fósforo. Isso indica que, apesar da diminuição brusca observada pelos extratores químicos até os 15 dias de incubação e posterior manutenção dos teores, havia fósforo no solo que foi absorvido pelas plantas e que não foi detectado pelos extratores químicos.

Volkweiss e Raij (1977) comentam que, sendo uma reação de adsorção um processo rápido, a reação inicial do P adicionado tem sido considerada como uma reação de superfície (adsorção).

Ainda que esses estudos permitissem uma avaliação do comportamento do P no solo e, consequentemente, da sua disponibilidade às plantas, medida pelos extratores químicos então utilizados de forma rotineira, tornou-se evidente a necessidade de se avaliar as transformações do P no solo ao longo do tempo e quais frações do solo seriam responsáveis pelo acúmulo e pela disponibilização de P para as plantas.

Resultados na literatura, como os de Gonçalves et al. (1989), indicavam que os métodos de extração utilizados eram pouco eficientes em predizer o P disponível às plantas em solos de Cerrado. Portanto, faziam-se necessárias mais informações a respeito dos diferentes compartimentos de P nos solos e como seria a interação entre eles.

Em função disso, recorreu-se às técnicas conhecidas como extração sequencial ou fracionamento químico, com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre a dinâmica do elemento no solo. Essas técnicas passaram a ser usadas com mais frequência no Brasil a partir do final da década de 1980 e início da década de 1990 e são amplamente empregadas no estudo do comportamento de metais pesados e elementos essenciais ao crescimento das plantas.

Esses métodos são, na sua maioria, baseados na extração do elemento com ácidos, bases, sais e resinas de trocas iônicas. Os métodos de fracionamento do P do solo têm como pressuposto a extração sequencial em uma amostra de solo, com uma série de reagentes ou soluções extratoras com seletividade para dissolver as diversas formas de P, baseando-se, principalmente, na natureza e força das interações entre o P e as fases inorgânica e orgânica do solo, além dos microrganismos (CONDRON; NEWMAN, 2011; GATIBONI et al., 2013).

Em função da grande variedade de solos no Mundo, métodos que utilizam a combinação de diversos extratores foram desenvolvidos com intuito de avaliar o P do solo disponível às plantas. Entre outros podem ser mencionados o de Chang e Jackson (1957), para determinar formas inorgânicas, Bowman e Cole (1978), para formas orgânicas, Tiessen e Moir (2008), para formas orgânicas e inorgânicas. Este último resultou da modificação do método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), que combina a determinação de formas orgânicas, inorgânicas e o P ligado

aos microrganismos. Além de se reconhecer no método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) a vantagem da inclusão do P ligado aos microrganismos (CONDRON; NEWMAN, 2011), deve-se destacar também o fato de relacionar as frações de P no solo à sua disponibilidade para as plantas, além de quantificar o P orgânico lábil do solo (ARAÚJO; SALCEDO; SAMPAIO, 1993).

De modo geral, as frações obtidas pelo fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), são divididas em: lábil, moderadamente lábil e não lábil.

Cross e Schlesinger (1995), numa revisão sobre o fracionamento de Hedley, classificaram como lábil as frações que correspondem ao P disponível para as plantas e microrganismos em curto espaço de tempo; como não lábil as frações ligadas fortemente aos coloides do solo e que não são disponíveis para as plantas; como não oclusa a fração que corresponde ao P extraído com NaOH e é biologicamente disponível em médio espaço de tempo; e como oclusa a fração cujo P é somente disponível em longo espaço de tempo.

Outra divisão na classificação das frações foi proposta por Cross e Schlesinger (1995). As frações foram agrupadas sob dois compartimentos, o P biológico e o P geoquímico. No P biológico estão inclusas as frações orgânicas extraídas com $NaHCO_3$ e NaOH, e no P geoquímico as frações inorgânicas extraídas com resina trocadora de íons, $NaHCO_3$, NaOH, HCl e o P orgânico e inorgânico da fração residual. Esses autores sugeriram a criação de um índice para expressar a importância do P biológico, mais especificamente a fração orgânica extraída com $NaHCO_3$, como fonte de P para as plantas.

Mesmo com a existência de diversos métodos de fracionamento de P, dedicou-se especial atenção nesta revisão àqueles que sejam sensíveis ao manejo do solo, principalmente devido à quantidade de P aplicada e ao tempo de uso da terra. Para o fim específico de monitorar o impacto do uso e manejo do solo, o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e as modificações propostas posteriormente por diversos autores são adequadas (NEGASSA; LEINWEBER, 2009; CONDRON; NEWMAN, 2011).

Condron e Newman (2011) indicaram que as técnicas de fracionamento podem ser utilizadas para examinar as mudanças ao longo do tempo em um determinado ambiente. Eles sugerem também a adaptação de métodos bioquímicos para especiação do P orgânico aos fracionamentos utilizados atualmente.

Diversos trabalhos foram conduzidos no Brasil avaliando a dinâmica do P no solo utilizando diversos métodos de fracionamento químico como, por exemplo, os trabalhos de Tiessen, Salcedo e Sampaio (1992), Araújo, Salcedo e Sampaio (1993), Selles et al. (1997), Fernandes et al. (2002), Almeida, Torrent e Barrón (2003), Araújo, Schaefer e Sampaio (2003), Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2003), Araújo, Schaefer e Sampaio (2004a, 2004b), Busato, Canellas e Velloso (2005), Gatiboni, Kaminski e Santos (2005), Silveira, Araújo e Sampaio (2006), Souza et al. (2007), Gatiboni et al. (2007), Galvani, Hotta e Rosolem (2008), Gonçalves e Meurer (2009), Galvão e Salcedo (2009), Partelli et al. (2009), Xavier et al. (2009, 2011), Assis et al. (2010), Tiecher et al. (2012), Souza Júnior et al. (2012), Guardini et al. (2012), Schoninger, Gatiboni e Ernani (2012), Alleoni, Fernandes e Correia (2012), Aguiar et al. (2013), Schimitt et al. (2013a, 2013b) e Janegitz, Inoue e Rosolem (2013).

Considerando a importância do Cerrado para o setor agropecuário brasileiro, percebe-se que não são muitos os trabalhos disponíveis na literatura abordando estudos dessa natureza em solos de Cerrado. Entre os disponíveis podem ser mencionados os trabalhos de Moreira et al. (1991), Lilienfein et al. (2000), Neufeldt et al. (2000), Tokura et al. (2002), Motta et al. (2002), Silva et al. (2003), Santos et al. (2008), Pavinato, Merlin e Rosolem (2009), Pavinato, Dao e Rosolem (2010), Ruckamp et al. (2010), Resende et al. (2011), Carneiro et al. (2011), Tokura et al. (2011), Reis et al. (2011) e Lacerda et al. (2013).

Moreira et al. (1991), avaliando o efeito do tempo de contato do fósforo com o solo verificaram, por meio do fracionamento proposto por Chang e Jackson (1957), que, inicialmente, o maior acréscimo foi na fração P ligado ao alumínio (P-Al) e que com o passar do tempo houve redução nessa fração e aumento na fração P ligado a ferro (P-Fe). Os solos utilizados nesse estudo foram os mesmos do trabalho de Gonçalves et al. (1989). Percebeu-se que o decréscimo nos teores de P recuperado pelos extratores que buscam avaliar o P disponível às plantas, apresentou o mesmo padrão de decréscimo da fração P-Al. Isso sugere que essa fração estaria associada à fração mais lábil desses solos, em função de a solubilidade dos compostos de alumínio ser maior nesse pH e, consequentemente, acontece liberação do P, enquanto esse comportamento não ocorre com a fração P-Fe, que, por consequência, corresponderia à fração não lábil do solo e seria responsável por reter o P oriundo da solubilização da fração P-Al.

Lilienfein et al. (2000), avaliando a influência de diferentes usos de solo sob Cerrado sobre as frações de P no solo, mediante uma modificação do fracionamento químico proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), encontraram os maiores teores de P nas frações de média e baixa disponibilidade [(ácido clorídrico concentrado (HCl_{conc}) e digestão do solo com ácido nítrico (HNO_3) e ácido perclórico ($HClO_4$)]. As frações extraídas com bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$), tanto inorgânica quanto orgânica, corresponderam de 4 a 5 % do teor de P total das áreas, que variou de 333 a 567 mg kg^{-1} obtidos pelas somas das frações. Nesse estudo verificou-se que houve influência do modo de uso da terra sobre o fósforo total do solo. O manejo dessas áreas sob plantio direto resultou num aumento de 64 % do P total em relação ao Cerrado nativo, enquanto no cultivo convencional tal aumento foi de 28 %, respectivamente, em relação ao Cerrado nativo. Em relação a distribuição das frações inorgânicas e orgânicas, nas frações extraídas por $NaHCO_3$ e hidróxido de sódio (NaOH) verificou-se que, na área de Cerrado nativo, o P orgânico correspondeu a 70 % do P dessas frações, enquanto que no cultivo convencional e no plantio direto o percentual foi menor que 50 %.

Neufeldt et al. (2000), objetivando identificar as transformações do P em solos de Cerrado após a mudança no uso da terra de vegetação nativa para diferentes cultivos, utilizando um esquema simplificado do fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), verificaram que, após 10 anos de cultivo, houve aumento nos teores de P em todas as frações avaliadas no solo argiloso (700 g kg^{-1} de argila) cultivado com soja e milho em rotação, em relação ao Cerrado nativo. Esses aumentos decresceram da fração lábil para a fração recalcitrante. No solo menos argiloso (150 g kg^{-1} de argila) houve acréscimo significativo apenas nas frações inorgânicas. Independentemente dos tipos de solos avaliados, os maiores teores de P foram encontrados na fração argila dos solos. No solo argiloso o P na fração argila correspondeu a 84 % de todo P do solo, enquanto que no solo menos argiloso esse valor foi de 72 %.

Tokura et al. (2002), avaliando as formas de P em solo sob plantio direto, mediante uma modificação do fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), mostraram que as formas de P não lábeis tendem a diminuir com o passar do tempo de cultivo sob plantio direto, indicando que esse sistema proporciona maior disponibilidade de P.

Motta et al. (2002), estudando a influência da mineralogia e do histórico de uso sobre a adsorção e formas de fósforo em Latossolos, pelo fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) modificado, verificaram que o maior teor de P foi detectado na fração extraída com NaOH, sendo que nos solos cultivados o P inorgânico foi maior que o P orgânico, ambos extraído com NaOH, e nos solos não cultivados essa situação foi inversa. Nesse trabalho os autores destacaram um aumento na relação [P ligado a cálcio/(P ligado a alumínio + P ligado a ferro)], indicando que o uso da calagem e adubações fosfatadas pesadas, situação comum na região do Cerrado, contribuiu para esse resultado.

Pavinato, Merlin e Rosolem (2009), avaliando as frações de fósforo em solos de Cerrado em função do manejo, por meio do fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) modificado, verificaram que as maiores proporções de P encontraram-se nas frações extraídas com NaOH. Os autores demonstraram que com a adição do fertilizante fosfatado houve aumento nas frações lábil e moderadamente lábil e em alguns casos na fração pouco lábil; eles concluíram que o manejo da adubação durante vários anos de cultivo pode levar à acumulação e manutenção do P no solo em frações menos disponíveis, após a colheita, o que pode resultar no aumento da disponibilidade de P para cultivos subseqüentes.

Para avaliar a influência do manejo de solos sobre as frações bioativas de P no solo, Pavinato, Dao e Rosolem (2010) conduziram estudo utilizando a água e enzimas como extratores, método não usado até então em solos sob Cerrado. Os autores concluíram que, em função da redução de práticas de manejo, houve um significativo acumulo de P nas frações lábeis do solo e que o plantio direto aparentemente manteve a zona do solo próxima à superfície biologicamente mais ativa do que no plantio convencional. Um ponto importante destacado pelos autores, considerando-se a constante necessidade de aprimoramento dos métodos de determinação de P disponível às plantas e também a relação direta da fração lábil determinada pelo método enzimático com a nutrição das plantas, é o fato dessa técnica ter se mostrado um caminho promissor inclusive para solos do Cerrado brasileiro que possuem baixos teores de P disponível e baixíssimas concentrações de formas lábeis de P orgânico.

Carneiro et al. (2011), avaliando as frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo de Cerrado com diferentes históricos de uso, observaram que as aplicações de fósforo aumentaram as formas orgânicas e

inorgânicas de P no solo. Os aumentos nas formas inorgânicas foram maiores nos solos com histórico de cultivo e adubação e nas formas orgânicas foram maiores nos solos adjacentes, sem histórico de cultivo e adubação.

Lacerda et al. (2013), avaliando a dinâmica do P inorgânico em solos de Cerrado após aplicação de fosfato reativo de Arad, encontraram alta correlação entre a fração P-Al e os extratores Mehlich-1, resina de troca iônica, ácido cítrico e Olsen, indicando que essa seria a fração responsável pelo fósforo disponível em solos já cultivados. Já para os solos não cultivados, ou seja, aqueles que serão cultivados pela primeira vez após a abertura da área, os resultados indicaram que as frações P-Al e P-Fe são responsáveis pelo P disponível.

Vale ressaltar a conclusão do trabalho de Negassa e Leinweber (2009) a respeito do cuidado que se deve ter na interpretação dos resultados gerados no ambiente temperado e no ambiente tropical, em função das diferenças entre a mineralogia e as propriedades físicas, químicas e físico-químicas dos solos. Esses autores também evidenciam que a associação do fracionamento químico com outras técnicas, como ressonância magnética nuclear (RMN) e X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) pode permitir informações mais detalhadas a respeito das espécies que estão por trás das frações e contribuir para o avanço do conhecimento sobre a dinâmica do P no solo, em particular do P orgânico.

Desde o início da década de 1990, intensificando-se na década de 2000, técnicas baseadas na luz synchroton passaram a ser utilizadas com mais frequência nos diversos campos da ciência. De maneira geral, a luz synchrotron é definida como uma radiação eletromagnética emitida quando elétrons, movendo-se a velocidade próxima à velocidade da luz, são forçados a mudar de direção sob a ação de um campo magnético. O uso dessa técnica fundamentou-se no fato de ser uma análise direta e não destrutível, utilizada na ciência do solo para especiação química de contaminantes e nutrientes (LOMBI; SUSINI, 2009; HESTERBERG, 2010; LOMBI; HETTIARACHCHI; SCHECKEL, 2011).

Técnicas que utilizam a luz synchrotron como a espectroscopia de absorção de raios-X (XAS – **X**-ray **A**bsorption **S**pectroscopy) têm sido aplicadas em diversos estudos nas áreas de ciência do solo, mineralogia e geoquímica. O acrônimo XAS engloba duas técnicas que são amplamente utilizadas em ciência do solo. A primeira denominada de espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES – **X**-ray **A**bsorption **N**ear **E**dge **S**tructure) e a segunda denominada de espectroscopia

da estrutura fina de absorção (EXAFS – **E**xtended **X**-ray **A**bsorption **F**ine **S**tructure) (KELLY; HESTERBERG; RAVEL, 2008).

As pesquisas utilizando a técnica XANES têm fornecido informações valiosas sobre os conceitos comumente aceitos que foram desenvolvidos a partir de décadas de pesquisa sobre o comportamento do P no solo. Essa técnica está fornecendo novas percepções que podem contribuir para o avanço dos modelos de especiação química aplicados à previsão da dinâmica do P em solos agrícolas (HESTERBERG, 2010; KIZEWSKI et al., 2011).

Visando à utilização da técnica XANES para identificação de formas de P no solo, Hesterberg et al. (1999) avaliaram o comportamento de diversos espectros de diferentes minerais com P na sua composição ou adsorvidos a eles. A conclusão desse trabalho foi animadora, pois os autores concluíram que os espectros obtidos de cada material avaliado continham características espectrais únicas e que, por esse motivo, a técnica poderia ser utilizada para distinguir diferentes formas de P no solo.

Beauchemin et al. (2003) avaliando as formas de P em solos que receberam aplicações do nutriente, observaram, por meio do fracionamento químico, que as maiores quantidade de P foram encontradas nas frações moderadamente lábil e não lábil, extraídas por NaOH e HCl + H_2SO_4, respectivamente; o P estava associado em maior quantidade com Al e/ou Fe nos solos com pH mais baixo e com Ca nos solos mais alcalinos. As mesmas amostras foram submetidas à técnica XANES e os resultados demonstraram que, nos solos ácidos (pH entre 5,5 e 6,2), de 44 a 88 % do P estava associado com Al e/ou Fe, sendo que a diferença corresponde a P ligado a Ca. Esse resultado demonstrou a existência de P ligado a Ca em solos ácidos e os autores relacionaram esse resultado com a constante aplicação de adubos fosfatados e calcário. Já nos solos alcalinos (pH em torno de 7,5) de 82 a 85 % do P estava associado ao Ca. A correlação entre os resultados obtidos por fracionamento químico e XANES contribuiu para a consistência dos resultados.

Buscando avaliar formas de aplicação de fertilizantes fosfatados e a relação entre a química e a disponibilidade do P, Khatiwada et al. (2012) utilizaram a técnica XANES e os teores de P extraídos por resina de troca iônica. Mediante o uso da técnica XANES observou-se que a aplicação do fosfato monoamônico (MAP) granulado em área total resultou em aumento na quantidade de P precipitado associado a Fe e na diminuição do P adsorvido, em comparação com a aplicação

em faixas. Quando extraído por resina de troca de íons, o P disponível foi maior quando o MAP foi aplicado em faixa. Esse resultado permitiu concluir que o P adsorvido foi responsável pelas formas mais solúveis do que as formas precipitadas de P.

Apesar de diversos autores indicarem, há algum tempo, a utilização das técnicas de fracionamento químico, RMN e XANES de maneira conjunta, buscando entender a dinâmica do P no solo, o primeiro trabalho associando essas técnicas foi publicado por Liu et al. (2013). Os autores concluíram que a combinação foi essencial para o melhor entendimento da dinâmica do P nos solos estudados, ressaltando que da associação delas podem resultar refinamentos nas técnicas mais simples, como o fracionamento químico, permitindo melhorar a compreensão sobre o comportamento do nutriente, para melhorar o seu o manejo no solo.

Conforme demonstrado acima, estudos têm sido desenvolvidos em diversos locais do mundo usando a técnica XANES aplicada a solos, contudo, não são disponíveis na literatura trabalhos em que ela tenha sido utilizada para o entendimento da dinâmica do P em solos brasileiros.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área de estudo

As áreas utilizadas no estudo estão localizadas na Fazenda Catarinense, no Município de São Desidério – BA, situada a 890 m de altitude, na latitude de 13°17'26.50"S e longitude 46°1'17.60"O. O clima é Aw conforme a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 24 °C e precipitação média anual de 1.200 mm, distribuídos entre os meses de novembro e março, tendo também um período seco bem definido entre abril e setembro, demarcando-se assim duas estações climáticas distintas: a chuvosa e a seca (TOSSELO, 2000). O solo é do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (SANTOS, 2013) originado de arenito da formação Urucuia, também chamada de Itapecuru. O relevo é plano e a vegetação classificada como cerrado subperenifólio/subcaducifólio de porte geralmente arbustivo que, em certos trechos, torna-se mais aberto passando a campo cerrado.

Foram amostradas quatro áreas com diferentes tempos de uso, além de uma área de Cerrado com vegetação nativa (VN) próxima a elas (Figura 3). As quatro áreas mencionadas tinham respectivamente 5, 8, 12 e 18 anos de exploração, desde a conversão de vegetação nativa para uso agrícola. As áreas de 5, 8 e 12 anos foram cultivadas no sistema de semeadura direta, desde o início do uso agrícola, enquanto que a área de 18 anos foi cultivada nos seis primeiros anos em cultivo convencional e, desde então, em semeadura direta, realidade comum nas áreas de produção de soja, milho e algodão da região, com vegetação espontânea no período de repouso entre as safras. As adubações foram feitas a lanço na superfície.

Tabela 1 – Histórico das áreas utilizadas no estudo

Área com 18 anos de cultivo												
ANO	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**
Cultura							**milho**	**algodão**	**milho**	**soja**	**milho**	**algodão**
Fosfato monoamônico (kg/ha)												
Superfosfato simples (kg/ha)										**367**	**412**	**600**
Calcário (t/ha)	**1,5**		**1,5**		**1,5**		**1,5**		**1,5**		**1**	
Gesso (t/ha)												
Área com 12 anos de cultivo												
ANO	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**
Cultura	**soja**	**milho**	**soja**	**milho**	**soja**	**milho**	**algodão**	**miho**	**soja**	**milho**	**algodão**	**milho**
Fosfato monoamônico (kg/ha)										**200**		
Superfosfato simples (kg/ha)											**682**	**400**
Calcário (t/ha)	**5**		**1,5**		**1,5**		**1,5**		**1,5**		**1**	
Gesso (t/ha)												
Área com 8 anos de cultivo												
ANO					**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**
Cultura					**soja**	**soja**	**milho**	**algodão**	**milho**	**soja**	**soja**	**algodão**
Fosfato monoamônico (kg/ha)												
Superfosfato simples (kg/ha)											**687**	**1.000**
Calcário (t/ha)					**5**		**1,5**		**1,5**		**2**	
Gesso (t/ha)												
Área com 5 anos de cultivo												
ANO								**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**
Cultura								**soja**	**soja**	**soja**	**milho**	**soja**
Fosfato monoamônico (kg/ha)								**150**	**150**			
Superfosfato simples (kg/ha)								**650**	**650**	**700**	**665**	**400**
Calcário (t/ha)								**6**	**1**	**1,2**	**3**	
Gesso (t/ha)								**1**				

As informações estão incompletas, pois no início das atividades da fazenda não foram feitos todos os registros das práticas agrícolas adotadas.

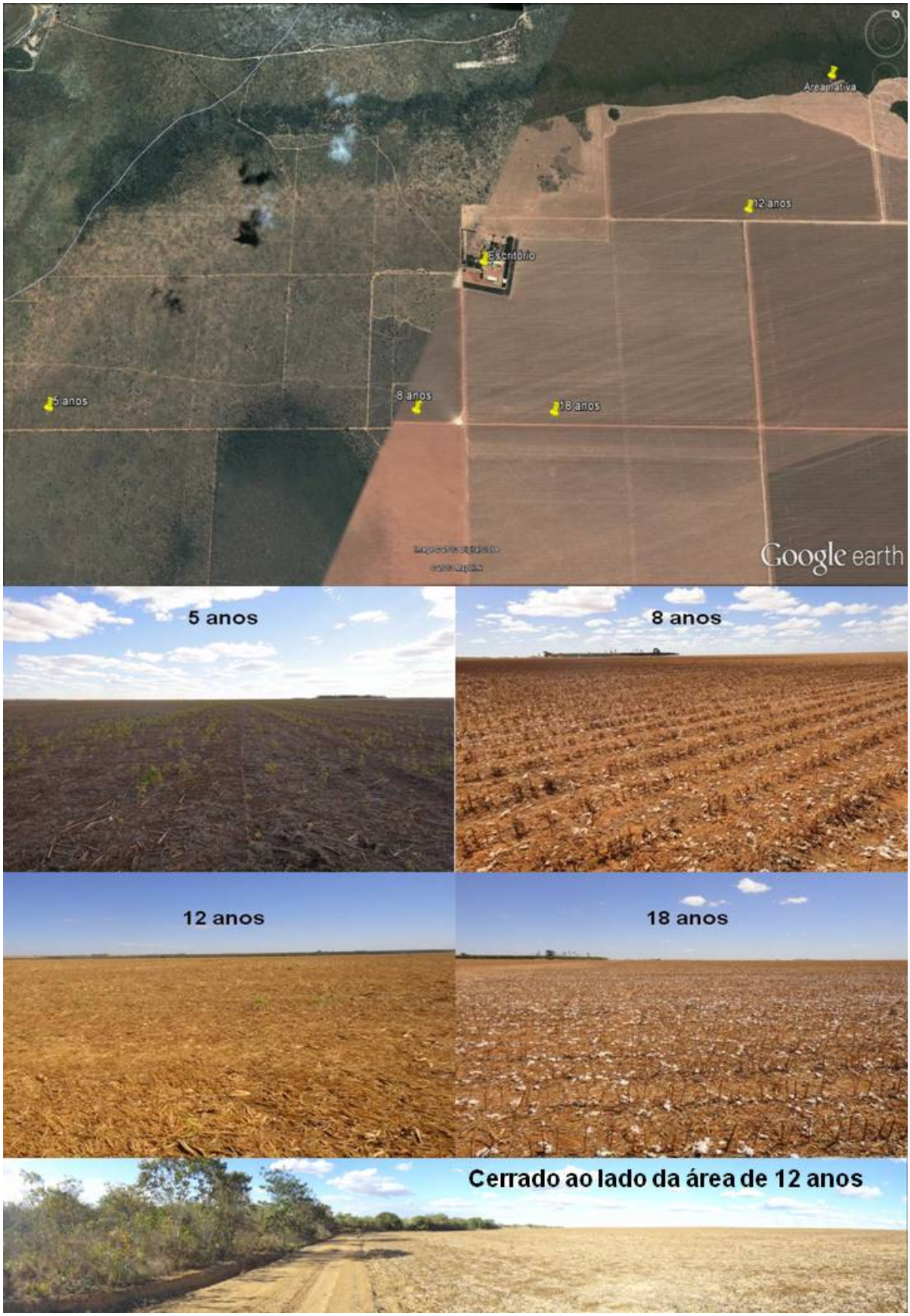

Figura 3 – Vista aérea da Fazenda Catarinense com a indicação das áreas amostradas e, em destaque, a situação de cada uma delas no momento da amostragem

2.2.2 Amostragem e beneficiamento do solo

As amostras foram coletadas em agosto 2012 entre as safras 2011/2012 e 2012/2013. Os critérios adotados para a amostragem foram extraídos e adaptados de Oliveira et al. (2002) e Anghinoni (2007). Para cada área foram coletadas cinco amostras compostas para cada uma das quatro camadas amostradas, 0 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,30; e 0,30 – 0,40 m. Cada amostra originou-se de 21 subamostras, totalizando assim 105 pontos amostrados em cada área, para cada uma das quatro camadas. Utilizou-se como instrumento de coleta a sonda (Figura 4), que apresenta a vantagem, em relação a outros instrumentos comumente utilizados, de evitar a perda de solo superficial e revolvimento do solo nas camadas sub-superficiais, resultando em maior precisão na amostragem.

Figura 4 – Sonda utilizada na amostragem

Como as adubações das áreas sempre foram realizadas a lanço, optou-se por usar as linhas de plantio como referências para a amostragem. Em cada uma das cinco linhas de referência foram amostrados três pontos na linha e 18 pontos ao lado

da linha de plantio. Houve um intervalo de cinco linhas entre as linhas amostradas (Figura 5). Na área nativa, a amostragem foi feita com deslocamentos aleatórios, dentro da área.

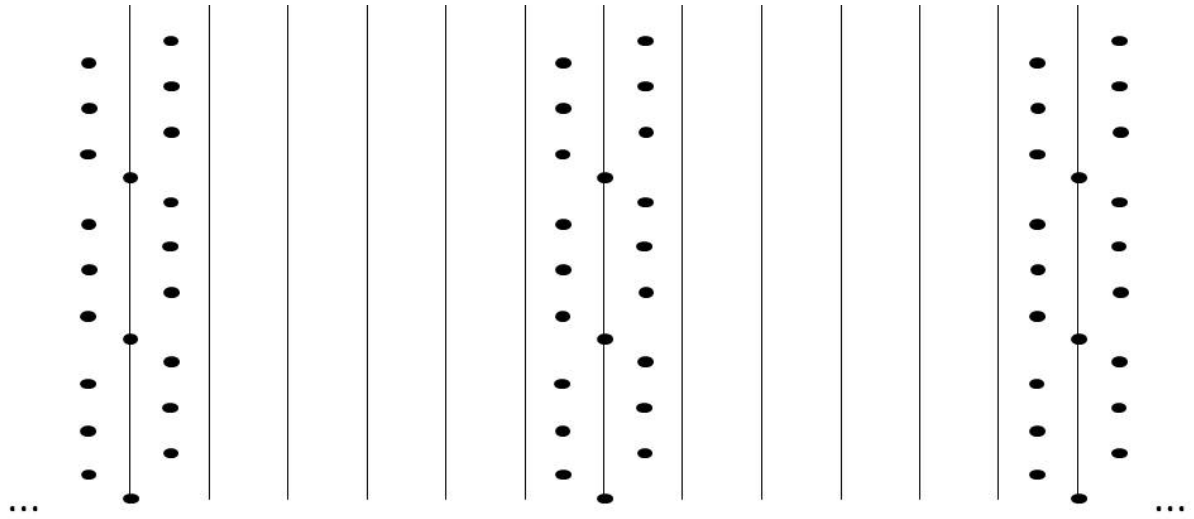

Figura 5 – Croqui das áreas mostrando o critério de amostragem utilizado para as áreas com 5, 8, 12 e 18 anos de cultivo agrícola

No total, foram coletadas 100 amostras compostas (5 áreas x 4 camadas x 5 amostras compostas por área e por camada amostrada).

Após a coleta as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm, resultando na terra fina seca ao ar (TFSA), e em seguida armazenadas em frascos plásticos.

2.2.3 Determinação dos atributos químicos

Os seguintes atributos químicos foram determinados: pH em solução de $CaCl_2$ 0,01 mol L^{-1} na relação solo:solução de 1:2,5; acidez potencial (H + Al) extraída com solução de acetato de cálcio 0,05 mol L^{-1} e determinada por titulometria com solução padronizada de NaOH 0,025 mol L^{-1} na presença do indicador fenolftaleína; acidez trocável (Al^{3+}) extraída com solução de KCl 1 mol L^{-1} e determinada por titulometria com uma solução padronizada de NaOH 0,025 mol L^{-1} na presença do indicador vermelho de fenol; Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis extraídos com solução de KCl 1 mol L^{-1} e por resina trocadora de íons, sendo ambos determinados por espectrofotometria de absorção atômica; K^{+} trocável extraído por resina trocadora de íons e determinado por fotometria de chama; P-disponível extraído pela

resina trocadora de íons em esferas (P-resina) e determinado por espectroscopia de absorção molecular (Ultravioleta e visível) (RAIJ et al., 2001); pH em água; P-disponível (P-M1) e K^+ trocável extraídos pela solução duplo ácida (Mehlich-1) (HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}) e determinados por espectroscopia de absorção molecular (Ultravioleta e visível) e fotometria de chama, respectivamente (SILVA et al., 2009); foi determinado, ainda, o teor de carbono orgânico total (COT) pelo método proposto por Yeomans e Bremner (1988).

A partir dos dados das determinações anteriores foram calculados os seguintes parâmetros químicos:

- Soma de bases (SB) – $mmol_c\ kg^{-1}$

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+$$

- Capacidade de troca de cátions efetiva (ctc ou t) – $mmol_c\ kg^{-1}$

$$ctc = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Al^{3+}$$

- Capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC ou T) – $mmol_c\ kg^{-1}$

$$CTC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + (H + Al)$$

- Saturação por bases (V) - %

$$V = \frac{SB}{CTC}\ x\ 100$$

- Saturação por alumínio (m) - %

$$m = \frac{Al^{3+}}{ctc}\ x\ 100$$

Foi determinado, também, o P-remanescente por meio da agitação do solo com uma solução de $CaCl_2$ 0,01mol L^{-1} contendo 60 mg L^{-1} de P (ALVAREZ V. et al., 2000) e o P-total.

Para determinação dos teores totais de P, as amostras foram digeridas em cadinhos de teflon sobre o banho de areia a 150 °C, utilizando 5 mL de ácido nítrico (HNO_3), 2 mL de ácido perclórico ($HClO_4$) e 5 mL de ácido fluorídrico (HF) adaptado de Muraoka (1984). Após a digestão os teores foram determinados pelo método proposto por Murphy e Riley (1962).

Os resultados estão apresentados na Tabela 2, exceto os teores de P Mehlich-1, Resina e remanescente que serão apresentados no item 2.3. Resultados e discussão.

Tabela 2 – Atributos químicos em quatro camadas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos

Área	pH		Cálcio (Ca^{2+})		Magnésio (Mg^{2+})		Potássio (K^{+})		Al^{3+}	H + Al	SB		CTC		CTCe		V		m		COT
	H_2O	$CaCl_2$	KCl	Resina	KCl	Resina	Mehlich-1	Resina	KCl	Acetato	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
									mmol$_c$ kg^{-1}									%			g kg^{-1}
Camada 1 (0-0,10 m)																					
Vegetação nativa	5,3	4,1	0,5	0,0	0,8	0,3	0,5	0,4	7,8	40,4	1,8	0,7	42,1	41,1	9,5	8,5	4	2	81	92	10,9
5 anos	7,4	6,7	16,4	23,3	10,4	19,9	2,4	2,0	0,0	4,4	29,2	45,2	33,6	49,6	29,2	45,2	87	91	0	0	5,3
8 anos	7,0	6,3	24,9	34,9	9,4	19,5	0,9	0,7	0,0	11,3	35,2	55,1	46,5	66,3	35,2	55,1	76	83	0	0	6,7
12 anos	6,8	6,0	29,2	30,7	13,0	15,6	2,3	2,0	0,0	22,2	44,5	48,3	66,7	70,5	44,5	48,3	67	69	0	0	10,6
18 anos	6,5	5,7	21,8	19,0	9,4	10,2	1,0	0,8	0,7	21,5	32,2	30,0	53,6	51,5	32,9	30,7	60	58	2	2	9,7
Camada 2 (0,10-0,20 m)																					
Vegetação nativa	5,3	4,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	6,3	32,7	0,5	0,3	33,2	33,0	6,8	6,6	1	1	93	96	8,8
5 anos	7,6	6,7	15,1	14,8	8,4	13,7	0,9	0,7	0,0	5,1	24,4	29,1	29,5	34,2	24,4	29,1	83	85	0	0	4,1
8 anos	6,7	5,7	14,1	8,4	5,8	6,3	0,4	0,2	0,0	13,8	20,2	14,9	34,1	28,7	20,2	14,9	59	52	0	0	4,7
12 anos	6,5	5,6	14,6	8,1	7,3	7,0	1,3	1,1	0,0	22,2	23,2	16,2	45,4	38,4	23,2	16,2	51	42	0	0	7,5
18 anos	5,8	4,8	9,0	1,2	3,6	2,3	0,5	0,3	1,7	25,5	13,2	3,9	38,6	29,3	14,9	5,6	34	13	11	30	6,7
Camada 3 (0,20-0,30 m)																					
Vegetação nativa	5,4	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	5,6	29,1	0,2	0,1	29,3	29,2	5,8	5,7	1	0	96	98	7,4
5 anos	7,3	6,5	10,8	5,3	6,4	6,5	1,0	0,7	0,0	6,5	18,2	12,5	24,7	19,1	18,2	12,5	73	66	0	0	3,2
8 anos	6,3	5,4	9,0	2,9	3,8	4,2	0,4	0,3	0,0	13,8	13,2	7,4	27,0	21,2	13,2	7,4	49	35	0	0	3,7
12 anos	6,2	5,4	9,8	3,2	5,2	4,4	1,6	1,2	0,7	22,9	16,6	8,9	39,5	31,8	17,3	9,6	42	28	4	8	6,8
18 anos	5,6	4,8	7,6	1,8	3,1	3,3	0,8	0,6	1,7	24,7	11,5	5,7	36,2	30,4	13,2	7,4	32	19	13	23	6,2
Camada 4 (0,30-0,40 m)																					
Vegetação nativa	5,5	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	4,8	25,1	0,2	0,1	25,3	25,1	5,1	4,9	1	0	96	99	7,3
5 anos	6,7	5,9	6,6	0,4	4,7	4,5	0,8	0,6	0,0	7,3	12,1	5,5	19,4	12,8	12,1	5,5	62	43	0	0	3,3
8 anos	5,7	5,0	5,1	0,4	2,2	2,3	0,6	0,4	0,7	16,0	7,9	3,1	23,9	19,1	8,6	3,8	33	16	8	19	3,0
12 anos	5,7	5,1	6,0	0,4	3,1	2,9	1,2	1,0	1,0	26,2	10,3	4,3	36,5	30,4	11,3	5,2	28	14	9	19	5,5
18 anos	5,5	4,9	6,1	0,4	2,6	2,1	0,9	0,7	1,7	23,3	9,6	3,2	32,9	26,4	11,3	4,9	29	12	15	35	5,6

SB 1: Soma das bases trocáveis (Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos por KCl 1mol L^{-1} e K^{+} por Mehlich-1); CTC 1: Capacidade de troca de cátions a pH 7[SB 1 + (H+Al)]; CTCe 1: Capacidade de troca de cátions efetiva do solo (SB 1 + Al^{3+}); V 1: Saturação por bases [(SB 1/CTC 1) x 100]; m 1: Saturação por alumínio [(Al^{3+}/CTCe 1) x 100]; SB 2: Soma das bases trocáveis (Ca^{2+} e Mg^{2+} e K^{+} extraídos por resina de troca iônica); CTC 2: Capacidade de troca de cátions a pH 7 [SB 2 + (H+Al)]; CTCe 2: Capacidade de troca de cátions efetiva do solo (SB 2 + Al^{3+}); V 2: Saturação por bases [(SB 2/CTC 2) x 100]; m 2: Saturação por alumínio [(Al^{3+}/CTCe 2) x 100]; COT: Carbono orgânico total.

2.2.4 Determinação dos atributos físicos

Utilizando métodos descritos em Donagema et al. (2011) foram determinados os seguintes atributos físicos do solo: granulometria pelo método do densímetro, porosidade total, macro e microporosidade, densidade do solo, umidades retidas nas tensões de 0,01 e 15 MPa e diâmetro médio ponderado dos agregados. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Análise granulométrica em quatro camadas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos

Área	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classe textural
	g kg^{-1}				
	----------Camada 1 (0-0,10 m)----------				
Vegetação nativa	345	398	39	218	Franco-argiloarenosa
5 anos	400	387	43	170	Franco-arenosa
8 anos	380	387	46	187	Franco-arenosa
12 anos	242	401	21	337	Franco-argiloarenosa
18 anos	378	384	23	215	Franco-argiloarenosa
	----------Camada 2 (0,10-0,20 m)----------				
Vegetação nativa	273	421	127	178	Franco-arenosa
5 anos	375	380	54	191	Franco-arenosa
8 anos	355	411	66	168	Franco-arenosa
12 anos	240	319	100	341	Franco-argiloarenosa
18 anos	321	372	76	231	Franco-argiloarenosa
	----------Camada 3 (0,20-0,30 m)----------				
Vegetação nativa	215	354	213	218	Franco-argiloarenosa
5 anos	424	359	39	178	Franco-arenosa
8 anos	363	422	23	192	Franco-arenosa
12 anos	231	325	41	402	Argilo-arenosa
18 anos	345	394	36	225	Franco-argiloarenosa
	----------Camada 4 (0,30-0,40 m)----------				
Vegetação nativa	260	416	79	245	Franco-argiloarenosa
5 anos	394	382	43	181	Franco-arenosa
8 anos	304	454	46	196	Franco-arenosa
12 anos	221	319	114	346	Franco-argiloarenosa
18 anos	283	417	66	235	Franco-argiloarenosa

Tabela 4 – Porosidade total, marco e microporosidade, densidade do solo, retenção de água e diâmetro médio ponderado de agregados secos em quatro camadas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos

Área	PT	MAP	MIP	DS	$Uv_{0,01MPa}$	$Uv_{1,5MPa}$	AD	DMP
	$m^3\ m^{-3}$			$kg\ dm^{-3}$	$m^3\ m^{-3}$			mm
	Camada 1 (0-0,10 m)							
Vegetação nativa	0,3698	0,1825	0,1873	1,31	0,2006	0,1090	0,0916	1,5
5 anos	0,4203	0,1497	0,2706	1,31	0,1845	0,0358	0,1487	1,2
8 anos	0,3882	0,1515	0,2367	1,50	0,1257	0,0569	0,0688	1,2
12 anos	0,4141	0,0951	0,3190	1,41	0,2856	0,1654	0,1202	2,1
18 anos	0,4125	0,1596	0,2529	1,33	0,3455	0,0927	0,2528	1,3
	Camada 2 (0,10-0,20 m)							
Vegetação nativa	0,3828	0,1505	0,2323	1,34	0,2178	0,1093	0,1085	1,6
5 anos	0,3554	0,1085	0,2469	1,31	0,1722	0,0585	0,1137	1,2
8 anos	0,3779	0,1620	0,2159	1,50	0,1704	0,0664	0,1040	0,8
12 anos	0,3806	0,1366	0,2440	1,29	0,2596	0,1817	0,0779	2,1
18 anos	0,3899	0,1325	0,2574	1,44	0,3507	0,1273	0,2234	1,3
	Camada 3 (0,20-0,30 m)							
Vegetação nativa	0,3993	0,1490	0,2503	1,28	0,1950	0,0515	0,1435	1,9
5 anos	0,3679	0,1918	0,1761	1,34	0,1551	0,0588	0,0963	1,7
8 anos	0,3949	0,2079	0,1870	1,31	0,1558	0,0851	0,0707	1,3
12 anos	0,4232	0,1466	0,2766	1,32	0,2505	0,1301	0,1204	2,6
18 anos	0,3915	0,1516	0,2399	1,40	0,3419	0,0784	0,2635	1,7
	Camada 4 (0,30-0,40 m)							
Vegetação nativa	0,3913	0,1877	0,2036	1,27	0,1979	0,0603	0,1376	2,0
5 anos	0,4175	0,1901	0,2274	1,31	0,1481	0,0855	0,0626	1,5
8 anos	0,3541	0,2060	0,1481	1,29	0,1601	0,0684	0,0917	1,1
12 anos	0,4195	0,1287	0,2908	1,34	0,2465	0,1685	0,0780	2,9
18 anos	0,3924	0,1637	0,2287	1,36	0,3468	0,1022	0,2446	1,5

PT = porosidade total; MAP = macroporosidade; MIP = microporosidade; Ds = densidade do solo; Uv0,01MPa = umidade volumétrica retida a 0,01 MPa (capacidade de campo); Uv1,5MPa = umidade volumétrica retida a 1,5 MPa (ponto de murchamento permanente); AD = água disponível; DMP = diâmetro médio ponderado de agregados secos.

2.2.5 Difratometria de Raios X no pó

Foi utilizada uma amostra de cada área estudada, na camada 0 - 0,10 m, para identificação de minerais por difratometria de raios X no pó (DRXP). Pesou-se 30 g da TFSA de cada amostra e em seguida realizou-se a separação das frações areia,

silte e argila (JACKSON, 1979). Lâminas foram montadas para a fração argila e submetidas ao difratômetro Rigaku Miniflex II, empregando-se emissão kα1 do cobre, com comprimento de onda de 0,15418 nm. O potencial da fonte foi de 40 kV e a corrente de 30 mA. Utilizou-se uma velocidade de varredura com um passo de 0,02º a cada segundo. A faixa de varredura (2θ) foi de 5 a 65º. Os resultados estão apresentados na Figura 6.

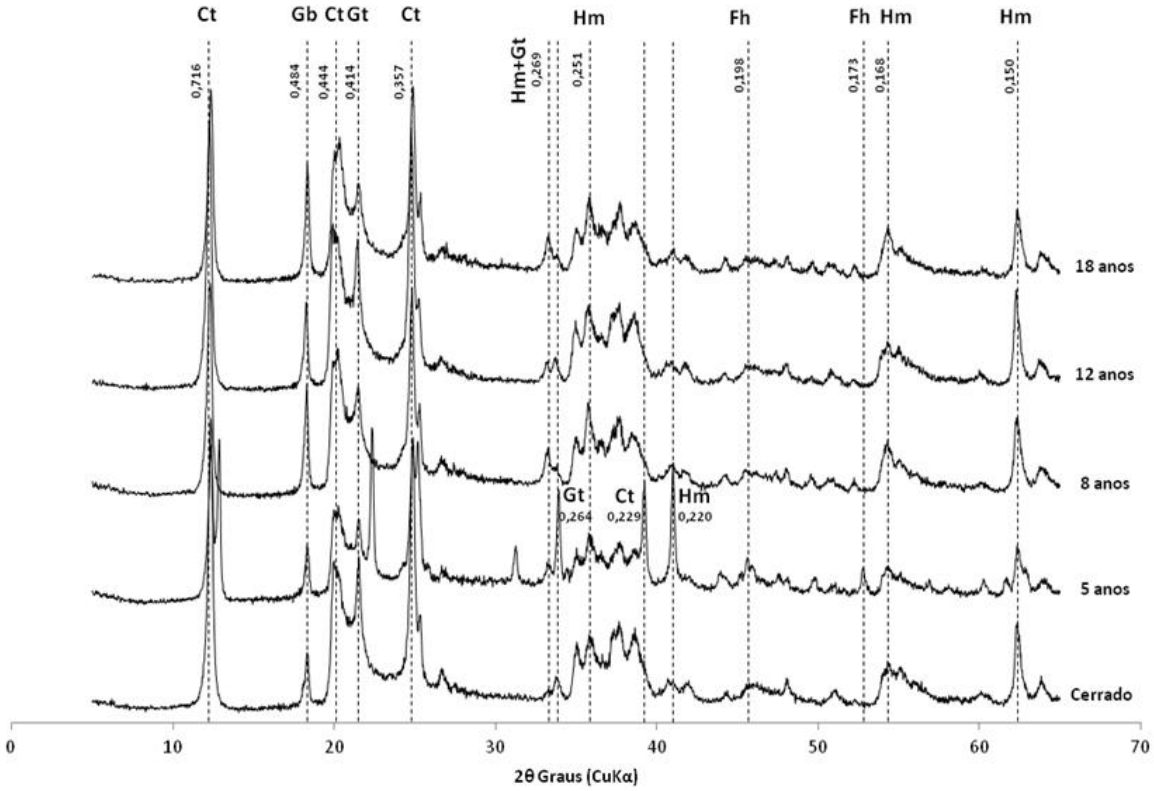

Figura 6 – Difratometria de Raios-X no pó (DRXP) da fração argila na camada de 0-0,10 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Ct: Caulinita; Gb: Gibsita; Gt: Goethita; Hm: Hematita e Fh: Ferrihidrita

2.2.6 Fracionamento químico de fósforo no solo

O procedimento adotado foi o proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), modificado por Condron e Goh (1989), apresentado por Gatiboni et al. (2013).

Amostras de 0,5 g de solo foram submetidas aos seguintes extratores na sequência apresentada:

1. Resina trocadora de íons em laminas AMI 7001S (Pi-RTA);
2. Bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) 0,5 mol L^{-1};
3. Hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L^{-1};

4. Ácido clorídrico (HCl) 1,0 mol L^{-1}; e
5. Hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 mol L^{-1}.

Imediatamente após a extração com os extratores 2, 3 e 5 foram tomadas alíquotas desses extratos e determinado o fósforo inorgânico (Pi). Após a determinação os extratos foram armazenados em geladeira. Posteriormente foi feita a digestão dos extratos de acordo com United States Environmental Protection Agency - USEPA (1971) e a determinação de fósforo total (Pt), calculando-se o fósforo orgânico (Po) por diferença.

Ao final das extrações as amostras foram digeridas em cadinhos de teflon sobre o banho de areia, utilizando 5 mL de HNO_3, 2 mL de $HClO_4$ e 5 mL de HF para determinação do fósforo residual (P-Residual).

Para determinação dos teores de fósforo nos extratos alcalinos foi utilizado o método proposto por Dick e Tabatabai (1977), e para os extratos ácidos o método proposto por Murphy e Riley (1962).

2.2.7 Espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure)

Todos os padrões e amostras foram analisados(as) na borda da camada K do P, por espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES), na linha de análise X-15B, no National Synchrotron Light Source (NSLS I), Brookhaven National Laboratory, situado em Upton, NY, Estados Unidos, e também na linha de análise oito (BL8), no Synchrotron Light Research Institute (SLRI) situado em Nakhon Ratchasima, Tailândia. Em função da melhor qualidade dos dados, apenas as medidas realizadas no SLRI foram aproveitadas neste trabalho.

Para tais análises, amostras de TFSA da camada de 0-0,10 m foram moídas em almofariz de ágata, dispostas homogeneamente sobre a fita Kapton® (Lanmar Inc., Northbrook, IL, USA) e cobertas com filme de polipropileno especifico para a análise.

O acelerador de partículas do SLRI é operado a 1,2 GeV com corrente entre 60-130 mA. Os dados foram coletados por florescência, com a coleta dos sinais mediante um detector Ge fase sólida de 13 canais, com câmara de coleta enriquecida com gás hélio durante as medidas. A linha de análise foi calibrada utilizando P elementar. Após a calibração, foram efetuadas as medidas nos padrões

e nas amostras. Para cada padrão foram coletados dois espectros e para cada amostra foram coletados cinco espectros.

Para todas as amostras a contribuição das diferentes espécies de P em relação ao P total foi calculada por meio do ajuste de combinação linear (LCF – Linear Combination Fitting), na faixa de energia de -7 a 35 eV utilizando o software Athena® (RAVEL; NEWVILLE, 2005). As análises foram realizadas nos espectros após a fusão dos cinco espectros coletados, correção da linha de base e normalização.

2.2.8 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o pacote estatístico SAS – "Statistical Analysis System" (SAS INSTITUTE, 2008). Primeiramente foi verificado se o conjunto de dados atendia aos pressupostos da análise de variância. Quando necessário, os dados foram transformados e posteriormente submetidos à análise de variância. As variáveis que foram significativas ($p<0,05$) foram submetidas ao teste de Tukey ($p<0,05$) para comparação das médias. Foi feita, também, análise de correlação de Pearson entre os teores de P disponível extraído por Mehlich-1 (P-M1), P disponível extraído por resina de troca iônica em esferas (P-resina) e P disponível extraído por resina de troca iônica em laminas (Pi-RTA).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Fósforo disponível (Mehlich-1 e resina de troca iônica)

Os resultados dessa avaliação estão apresentados na Tabela 5.

Os teores de P extraídos tanto por Mehlich-1 (P-M1) quanto por resina em esferas (P-resina) foram superiores nas áreas cultivadas (AC) em relação à vegetação nativa (VN), o que reflete o impacto das adubações fosfatadas em solos muito pobres em P, como os Latossolos sob Cerrado. Na camada 1 (0-0,10 m) não houve diferença entre os teores das AC pois as adubações fosfatadas, que são feitas em superfície e sem haver revolvimento do solo, exerceram alta influência sobre eles, elevando os teores à patamares altos.

Tabela 5 - Fósforo disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina, e fósforo remanescente em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos

Área	Fósforo (P)					
	Mehlich-1		Resina		Remanescente	
	mg kg^{-1}				mg L^{-1}	
	----------Camada 1 (0-0,10 m)----------					
Vegetação nativa	1,2	B	3,5	B	26,4	C
5 anos	49,2	A	48,1	A	45,2	A
8 anos	76,9	A	63,0	A	45,3	A
12 anos	60,8	A	63,4	A	37,5	B
18 anos	68,9	A	49,3	A	44,5	A
	----------Camada 2 (0,10-0,20 m)----------					
Vegetação nativa	0,9	C	2,7	C	26,7	C
5 anos	14,6	A	17,7	A	42,6	A
8 anos	10,5	A	11,8	AB	41,4	A
12 anos	5,6	B	7,8	B	32,0	B
18 anos	16,3	A	12,8	AB	40,1	A
	----------Camada 3 (0,20-0,30 m)----------					
Vegetação nativa	0,7	C	2,0	C	26,6	B
5 anos	3,0	B	4,9	B	39,2	A
8 anos	7,0	AB	7,2	AB	39,2	A
12 anos	4,1	AB	6,1	AB	26,3	B
18 anos	9,8	A	10,4	A	36,2	A
	----------Camada 4 (0,30-0,40 m)----------					
Vegetação nativa	0,6	C	1,7	C	24,8	C
5 anos	1,7	B	3,0	B	36,6	A
8 anos	3,9	AB	4,4	AB	35,3	AB
12 anos	2,3	AB	2,8	B	22,4	C
18 anos	5,8	A	6,3	A	34,0	B

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, para cada camada, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p<0,05$).

Diferentemente do que ocorreu na camada 1 em relação à camada 2 (0,10-0,20 m), a área 12 anos apresentou teor de P-M1 inferior às demais áreas. Quando o extrator foi a resina, o teor apresentado pela área 12 anos foi numericamente inferior as demais AC porém semelhante as áreas 8 e 18 anos e diferente da área 5 anos. Já para as camadas 3 (0,20-0,30 m) e 4 (0,30-0,40 m) verificou-se que na área de 18 anos os teores de P-resina e P-M1 alcançaram valores em torno de 2 a 3 vezes maiores em relação àqueles da área 5 anos, indicando aumento no teor de P em camada ao longo do tempo de cultivo da área.

Comportamento semelhante foi observado por Matias et al. (2009) em áreas cultivadas no Cerrado do Piauí. Esses autores relacionaram esse comportamento à aplicação de fertilizantes fosfatados nas AC; ao possível aumento no P orgânico (P

não reativo) em função da maior presença de resíduos; e à competição dos ácidos orgânicos com os íons fosfatos pelos sítios de adsorção, o que resultaria em maior teor de P na solução do solo.

Os teores de P-M1 na VN variaram de 0,6 mg kg^{-1} (camada 4) a 1,2 mg kg^{-1} (camada 1), e os teores de P-resina variaram de 1,7 mg kg^{-1} (camada 4) a 3,5 mg kg^{-1} (camada 1). Para ambos extratores, os teores decresceram com a profundidade do solo. Em um amplo levantamento realizado na região do Cerrado, Lopes e Cox (1977) observaram que o teor de P-M1 em solos sob VN variou de 0,1 a 16,5 mg dm^{-3}, sendo que, de um total de 518 amostras, 92 % apresentaram teor abaixo de 2 mg dm^{-3}.

Nas AC os teores de P-M1 variaram de 1,7 mg kg^{-1} (camada 4; 5 anos de cultivo) a 76,9 mg kg^{-1} (camada 1; 8 anos de cultivo), enquanto que os teores de P-resina variaram de 2,8 mg kg^{-1} (camada 4; 12 anos de cultivo) a 63,4 mg kg^{-1} (camada 1; 12 anos de cultivo).

Na camada 1, as AC apresentaram teores de P pelos dois extratores superiores a 48 mg kg^{-1}, alcançando 76,9 mg kg^{-1} (P-M1; 8 anos de cultivo). Conforme já mencionado, tais valores são considerados altos (SOUSA; LOBATO, 2004; RAIJ et al.,1997), indicando que as quantidades aplicadas de fertilizantes fosfatados estão acima das que são consideradas ideais para as culturas comumente utilizadas na Região do Cerrado. Nas camadas 2, 3 e 4 das AC, considerando ambos os extratores, os teores máximos de P situaram-se, respectivamente, abaixo de 18, 11 e 6 mg kg^{-1}, portanto muito aquém dos valores encontrados na camada 1. Mesmo não tendo sido realizada a comparação entre camadas dentro da mesma área, é perceptível a existência de um gradiente relacionado ao teor de P no perfil do solo (redução do teor com aumento da profundidade).

Segundo Schlindwein e Anghinoni (2000) e Rheinheimer e Anghinoni (2001), como no sistema plantio direto os fertilizantes são aplicados na superfície do solo e não existe revolvimento do solo para promover a incorporação dos fertilizantes e corretivos que foram aplicados, os teores de P da camada superficial sofrem grande aumento gerando a formação de gradientes a partir da superfície. Estes gradientes, que abrangem outros atributos químicos do solo, além do P, intensificam-se com o tempo de cultivo, diferentemente do que ocorre no plantio convencional.

Em concordância com a mencionada geração de gradientes, observou-se que na camada 2 a magnitude das diferenças entre os teores de P nas AC e na VN é bem menor do que na camada 1. Na camada 1, o P-M1 da VN (1,2 mg kg^{-1}) foi em torno de 64 vezes menor do que o maior teor de P nas AC (76,9 mg kg^{-1}), enquanto que na camada 2 essa diferença foi em torno de 18 vezes (VN = 0,9 mg kg^{-1}; AC = 16,3 mg kg^{-1}). Para o P-resina, na camada 1, a diferença foi em torno de 18 vezes (VN = 3,5 mg kg^{-1}; AC = 63,4 mg kg^{-1}), enquanto que na camada 2 foi em torno de 7 vezes (VN = 2,7 mg kg^{-1}; AC = 17,7 mg kg^{-1}). Portanto, embora tenha havido redução no teor de P na VN, quando se passou da camada 1 para a 2, tal redução foi muito maior nos teores de P nas AC.

Comportamento semelhante foi observado nas camadas 3 e 4, no que diz respeito à progressiva redução da magnitude da diferença entre os teores de P na VN e nas AC. Na camada 3 o P-M1 da VN (0,7 mg kg^{-1}) foi 14 vezes menor do que o maior teor de P nas AC (9,8 mg kg^{-1}), enquanto que na camada 4 essa diferença foi em torno de 10 vezes (VN = 0,6 mg kg^{-1}; AC = 5,8 mg kg^{-1}). Para o P-resina, na camada 3, a diferença foi em torno de 5 vezes (VN = 2,0 mg kg^{-1}; AC = 10,4 mg kg^{-1}), enquanto que na camada 4 foi em torno de 4 vezes (VN = 1,7 mg kg^{-1}; AC = 6,3 mg kg^{-1}).

Avaliando-se o P remanescente nas diferentes camadas (Tabela 5), observa-se que os seus valores permaneceram praticamente os mesmos na VN, enquanto nas áreas cultivadas há uma tendência de decréscimo nos valores, com o aprofundamento das camadas. É um indicativo de que, como seria de se esperar, nas camadas subseqüentes àquela onde se fez a aplicação do fertilizante fosfatado a mencionada saturação parcial dos sítios de absorção foi gradativamente menor.

Na camada 1 o P remanescente da VN (26,4 mg L^{-1}) correspondeu a 44 % do que foi aplicado em laboratório (60 mg L^{-1}) enquanto que na média das AC (43 mgL^{-1}) correspondeu a 72 % (diferença de 28 %) Na camada 4 houve uma redução nessa diferença para 12 %, visto que o P remanescente da VN correspondeu a 41 % do aplicado em laboratório (60 mg L^{-1}), enquanto na média das AC o P remanescente correspondeu a 53 % do aplicado. Estes números dão suporte à hipótese de maior saturação parcial dos sítios de adsorção, nas proximidades dos locais onde ocorreram aplicações continuadas de doses elevadas do nutriente (NOVAIS; SMITH, 1999), resultando em maior quantidade de P livre na solução do solo, inclusive para

se movimentar ao longo do perfil, ao tempo em que, nas camadas mais distantes, tal saturação não ocorreu com a mesma intensidade.

Buscando avaliar a mobilidade de formas inorgânicas e orgânicas de P em dois Latossolos Vemelho-Amarelos com textura argilosa e média, Gebrim et al. (2010) verificaram que houve movimentação tanto de formas reativas (P inorgânico) quanto de formas não reativas (P orgânico). A movimentação do P reativo foi inferior à do P não reativo no solo argiloso. Já para o solo de textura média, situação semelhante ao solo do presente estudo, as movimentações das duas formas foi semelhante. Os autores concluem que o movimento descendente de P-M1 aumentou com a aplicação de doses mais elevadas de P e também com a quantidade de cama de frango (resíduo orgânico). Ressaltam ainda que, em condições de solos intemperizados, o acúmulo de P ao longo dos cultivos pode favorecer perdas significativas do nutriente por lixiviação, pois os resíduos orgânicos diminuem a capacidade máxima de adsorção de P e/ou a energia de adsorção de P pelo solo.

Rheinheimer e Anghinoni (2001) relatam que maiores teores de matéria orgânica podem auxiliar na diminuição dos sítios de adsorção e da energia de ligação dos fosfatos, pela ação das substâncias húmicas e ácidos orgânicos de baixa massa molecular.

Como no presente estudo a matéria orgânica é menor em profundidade, não se pode atribuir às substâncias húmicas e aos ácidos orgânicos de baixa massa molecular influência relevante sobre os sítios de adsorção, de modo a reduzir o processo adsortivo. Somando-se a isso, a menor influência do P aplicado em superfície sobre a saturação dos sítios de adsorção nas camadas mais profundas, conclui-se que o processo de imobilização do P foi favorecido nas camadas mais profundas, o que pode ser comprovado pela gradativa redução no P remanescente.

Outro aspecto que pode ser levado em consideração e que possivelmente contribuiu para o aumento de P em profundidade nas AC, em relação à VN, é a ciclagem de P promovida pelas plantas ao longo do tempo. Por se tratar de um elemento móvel na planta (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), o P absorvido pelas raízes da camada com maior teor de P é redistribuído para as raízes mais profundas. Após a colheita, as raízes entram em processo de decomposição e mineralização, ocorrendo liberação de P em profundidade.

A progressiva redução observada na diferença entre os teores de P na VN e nas AC, a medida que se aprofundou as amostragens, provavelmente ocorreu

primariamente devido a menor influência da aplicação superficial de fertilizante ao longo do perfil e possivelmente à maior capacidade de fixação de P, tornando-o menos acessível a esses extratores.

Houve estreita correlação entre o P-M1 e P-resina (r=0,98; p<0,01), indicando que os dois extratores agiram de modo semelhante nesse solo.

Freitas et al. (2013), comparando Mehlich-1 e resina, encontraram alta correlação (r=0,94; p<0,01) entre os extratores quando a fonte de P foi o superfosfato triplo. Mesmo quando a fonte foram os fosfatos de Gafsa e Araxá, houve alta correlação entre os dois extratores (r=0,91; p<0,01 e r=0,93; p<0,01, respectivamente).

Rolim et al. (2008), avaliando o efeito da moagem do solo no teor de fósforo disponível por Mehlich-1 (P-M1), resina em esferas (P-resina) e resina em lâminas (Pi-RTA), observaram que, quando foram considerados todos os solos utilizados no experimento (P remanescente variando de 1,8 a 46,1 mg L^{-1}), a correlação entre P-M1 e P-resina foi 0,72 (p<0,01). Quando foram considerados somente os solos com P remanescente maior ou igual a 15 mg L^{-1}, caso das amostras utilizadas no presente trabalho, a correlação foi 0,91 (p<0,01).

Silva et al. (1999), avaliando dois Latossolos sob cerrado, encontraram correlações altas e significativas entre a resina e o Mehlich-3 para os dois solos estudados(r=0,97; p<0,01 e r=0,97; p<0,05). Diferentemente dos resultados obtidos no presente estudo, as correlações entre a resina e o Mehlich-1 foram menores (r=0,56; p<0,05 e r=0,57; p<0,05). Os autores atribuem a alta correlação entre a resina e o Mehlich-3 à extração de formas semelhantes e em quantidades proporcionais de P solúvel, e a menor correlação entre a resina e o Mehlich-1 às formas dominantes extraídas pelo Mehlich-1, visto que foram utilizados fosfatos de rocha como fonte de P, além do superfosfato triplo.

Vale ressaltar que, embora haja alta e significativa correlação entre os métodos, eles não se substituem, pois não são comparáveis em seus valores absolutos e por isso seus níveis críticos serão diferentes, resultando em tabelas de interpretação e recomendação diferenciadas (RAIJ, 1978).

2.3.1.1 Sumário interpretativo de P disponível (Mehlich-1 e resina)

Os resultados das análises de P-M1 e P-resina manifestam de forma clara que a aplicação superficial e sem revolvimento do fertilizante fosfatado, no Latossolo em estudo, proporcionou elevação dos teores do nutriente no solo das áreas cultivadas, até a profundidade de 0,40 m. Em todas as camadas, os teores de P detectados pelos dois extratores nas áreas cultivadas foram sempre superiores aos teores na área sob vegetação nativa. Contudo, em camadas além de 0,20 m, mesmo em áreas com 18 anos de uso agrícola, tais teores sofreram reduções drásticas e situaram-se em faixas de disponibilidade de P consideradas “muito baixas” ou “baixas”, à luz das tabelas de interpretação usadas para os mencionados extratores.

Ainda que com valores absolutos diferentes, verificou-se alta correlação entre o P-M1 e P-resina, numa clara indicação de que os extratores agiram de modo semelhante nesse solo, podendo ambos ser usados, com eficiência equivalente, para estimar a disponibilidade de P.

2.3.2 Fracionamento de fósforo no solo

2.3.2.1 Frações inorgânicas

2.3.2.1.1 Fósforo inorgânico extraído por resina de troca aniônica (Pi-RTA)

Os resultados relativos aos teores de Pi-RTA estão apresentados na Figura 7.

De maneira geral, o teor de P extraído por resina de troca aniônica (Pi-RTA) variou de 5,0 mg kg^{-1} (VN; camada 4) a 75,2 mg kg^{-1} (8 anos; camada 1). Levy e Schlesinger (1999) aplicaram o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) em diversas ordens de solo, incluindo Oxisol, e encontraram teores de Pi-RTA que variaram de 0 a 66 mg kg^{-1}. Negassa e Leinweber (2009), em ampla revisão sobre o fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), relataram teores de Pi-RTA variando de 3 a 229 mg kg^{-1}.

Por se tratar de uma fração disponível para as plantas, denominada de lábil (CROSS; SCHLESINGER, 1995; GATIBONI, 2003; NEGASSA; LEINWEBER, 2009), foi feita uma análise de correlação entre os teores obtidos por esse extrator e aqueles que são largamente utilizados no Brasil para estimar o P disponível às

plantas, com o intuito de verificar se esses extratores se comportam de maneira semelhante.

Os teores de Pi-RTA foram numericamente superiores aos teores obtidos quando a extração foi feita com a resina utilizada rotineiramente no Estado de São Paulo (P-resina), que, conforme consta da tabela 5, variaram de 1,7 mg kg^{-1} (VN; camada 4) a 63,4 mg kg^{-1} (12 anos; camada 1). Observou-se alta e significativa correlação entre teores de Pi-RTA e o P-resina ($r = 0,98$; $p<0,01$).

Os teores de Pi-RTA também foram numericamente superiores àqueles extraídos por Mehlich-1 (tabela 5), que variaram de 0,6 mg kg^{-1} (VN; camada 4) a 76,9 mg kg^{-1} (8 anos; camada 1). Da mesma forma que em relação ao P-resina, a correlação entre os teores de Pi-RTA e P-M1 foi alta ($r = 0,96$; $p<0,01$).

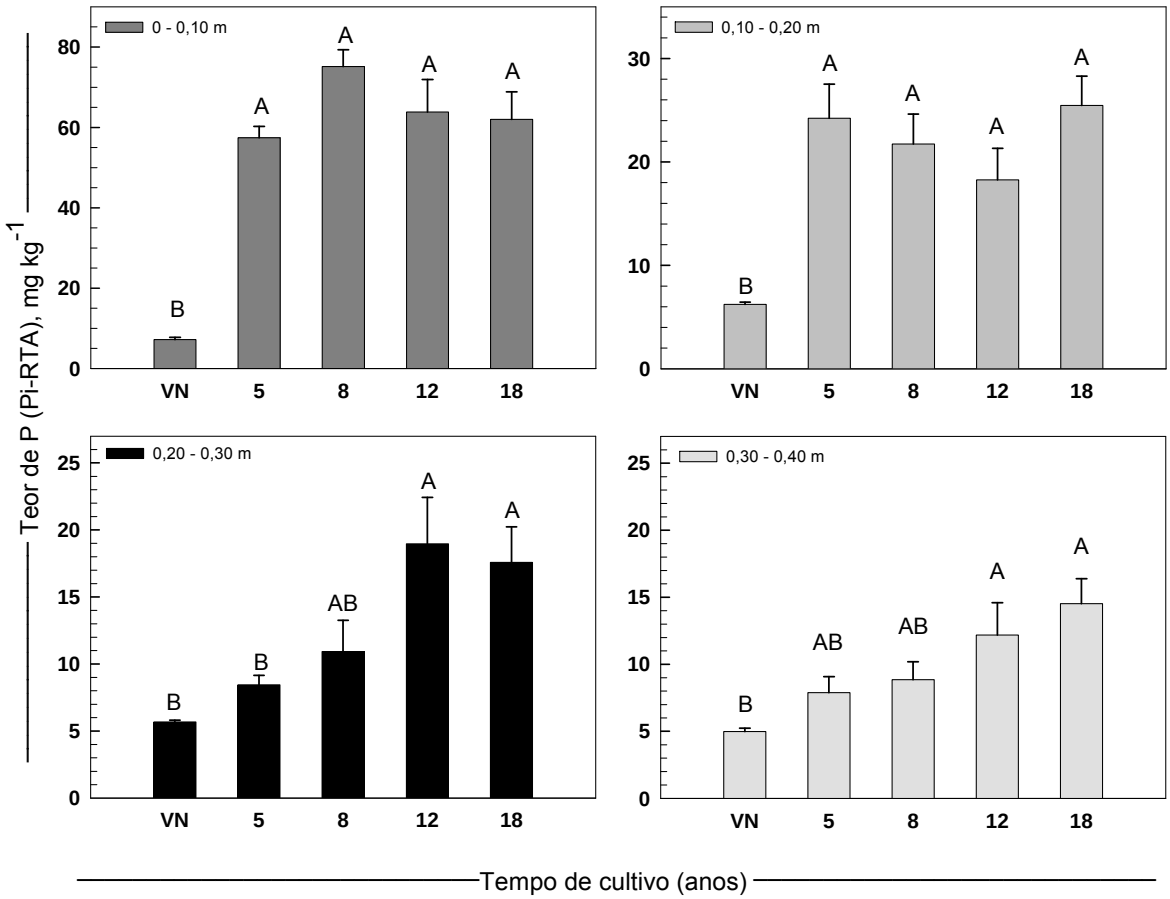

Figura 7 – Fósforo inorgânico extraído por resina de troca aniônica (Pi-RTA) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

Rolim et al. (2008), avaliando o efeito da moagem do solo no teor de fósforo disponível por Mehlich-1 (P-M1), resina em esferas (P-resina) e resina em lâmina (Pi-RTA) observaram que, quando foram considerados todos os solos utilizados no experimento (P remanescente variando de 1,8 a 46,1 mg L^{-1}), a correlação entre Pi-RTA e P-resina foi 0,84 ($p<0,001$). Quando foram considerados os solos com P remanescente maior ou igual a 15 mg L^{-1}, caso das amostras utilizadas no presente trabalho, a correlação foi 0,88 ($p<0,01$). A correlação entre Pi-RTA e P-M1, quando todos os solos foram utilizados, foi 0,76 ($p<0,001$), enquanto que para os solos com P remanescente maior ou igual a 15 mg L^{-1} foi de 0,96 ($p<0,001$).

Doberman, George e Thevs (2002), avaliando a influência da adubação fosfatada sobre as frações de P em Ultisols e Oxisols das Filipinas e Indonésia, encontraram alta correlação entre os teores de Pi-RTA e P-M1 ($r = 0,86$; $p<0,001$). Os autores concluíram que os métodos acessaram as mesmas frações de P do solo e afirmaram que a adição de P tem pouco impacto nas frações orgânicas, porém grande influência nas frações inorgânicas solúveis, o que resultou nessa boa correlação.

Diferentemente do trabalho anteriormente citado, o presente estudo permitiu observar alterações nos teores de P orgânico com o passar do tempo, em função da adição de P. Os resultados serão apresentados no item 2.3.2.2, que trata das frações orgânicas.

Ainda que as altas correlações obtidas indiquem a possibilidade de que os três métodos possam ser usados com igual eficiência para a avaliação do P disponível, cabe repetir a ressalva feita anteriormente de que, em função dos valores diferentes, eles não se substituem automaticamente para tal fim. Dependem do estabelecimento de níveis críticos e faixas de interpretação adequados a cada um deles.

Uma visualização inicial da Figura 7 evidencia que nas camadas 1 e 2 os teores de Pi-RTA nas áreas cultivadas foram todos superiores aos teores nas áreas de vegetação nativa. Nas camadas mais profundas (camadas 3 e 4) somente a partir de 12 anos de cultivo os teores de P-RTA em AC foram superiores àqueles medidos em VN.

Na camada 1, os teores de Pi-RTA variaram de 7,2 mg kg^{-1} (VN) a 75,2 mg kg^{-1} (8 anos), o que representou uma variação em torno de 10 vezes entre esses valores. Nas AC os teores variaram de 57,4 mg kg^{-1} (5 anos) a 75,2 mg kg^{-1} (8 anos), sem

diferir entre eles, evidenciando a forte influência da aplicação de fertilizante fosfatado sobre os teores de Pi-RTA nessa camada. Em termos de contribuição percentual da fração em relação ao P total obtido pela soma das frações do fracionamento (Figura 8), o teor de Pi-RTA correspondeu de 5 % (VN) a 20 % (5 anos). Nas AC a participação percentual da fração Pi-RTA decresceu com o tempo de cultivo (de 20 % em 5 anos a 13 % em 18 anos).

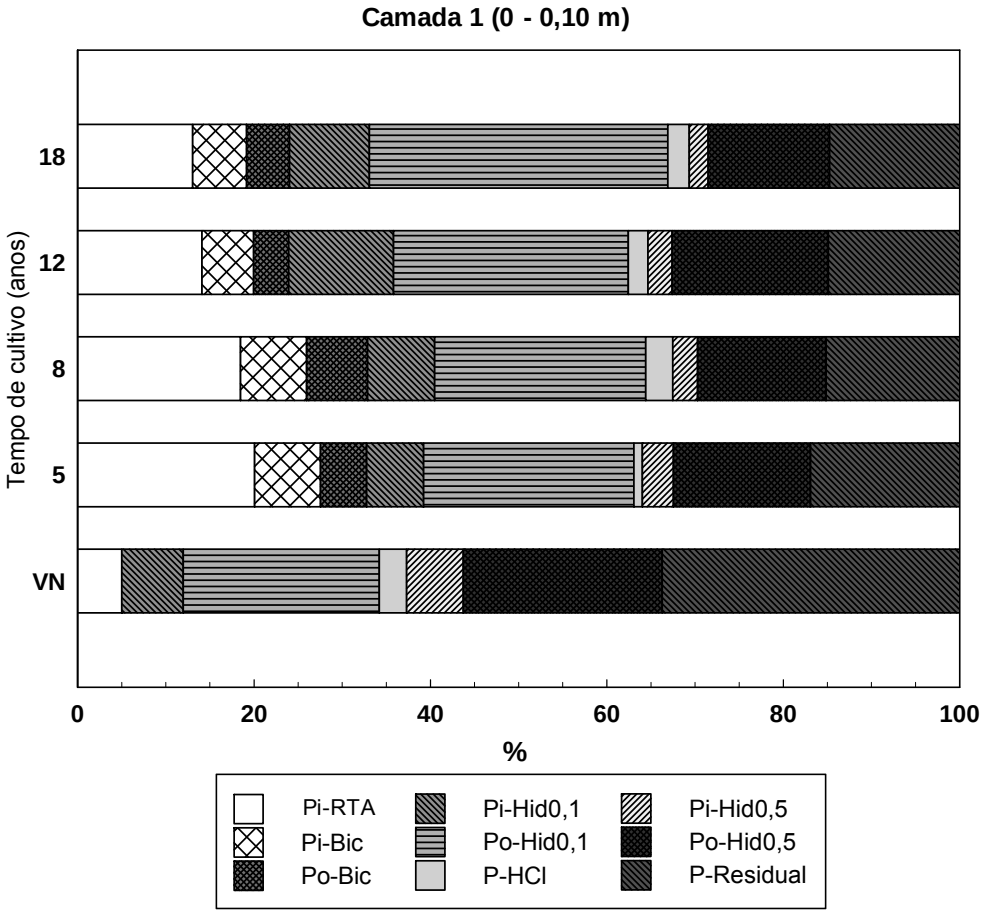

Figura 8 – Distribuição percentual das frações de fósforo obtidas por meio do fracionamento químico de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989), na camada 1 (0-0,10 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Frações inorgânicas extraídas por: resina de troca aniônica (Pi-RTA), bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1), ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5). Frações orgânicas extraídas por: bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1), e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5)

Na camada 2 (Figura 7), o teor mais alto do Pi-RTA (25,5 mg kg^{-1} em 18 anos) foi em torno de 4 vezes o menor teor (6,2 mg kg^{-1} na VN), evidenciando a menor influência do P liberado do fertilizante sobre os teores de Pi-RTA nesta camada, em comparação à camada 1. Assim como na camada 1, os teores nas AC (18,3 mg kg^{-1}

a 25,5 mg kg^{-1}) não foram diferentes. O teor de Pi-RTA da área 5 anos representou, entre todas as áreas, a maior participação percentual em relação ao P total obtido pela soma das frações, com os mesmos 20 % (Figura 9) alcançados na camada 1 (Figura 8). O teor de Pi-RTA correspondeu de 4 % (VN) a 20 % (5 anos) do P total obtido pela soma das frações, observando-se, nas AC, a mesma tendência de redução percentual da fração Pi-RTA no P total obtido pela soma das frações, com o aumento do tempo de cultivo (de 20 % em 5 anos para 9 % em 12 anos), como ocorreu na camada 1.

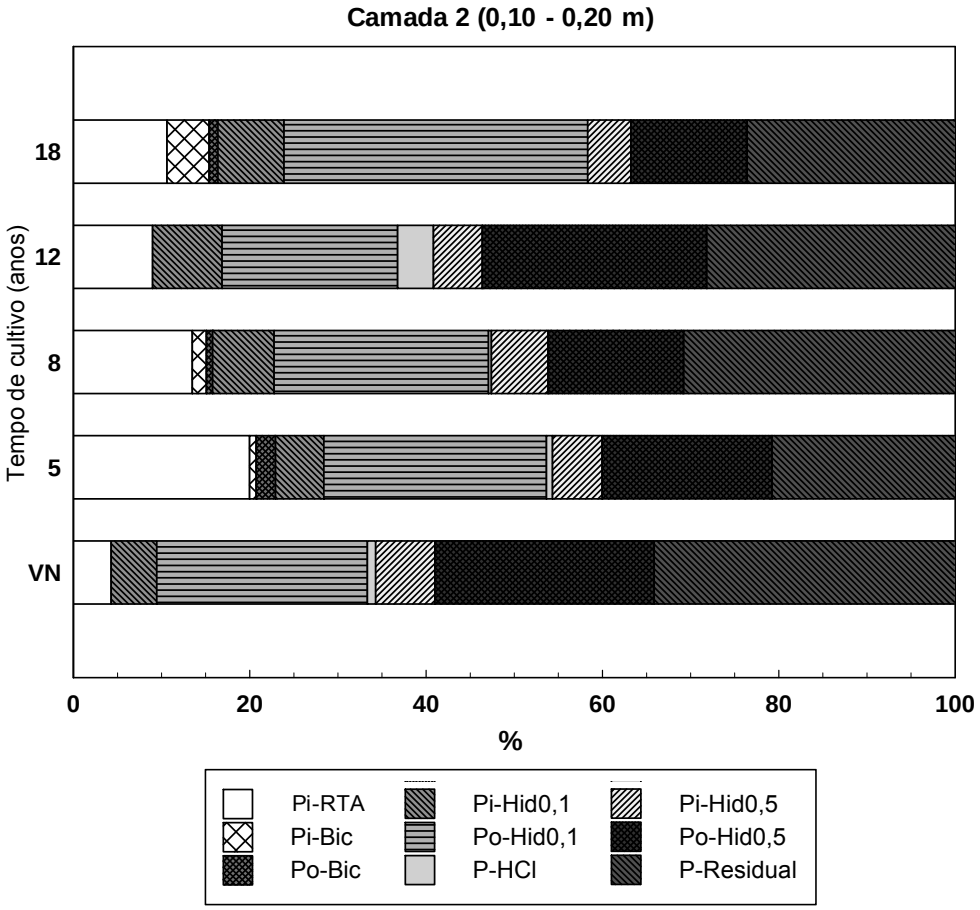

Figura 9 – Distribuição percentual das frações de fósforo obtidas por meio do fracionamento químico de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989), na camada 2 (0,10 - 0,20 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Frações inorgânicas extraídas por: resina de troca aniônica (Pi-RTA), bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1), ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5). Frações orgânicas extraídas por: bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1), e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5)

Na camada 3 (Figura 7), o maior valor do Pi-RTA (19,0 mg kg^{-1} em 12 anos) representou pouco mais de 3 vezes do menor valor (5,7 mg kg^{-1} em VN), indicando a menor influência do P aplicado na superfície, sobre os teores de Pi-RTA nesta

camada, em comparação às camadas 1 e 2. Nas AC os teores variaram de 8,4 mg kg^{-1} (5 anos) a 19,0 mg kg^{-1} (12 anos). Nesta camada, diferentemente das anteriores, nas áreas com 12 e 18 anos de cultivo os teores foram superiores ao da área com 5 anos, que não se distinguiu da área com vegetação nativa. Estes números indicam que, em profundidades além de 0,20 m, uma influência maior do P aplicado na superfície, sobre o P-RTA, foi dependente de maior tempo de cultivo, inclusive porque maior tempo de cultivo pressupõe, em princípio, aporte de maior quantidade de P ao longo do tempo.

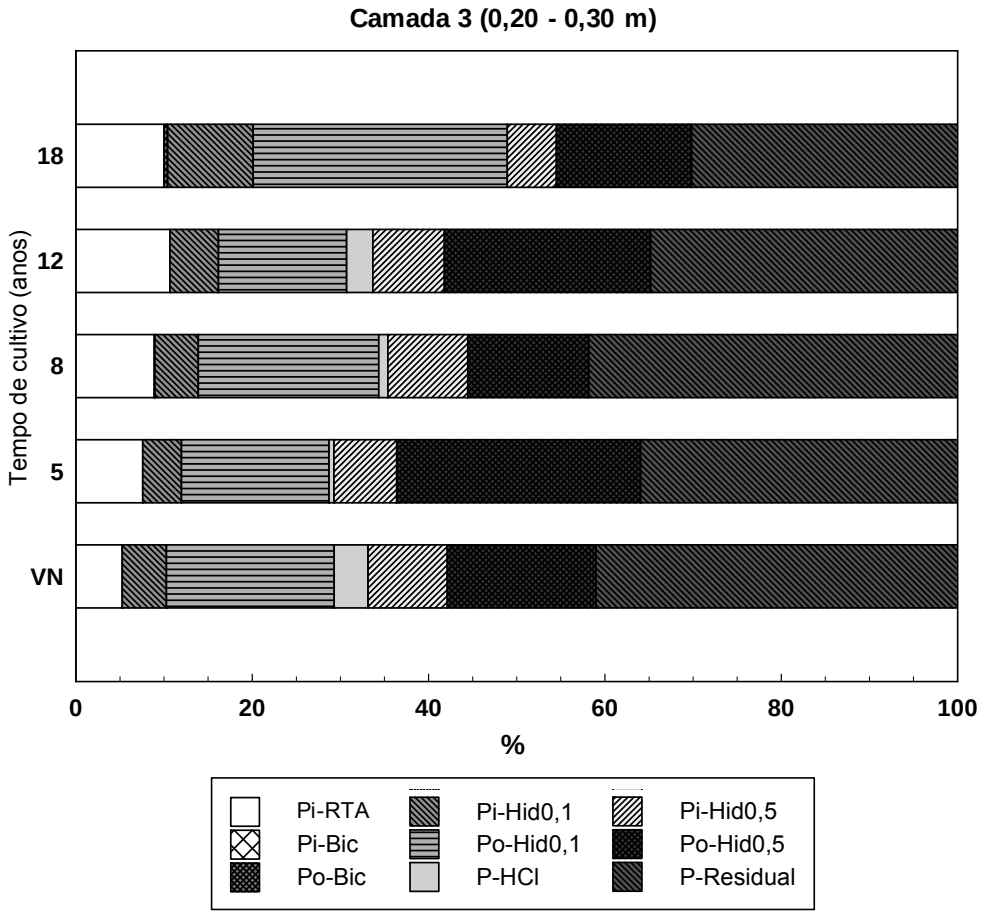

Figura 10 – Distribuição percentual das frações de fósforo obtidas por meio do fracionamento químico de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989), na camada 3 (0,20 - 0,30 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Frações inorgânicas extraídas por: resina de troca aniônica (Pi-RTA), bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1), ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5). Frações orgânicas extraídas por: bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1), e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5)

A participação do Pi-RTA em relação ao P total do fracionamento na camada 3 (Figura 10) variou de 5 % (VN) a 11 % (12 anos).Também diferentemente das

camadas 1 e 2, nas quais o Pi-RTA da área 5 anos representou, entre todas as áreas estudadas, a maior participação percentual no P total (Figuras 8 e 9), na camada de 0,20 – 0,30 m o maior percentual (11 %) foi observado na área 12 anos (Figura 10). Ressalte-se ainda que nas AC a participação percentual da fração Pi-RTA cresceu com o tempo de cultivo (Figura 10), comportamento inverso ao observado nas camadas 1 e 2 (Figuras 8 e 9).

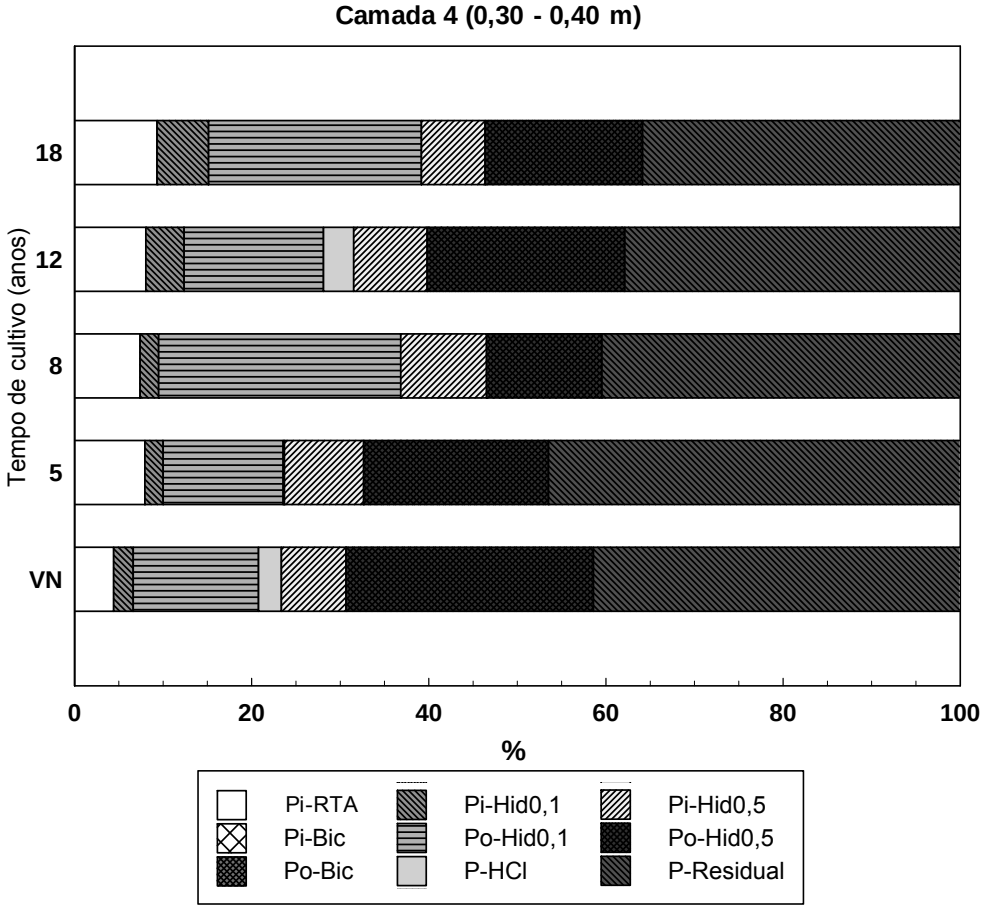

Figura 11 – Distribuição percentual das frações de fósforo obtidas por meio do fracionamento químico de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989), na camada 4 (0,30 - 0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Frações inorgânicas extraídas por: resina de troca aniônica (Pi-RTA), bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1), ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5). Frações orgânicas extraídas por: bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic), hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1), e hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5)

Na camada 4 (Figura 7), os teores de Pi-RTA variaram de 5,0 mg kg^{-1} (VN) a 14,5 mg kg^{-1} (18 anos), proporcionando a menor amplitude entre as 4 camadas. Nas AC os teores variaram de 7,9 mg kg^{-1} (5 anos) a 14,5 mg kg^{-1} (18 anos). Assim como na camada 1 e 2, não houve diferença entre os teores das AC. Apesar de não haver

diferença entre os teores, foi possível observar a tendência de crescimento nos teores desde a área 5 anos até a área 18 anos. Em termos de distribuição percentual da fração em relação ao P total obtido pela soma das frações do fracionamento (Figura 11), o teor de Pi-RTA correspondeu de 4 % (VN) a 9 % (18 anos), sendo que nas AC a participação percentual da fração Pi-RTA variou de 7 % (5 e 8 anos) a 9 % (18 anos).

Os dados também mostraram que, em nenhuma das camadas, a contribuição percentual da fração Pi-RTA para o P total obtido pela soma das frações do fracionamento ultrapassou 20 % (Figuras 8, 9, 10 e 11) e que nas camadas 1 e 2, a diferença entre o menor e o maior valor percentual, foi mais alta do que o observado para as camadas 3 e 4.

São frequentes na literatura trabalhos que ressaltam a significativa influência das adubações fosfatadas sobre os teores de Pi-RTA das AC e a tendência de formação de um gradiente de disponibilidade de P da superfície do solo para camadas mais profundas, em função da ausência de revolvimento.

Buscando avaliar o efeito das fertilizações fosfatadas anuais sobre o conteúdo e formas de P em um Argissolo comercialmente cultivado com cana-de-açúcar durante 5, 15 e 25 anos, Araújo, Salcedo e Sampaio (1993) observaram que o teor de Pi-RTA foi maior com o tempo de cultivo e, assim como no presente estudo, as maiores variações entre a VN e as AC ocorreram nas áreas com maior tempo de cultivo (15 e 25 anos), principalmente nas duas camadas superficiais (0 – 0,05 e 0,05 – 0,10 m).

Beck e Sanches (1994; 1996), avaliando as frações de P em um Ultisol na Amazônia peruana, encontraram aumentos nos teores de Pi-RTA na camada superficial das AC, atribuindo tal aumento à aplicação de fertilizantes fosfatados. Já para a camada sub-superficial, não ocorreu aumento nos teores de Pi-RTA.

Resultados semelhantes aos observados no presente estudo e nos anteriormente citados, foram relatados por Doberman, George e Thevs (2002). Esses autores, avaliando a influência da adubação fosfatada sobre as frações de P em Ultisols e Oxisols das Filipinas e Indonésia, em um experimento com quatro anos de duração, observaram que as aplicações anuais de P resultaram em teores de Pi-RTA maiores do que os teores encontrados na VN, independentemente da dose de P aplicada. Quando a aplicação foi feita apenas no início do experimento apenas a área que recebeu a maior dose apresentou teor de Pi-RTA superior ao da VN.

Aumentos nessa fração foram observados por Motta et al. (2002) e Tokura et al. (2002) e, assim como os autores já citados, eles atribuíram esse comportamento à aplicação de fertilizante fosfatado.

Até mesmo quando a fonte de P aplicada não contemplou fertilizantes convencionalmente utilizados na agricultura, esse comportamento foi observado. Guardini et al. (2012), avaliando a influência da aplicação de dejetos e cama de suínos por longo período de tempo sobre o acúmulo de fósforo e suas frações, observaram que houve aumento nos teores de Pi-RTA na camada superficial das áreas que receberam o dejeto e a cama de suínos em relação à área controle, enquanto que na camada mais profunda apenas a maior dose de cama de suíno apresentou teor de Pi-RTA mais alto do que nas demais áreas.

Tiecher et al. (2012), avaliando a influência de diferentes preparos de solo sobre as formas de P inorgânico, observaram que após 23 anos de cultivo o sistema plantio direto proporcionou acúmulo de Pi-RTA muito superior na camada superficial.

Schimitt et al. (2013a), avaliando o acúmulo de P em vinhedos com diferentes tempos desde a implantação (14 e 30 anos), observaram que na camada superficial os teores de Pi-RTA foram maiores do que os teores encontrados na área de referência. Na camada mais profunda, os teores de Pi-RTA também foram maiores do que o teor da área de referência, porém, entre os dois vinhedos, aquele cultivado por mais tempo foi o que apresentou Pi-RTA mais alto.

Rodrigues (2013), avaliando a influência de sistemas de manejo sobre a dinâmica das formas de P, observou que, quando as áreas foram cultivadas em plantio direto, houve a tendência de formação de uma zona de maior disponibilidade de P na camada superficial, tanto nos solos manejados por mais tempo (20 anos) quanto nas áreas submetidas a menor tempo de manejo (12 anos).

2.3.2.1.2 Fósforo inorgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic)

Os resultados relativos aos teores de Pi-Bic estão apresentados na Figura 12.

Assim como a fração Pi-RTA, a fração de P extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic) é também considerada disponível às plantas, correspondendo ao P lábil que não foi extraído pela resina (CROSS; SCHLESINGER,1995; GATIBONI, 2003; NEGASSA; LEINWEBER, 2009).

Como não foi detectado Pi-Bic a partir de 0,20 m de profundidade, a avaliação abordou as camadas 1 e 2 (figura 12).

O teor de Pi-Bic variou de 0 mg kg^{-1} (diversas áreas) a 30,7 mg kg^{-1} (8 anos; camada 1). Levy e Schlesinger (1999) aplicaram o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) em diversas ordens de solo, incluindo Oxisol, e encontraram teores de Pi-Bic que variaram de 0 a 93,1 mg kg^{-1}. Negassa e Leinweber (2009) em ampla revisão a respeito do fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), relataram teores de Pi-Bic variando de 1 a 697 mg kg^{-1}. Considerando apenas os valores relatados para os ambientes tropicais e subtropicais, os teores de Pi-Bic variaram de 1 a 697 mg kg^{-1}.

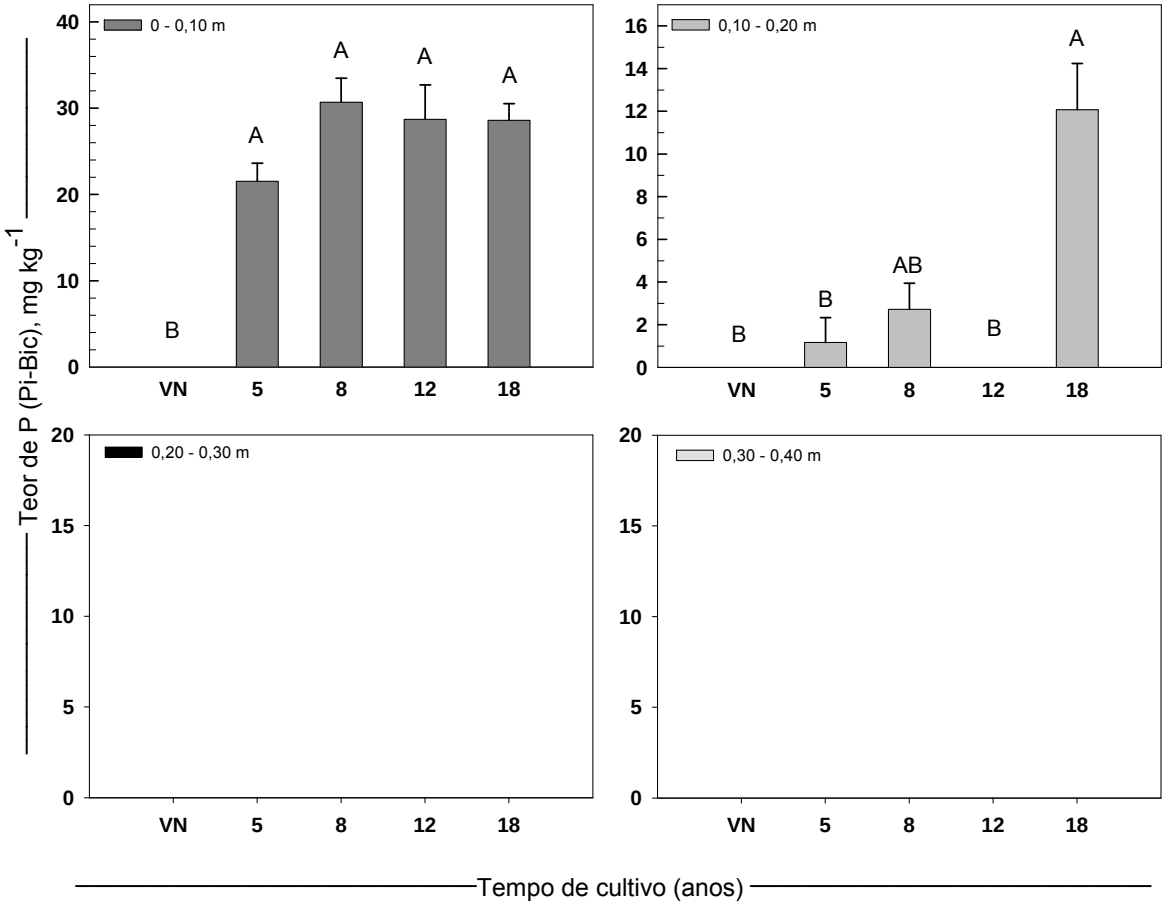

Figura 12 – Fósforo inorgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Bic) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivados por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas da mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

Na camada 1 (Figura 12), o teor de Pi-Bic variou de 0 mg kg^{-1} (VN) a 30,7 mg kg^{-1} (8 anos), sendo que o teor da VN foi inferior aos teores das AC. Já nas

AC o teor variou de 21,5 mg kg^{-1} (5 anos) a 30,7 mg kg^{-1} (8 anos), sem diferir entre eles, assim como ocorreu para os teores de Pi-RTA. Da mesma forma ao ocorrido em relação aos teores de Pi-RTA, a aplicação do fertilizante fosfatado na superfície do solo e sem incorporação concorreu para o aumento dos teores de Pi-Bic. Em termos de distribuição percentual da fração em relação ao P total obtido pela soma das frações do fracionamento (Figura 8), o teor de Pi-Bic correspondeu de 0 % (VN) a 7 % (5 e 8 anos). Entre as AC observou-se pequena variação na participação percentual da fração Pi-Bic sobre o P total obtido pela soma das frações do fracionamento. A participação das áreas 5 e 8 anos foi de 7 % enquanto que das áreas 12 e 18 anos foi de 6 %.

Na camada 2 (Figura 12) o teor de Pi-Bic variou de 0 mg kg^{-1} (VN e 12 anos) a 12,1 mg kg^{-1} (18 anos). Ainda que tenham sido detectadas diferenças entre os teores nas AC, sobressaindo-se a área 18 anos (12,1 mg kg^{-1}), única a alcançar diferença em relação à VN, os dados obtidos não possibilitam maiores inferências quanto à influência das adubações fosfatadas nos teores do Pi-Bic nessa camada. Este comportamento difere do observado na camada 1, onde foi nítida tal influência. Difere igualmente do que foi constatado quanto à clara influência positiva do adubo fosfatado nos teores do Pi-RTA na camada 2, em todos os tempos de cultivo (Figura 7). Em termos de participação percentual da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 9), o teor de Pi-Bic alcançou alguma relevância apenas na área 18 anos, cujo percentual (5 %) aproximou-se dos 6 % obtidos para aquela área na camada 1.

Menores teores do Pi-Bic nas AC, quando se passou da camada 1 para a camada 2 (Figura 12), indica que a influência positiva da adubação fosfatada superficial nos teores dessa fração limitou-se, de fato, aos primeiros 0,10 m de profundidade, o que é corroborado pela não detecção do Pi-Bic nas camadas 3 e 4.

Conforme já discutido, o P aplicado continuamente na superfície do solo, por meio de fertilizantes fosfatados, pode promover a saturação parcial dos sítios de adsorção e, consequentemente, concorrer para que mais fósforo permaneça disponível. Além disso, na superfície do solo em sistemas de cultivo em que não há revolvimento, os teores de carbono orgânico total são maiores, o que também pode contribuir para a redução na adsorção de P pelo solo, em razão da competição entre o P e os ácidos orgânicos de baixa massa molecular pelos sítios de adsorção

(TIECHER et al., 2012). A ação simultânea ou isolada destes fatores contribui para reduzir o potencial de fixação de P na superfície do solo.

Assim, de forma semelhante à abordagem do P disponível extraído por Mehlich-1 e Resina e do Pi-RTA, a redução no potencial de fixação de P na superfície do solo pode contribuir positivamente para os teores de Pi-Bic na camada 1. Como a ação dos fatores acima torna-se gradativamente menor nas camadas mais profundas, dando lugar ao crescimento do potencial de fixação de P, ocorreu como conseqüência menores teores do Pi-Bic na camada 2 e até a não detecção nas camadas subsequentes.

Somando as contribuições das frações Pi-RTA e Pi-Bic, observou-se que a fração lábil inorgânica variou de 4 a 27 %, considerando-se VN e AC, e de 7 a 27 % quando se considerou somente as áreas cultivadas (Figuras 8, 9, 10 e 11). Coerentemente com o que foi apresentado sobre cada uma das duas frações, os valores para a soma delas foram maiores na camada 1 em relação às camadas subseqüentes.

Assim como em relação ao Pi-RTA, trabalhos ressaltam a significativa influência das adubações fosfatadas sobre os teores de Pi-Bic do solo, abrangendo inclusive ambientes distintos do Cerrado.

Araújo, Salcedo e Sampaio (1993), em trabalho com o objetivo de avaliar o efeito das fertilizações fosfatadas anuais sobre o conteúdo e formas de P em um Argissolo comercialmente cultivado com cana-de-açúcar durante 5, 15 e 25 anos, observaram que os teores de Pi-Bic da camada superficial cresceram com o tempo de cultivo. As áreas com 15 e 25 anos apresentaram teores superiores à VN. À semelhança do presente estudo, na camada subsequente o aumento dos teores Pi-Bic foram menos pronunciados, em comparação com a camada superficial. Apenas o teor da área com 25 anos de cultivo foi superior ao teor da VN. Para a camada mais profunda os autores não observaram diferença entre os teores das áreas estudadas.

Beck e Sanches (1994, 1996), avaliando as frações de P em um Ultisol na Amazônia peruana encontraram aumentos significativos nos teores de Pi-Bic na camada superficial das AC. Os autores, em consonância com o observado no presente estudo, também atribuíram tal comportamento à aplicação de fertilizantes fosfatados.

Mesmo quando não usou fertilizantes altamente solúveis como fonte de P, Guardini et al. (2012), obtiveram resultados semelhantes. Os autores avaliaram a influência da aplicação de dejetos e cama de suínos por longo período de tempo, sobre o acumulo de fósforo e suas frações. Observaram que houve aumento nos teores de Pi-Bic na camada superficial das áreas que receberam os mencionados materiais, em relação à área controle, enquanto que na camada mais profunda apenas a maior dose da cama e do dejeto de suíno apresentou teor de Pi-Bic mais alto do que as demais áreas.

Assim como para o Pi-RTA, Tiecher et al. (2012), avaliando a influência de diferentes preparos de solo sobre as formas de P inorgânico, observaram que após 23 anos de cultivo o sistema plantio direto proporcionou acúmulo de Pi-Bic muito superior na camada superficial em relação a áreas cultivadas em sistema convencional.

Schimitt et al. (2013a), avaliando o acúmulo de P em vinhedos com diferentes tempos desde a implantação (14 e 30 anos), observaram que na camada superficial os teores de Pi-Bic foram maiores do que os teores encontrados na área de referência. Entre os dois vinhedos, aquele cultivado por mais tempo foi o que apresentou o maior teor de Pi-Bic. Na camada mais profunda, os teores de Pi-Bic também foram maiores do que o teor da área de referência e, à semelhança da camada superficial, cresceram com o tempo de cultivo.

Rodrigues (2013), avaliando a influência de sistemas de manejo sobre a dinâmica das formas de P, observou que quando as áreas foram cultivadas em plantio direto, houve a tendência de formação de uma zona de maior disponibilidade de P na camada superficial tanto nos solos manejados por mais tempo (20 anos) quanto nas áreas submetidas a menor tempo de manejo (12 anos) resultando em maiores teores de Pi-Bic.

2.3.2.1.3 Fósforo inorgânico extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1)

Os resultados relativos aos teores de Pi-Hid0,1 estão apresentados na Figura 13.

De acordo com Cross e Schlesinger (1995), Gatiboni (2003) e Negassa e Leinweber, (2009), a fração de P extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1) é de moderada disponibilidade às plantas.

Uma primeira visualização da Figura 13 indica, de maneira geral, um crescimento nos teores de Pi-Hid0,1 com o tempo de cultivo. Mostra ainda que os teores desta fração variaram de 1,9 mg kg^{-1} (5 anos; camada 4) a 57,4 mg kg^{-1} (12 anos; camada 1). Levy e Schlesinger (1999) utilizaram o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) em diversas ordens de solo, incluindo Oxisol, e encontraram teores de Pi-Hid0,1 que variaram de 0 a 89,3 mg kg^{-1}. Negassa e Leinweber (2009), numa ampla revisão a respeito do fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), relataram teores de Pi-Hid0,1 variando de 10 a 1.354 mg kg^{-1}. Considerando apenas os valores relatados para os ambientes tropicais e subtropicais, os teores de Pi-Hid0,1 variaram de 10 a 793 mg kg^{-1}.

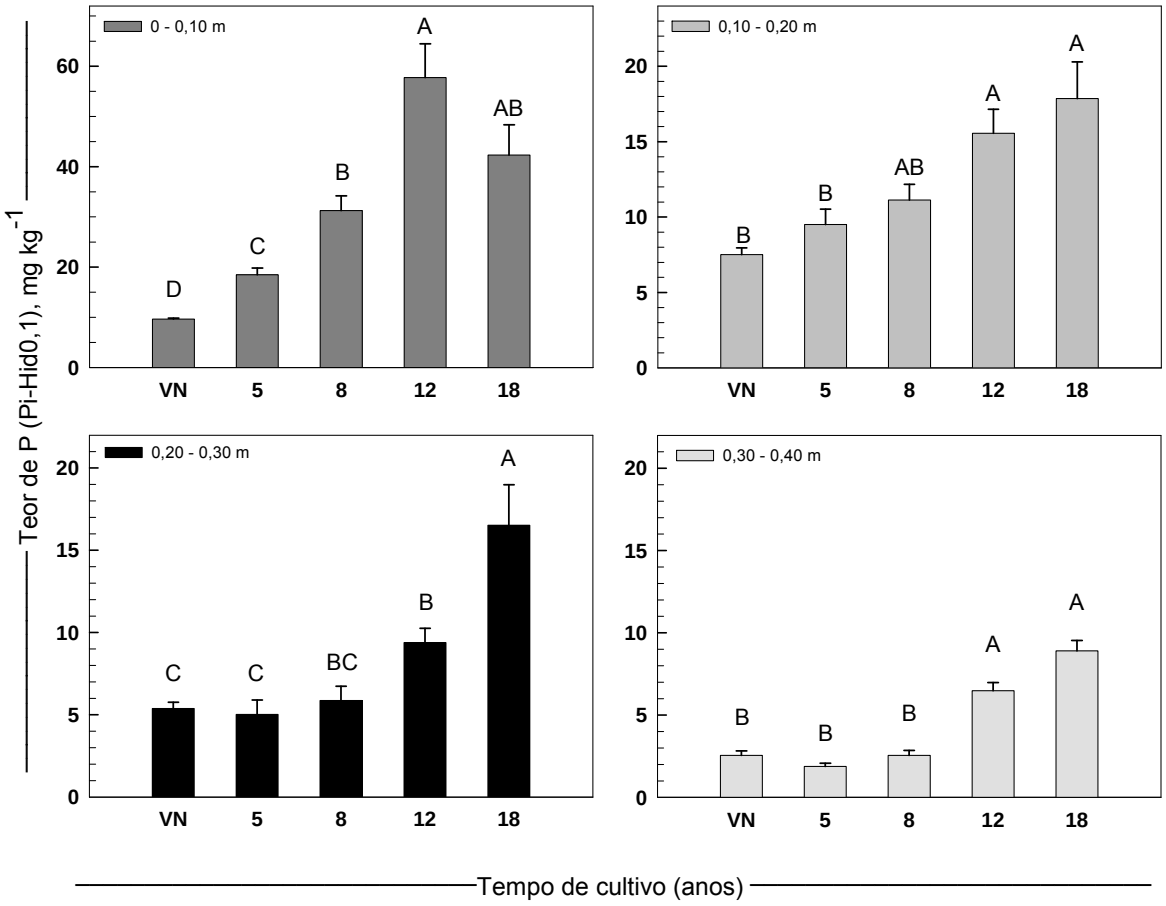

Figura 13 – Fósforo inorgânico extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-Hid0,1) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

Na camada 1, os teores de Pi-Hid0,1 variaram de 9,6 mg kg^{-1} (VN) a 57,4 mg kg^{-1} (12 anos), sendo o teor na VN inferior aos teores nas AC. A amplitude de variação nas áreas cultivadas foi de 18,5 mg kg^{-1} (5 anos) a 57,4 mg kg^{-1} (12 anos). Conforme ressaltado inicialmente, nas áreas com maior tempo de cultivo (8, 12 e 18 anos), os teores da fração (respectivamente 31,2, 57,4 e 42,3 mg kg^{-1}) foram superiores aos da área com 5 anos (18,5 mg kg^{-1}), que por sua vez foi superior à área VN (9,6 mg kg^{-1}). Nas AC a participação percentual da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 8) foi também crescente com o tempo de cultivo (variou de 6 % na área 5 anos a 12 % na área 12 anos).

De modo semelhante ao ocorrido em relação aos teores de Pi-RTA e Pi-Bic, a aplicação do fertilizante fosfatado feita na superfície e sem incorporação, concorreu de forma significativa para o aumento dos teores de Pi-Hid0,1 nessa camada. Porém, nessa fração, houve diferença entre algumas das AC, onde as áreas cultivadas por mais tempo (12 e 18 anos) apresentaram os maiores teores de Pi-Hid0,1, o que não ocorreu com as frações Pi-RTA e Pi-Bic que foram iguais.

As reações de transformação de P lábil em formas moderadamente e não lábil, ocorrem em duas fases distintas, sendo a primeira fase de rápida adsorção, caracterizada por uma atração eletrostática, seguida de uma fase mais lenta que se processa por longos períodos de tempo, onde há troca de ligantes e difusão do P para o interior dos óxidos (NOVAIS; SMITH, 1999; ARAI; SPARKS, 2007).

Na camada 2 os teores de Pi-Hid0,1 foram bem mais baixos (variaram de 7,5 mg kg^{-1} na VN a 17,9 mg kg^{-1} em 18 anos) do que na camada 1. Mais baixa também foi a amplitude de variação. Enquanto na camada 1 a variação entre o maior e menor teor de Pi-Hid0,1 foi em torno de 6 vezes, na camada 2 tal variação situou-se em torno de 2 vezes. Estes números refletem a menor influência da adubação fosfatada sobre os teores da fração nessa camada. Entre as AC os teores variaram de 9,5 mg kg^{-1} (5 anos) a 17,9 mg kg^{-1} (18 anos), permanecendo o comportamento do crescimento dos valores com o tempo de cultivo. Os teores de Pi-Hid0,1 nas áreas 12 e 18 anos (respectivamente 15,6 e 17,9 mg kg^{-1}) foram superiores aos teores da área com 5 anos (9,5 mg kg^{-1}) que não se distinguiu da VN (7,5 mg kg^{-1}). Coerentemente, e de modo semelhante à camada 1, observou-se em relação à participação percentual da fração no P total do fracionamento (Figura 9), que os números cresceram com o tempo de cultivo (de 5 % em VN e 5 anos para 8 % em 12 e 18 anos).

O comportamento do Pi-Hid0,1 na camada 2 foi semelhante ao que ocorreu para o P-RTA na camada 3. Foi possível notar que em função do maior tempo de cultivo e consequentemente da maior quantidade de P recebida ao longo do tempo, associado ao tempo necessário para que as reações de transformação de P lábil para formas menos lábeis se processassem, as áreas com 12 e 18 anos foram as únicas que apresentaram teor de Pi-Hid0,1 superior a VN. Em função da menor quantidade de P recebida ao longo do tempo e do menor tempo para transformação de P lábil em formas menos lábeis, a área 5 anos não apresentou teor de Pi-Hid0,1 superior ao da VN, indicando que a quantidade de P aplicada e o tempo decorrido não foram suficientes para transformação de P lábil em formas menos lábeis.

Na camada 3, os teores de Pi-Hid0,1 variaram de 5,0 mg kg^{-1} (5 anos) a 16,5 mg kg^{-1} (18 anos). Mais uma vez observou-se o aumento dos teores do Pi-Hid0,1 com o maior tempo de cultivo, tendo a área 18 anos se distinguido de todas as outras (16,5 mg kg^{-1} de Pi-Hid0,1). A área 12 anos veio em seguida com 9,4 mg kg^{-1} de Pi-Hid0,1, que foi igual ao apresentado pela área 8 anos (5,9 mg kg^{-1}) e superior aos teores das áreas 5 anos (5,0 mg kg^{-1}) e VN (5,4 mg kg^{-1}), que foram iguais. No que diz respeito à contribuição percentual da fração para o P total do fracionamento (Figura 10), verifica-se também uma maior participação percentual com o aumento do tempo de cultivo (de 4 % em 5 anos para 9 % em18 anos).

Na camada 4, os teores de Pi-Hid0,1 variaram de 1,9 mg kg^{-1} (5 anos) a 8,9 mg kg^{-1} (18 anos). As áreas 12 e 18 anos apresentaram os maiores teores (respectivamente 6,5 e 8,9 mg kg^{-1}) e foram superiores às áreas VN, 5 e 8 anos, que não diferiram entre si. Em termos de distribuição percentual da fração em relação ao P total obtido pela soma das frações do fracionamento (Figura 11), o teor de Pi-Hid0,1 correspondeu de 2 % (VN, 5 e 8 anos) a 6 % (18 anos), com a área com 12 anos apresentando uma contribuição de 4 %.

Assim como nas frações anteriores (Pi-RTA e Pi-Bic), foi evidente a influência da adubação fosfatada nos teores de Pi-Hid0,1. Foi igualmente evidente, assim como para as duas outras frações mencionadas, a diminuição da influência direta ou indireta da adubação fosfatada sobre os teores de Pi-Hid0,1, em função do aumento da profundidade.

Segundo Gatiboni et al. (2013), caso o balanço entre as entradas e saídas de P do sistema seja negativo, as formas lábeis tamponam o P absorvido pelas plantas e posteriormente as formas de menor labilidade,o que não ocorreu nas áreas em

estudo. Quando o balanço entre a adição e saídas é positivo, o P é acumulado no solo, principalmente nas formas inorgânicas lábeis e moderadamente lábeis, situação constatada no presente estudo e que se tornou manifesta mediante o acúmulo de P nas frações lábeis (Pi-RTA e Pi-Bic) e também na fração de moderada disponibilidade (Pi-Hid0,1).

A contribuição percentual da fração Pi-Hid0,1 para o P total obtido pela soma das frações do fracionamento não ultrapassou 12 % (Figuras 8, 9, 10 e 11). De maneira geral, tal participação percentual sofreu redução com o aumento da profundidade, assim como ocorreu para as frações Pi-RTA e Pi-Bic.

Em estudo buscando avaliar o efeito das fertilizações fosfatadas anuais sobre o conteúdo e formas de P em um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar durante 5, 15 e 25 anos, Araújo, Salcedo e Sampaio (1993) observaram incremento nos teores de Pi-Hid0,1 da camada superficial com o aumento no tempo de cultivo, constatando que as áreas com 15 e 25 anos apresentaram teores superiores a VN. De modo semelhante aos dados obtidos no presente estudo, os autores verificaram que, na camada subsequente, o aumento dos teores Pi-Hid0,1 foram menos pronunciados do que os da camada superficial. Mais uma vez, apenas os teores das áreas com 15 e 25 anos de cultivo foram superiores ao teor da VN. Para a camada mais profunda avaliada, os autores não observaram diferença entre os teores de Pi-Hid0,1 das áreas estudadas. Neste aspecto os resultados divergem do que foi obtido no presente estudo, no qual foram observadas diferenças significativas entre os teores de Pi-Hid0,1 na VN e em áreas cultivadas, em todas as camadas, notadamente naquelas com maior tempo de cultivo (Figura 13).

Também em concordância com o presente estudo, Beck e Sanches (1994; 1996), em trabalho que avaliou as frações de P em um Ultisol na Amazônia peruana, encontraram aumentos nos teores de Pi-Hid0,1 na camada superficial das AC, da mesma forma que foi observado para as frações Pi-RTA e Pi-Bic. Os autores atribuíram tal comportamento à aplicação de fertilizantes fosfatados.

Resultados também semelhantes aos observados no presente estudo e nos anteriormente citados foram relatados por Doberman, George e Thevs (2002). Esses autores, avaliando a influência da adubação fosfatada sobre as frações de P em Ultisols e Oxisols das Filipinas e Indonésia, em um experimento com quatro anos de duração, observaram que as aplicações anuais de P resultaram em teores de Pi-

Hid0,1 maiores do que os teores encontrados na VN, independentemente da dose aplicada de P.

Guardini et al. (2012), avaliando a influência da aplicação de dejetos e cama de suínos, por longo período de tempo, sobre o acumulo de fósforo e suas frações, observaram que houve aumento nos teores de Pi-Hid0,1 na camada superficial das áreas que receberam a cama de suínos, em relação à área controle, enquanto na camada mais profunda não houve diferença.

Tiecher et al. (2012), avaliando a influência de diferentes preparos de solo sobre as formas de P inorgânico, observaram que após 23 anos de cultivo o sistema plantio direto proporcionou acúmulo de Pi-Hid0,1 na camada superficial muito superior ao observado no sistema de plantio convencional.

Schimitt et al. (2013), avaliando o acumulo de P em vinhedos com diferentes tempos de exploração (14 e 30 anos), observaram que na camada superficial os teores de Pi-Hid0,1 foram maiores do que os teores encontrados na área de referência, sem diferir entre eles. Na camada mais profunda, os teores de Pi-Hid0,1 também foram maiores do que o teor da área de referência, com o mesmo comportamento da camada superficial. Conforme apresentado pelos autores, os diferentes tempos de exploração não determinaram diferenças nos teores de Pi-Hid0,1 no solo. Situação diferente do que foi obtido na presente pesquisa, quando o fator tempo de cultivo foi decisivo para imprimir diferenças nos teores da fração, em todas as camadas estudadas.

2.3.2.1.4 Fósforo inorgânico extraído por ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl)

Os resultados relativos aos teores de Pi-HCl estão apresentados na Figura 14.

De acordo com Cross e Schlesinger (1995) e Negassa e Leinweber, (2009), a fração de P extraído por ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) é classificada como de moderadamente lábil para as plantas e corresponde ao P associado ao cálcio e adsorvido ao solo.

De antemão, a Figura 14 permite visualizar que a influência do fator tempo de cultivo, sobre os teores da fração no solo, não se manifestou de forma muito clara, contrastando com o que foi visto em relação às outras frações até então discutidas. De maneira geral, o teor de Pi-HCl variou de 0 mg kg^{-1} a 13,1 mg kg^{-1} (8 anos; camada 1). Levy e Schlesinger (1999) usando o método proposto por Hedley,

Stewart e Chauhan (1982), em diversas ordens de solo, incluindo Oxisol, encontraram teores de Pi-HCl que variaram de 0 a 306,6 mg kg^{-1}. Negassa e Leinweber (2009), numa ampla revisão a respeito do fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), relataram teores de Pi-HCl variando de 0 a 1.560 mg kg^{-1}. Considerando os valores relatados para os ambientes tropicais e subtropicais, os teores de Pi-HCl variaram de 0 a 1.560 mg kg^{-1}.

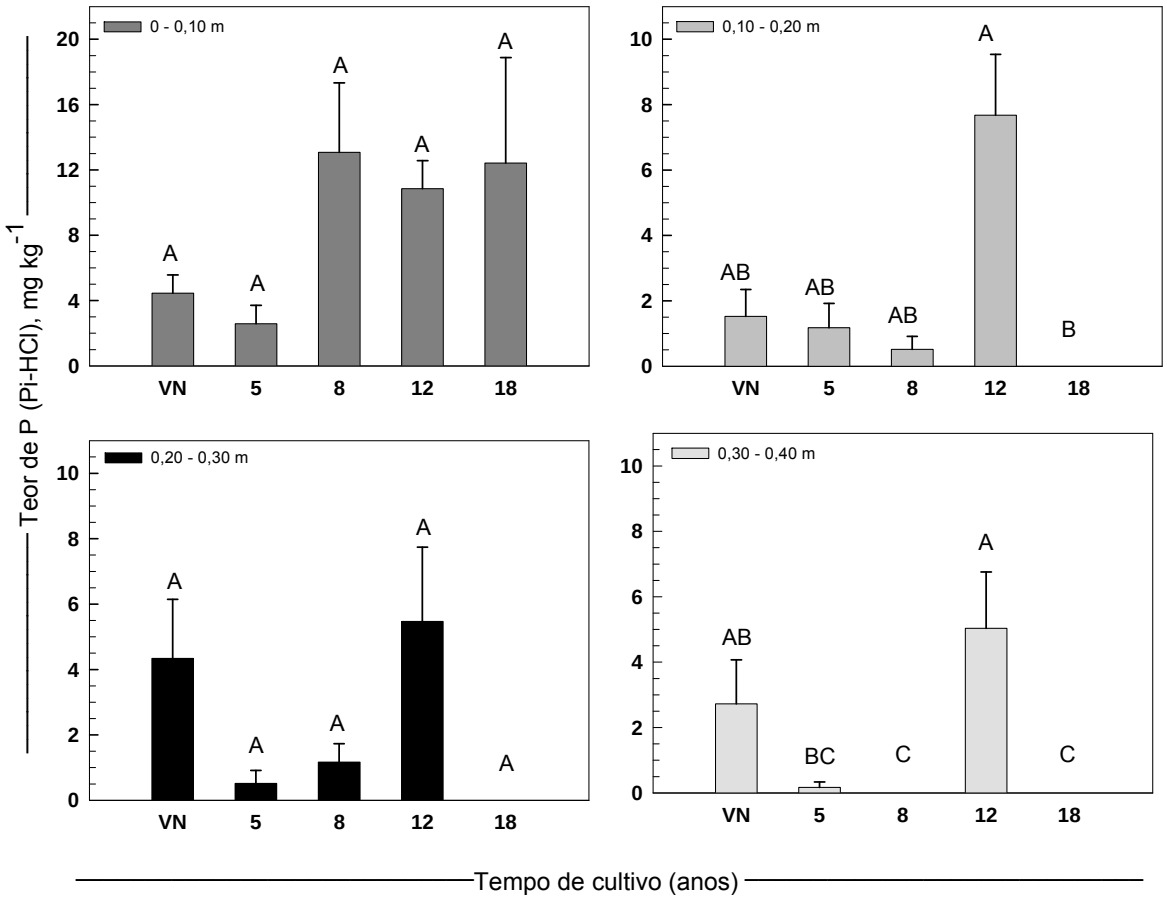

Figura 14 – Fósforo inorgânico extraído por ácido clorídrico 1 mol L^{-1} (Pi-HCl) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas da mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

Na camada 1, os teores de Pi-HCl variaram de 2,6 mg kg^{-1} (5 anos) a 13,1 mg kg^{-1} (8 anos). Como pode ser observado na Figura 14, não há diferença estatística entre eles nas diversas situações (VN e diferentes tempos de cultivo). Há, quando muito, indicação de uma tendência de crescimento dos valores nos maiores tempos de cultivo (áreas 8, 12 e 18 anos). Esses teores mais elevados podem estar associados a formação de precipitados de P e cálcio, visto que durante a abertura das áreas, as mesmas receberam grande quantidade de calcário e fertilizantes

fosfatados, além de aplicações anuais em doses menores. Em termos de contribuição percentual da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 8), os números variaram de 1 % (5 anos) a 3 % (VN e 8 anos), revelando uma baixa participação do Pi-HCl, em comparação às frações discutidas anteriormente.

Na camada 2, os teores de Pi-HCl variaram de 0 mg kg^{-1} (18 anos) a 7,7 mg kg^{-1} (12 anos). Ainda que o teor na área 12 anos tenha se destacado, observa-se que, à semelhança da camada 1, não houve diferença estatística entre os valores nas diversas situações (exceção para a área 18 anos, cujo valor foi próximo a 0 mg kg^{-1}. Em termos de participação percentual da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 9), os valores de Pi-HCl situaram-se de 0 % (18 anos) a 4 % (12 anos), que, como na camada 1, também revela uma baixa participação percentual.

Na camada 3, os teores de Pi-HCl variaram de 0 mg kg^{-1} (18 anos) a 5,5 mg kg^{-1} (12 anos) sem diferir entre eles. Em termos de participação percentual da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 10), o teor de Pi-HCl correspondeu de 0 % (18 anos) a 4 % (VN), igualmente reveladora da baixa participação percentual.

Na camada 4, o maior teor de Pi-HCl foi observado na área 12 anos (5,0 mg kg^{-1}). Os demais valores variaram de 0 mg kg^{-1} (8 e 18 anos) a 2,72 mg kg^{-1} (VN). Conforme pode ser visto na Figura 14, os teores medidos e os resultados da análise estatística não permitem maiores inferências sobre os teores do Pi-HCl nessa camada. No que se refere à contribuição percentual da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 11), o teor de Pi-HCl correspondeu de 0 % (8 e 18 anos) a 3 % (VN e 12 anos), percentuais mais uma vez indicativos da baixa participação da fração na composição do P total.

Considerando-se todas as camadas, verifica-se que a contribuição da fração Pi-HCl em relação ao P total obtido pela soma das frações do fracionamento não ultrapassou 4 % (Figuras 8, 9, 10 e 11), o que confirma a baixa participação percentual desta fração na composição do P total do fracionamento, já comentada.

Beck e Sanches (1994, 1996), avaliando as frações de P em um Ultisol na Amazônia peruana, encontraram aumentos significativos nos teores de Pi-HCl na camada superficial das AC. Os autores atribuíram tal comportamento a aplicação de fertilizantes fosfatados associado à aplicação de calcário.

Guardini et al. (2012), avaliando a influência da aplicação de dejetos e cama de suínos por longo período de tempo, sobre o acúmulo de fósforo e suas frações,

observaram que houve aumento nos teores de Pi-HCl apenas na camada superficial da área que recebeu a cama de suínos na maior dose, enquanto que na camada mais profunda não houve diferença. A tendência de maiores teores na camada superficial foi também detectada na presente pesquisa.

Schimitt et al. (2013a), avaliando o acúmulo de P em vinhedos com diferentes tempos desde a implantação (14 e 30 anos), observaram que tanto na camada superficial quanto na camada mais profunda, os teores de Pi-HCl foram maiores do que os teores encontrados na área de referência sendo que o teor apresentado pelo vinhedo com 30 anos foi superior ao do vinhedo com 14 anos.

Rodrigues (2013), avaliando a influência de sistemas de manejo sobre a dinâmica das formas de P, observou, para todos os solos avaliados, a contribuição dessa fração para o P total foi de menos de 2 %. Este percentual, que se aproxima dos valores obtidos no presente estudo, também reflete a baixa contribuição da fração Pi-HCl para o P total, já ressaltado anteriormente.

2.3.2.1.5 Fósforo inorgânico extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5)

Os resultados relativos aos teores de Pi-Hid0,5 estão apresentados na Figura 15.

Originalmente, o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), não contempla essa etapa. Segundo Gatiboni et al. (2013), esse passo foi incluído no método proposto por Condron e Goh (1989) buscando substituir a extração com NaOH 0,1 mol L^{-1} + ultrasonificação. O P extraído nessa fração é considerado não-lábil.

Uma visualização geral da Figura 15 evidencia não haver diferença para as médias obtidas para cada situação (VN e áreas cultivadas), em cada uma das quatro camadas. Evidencia também que não foram tão perceptíveis variações na ordem de grandeza dos teores, em função da profundidade, como verificado em outras frações analisadas, algumas delas com reduções drásticas dos valores quando se passou da camada superficial para as subseqüentes.

Os valores constantes da Figura 15 indicam que na camada 1 os teores de Pi-Hid0,5) variaram de 8,5 mg kg^{-1} (VN) a 13,1 mg kg^{-1} (12 anos). Na camada 2, os teores variaram de 9,4 mg kg^{-1} (5 anos) a 11,5 mg kg^{-1} (18 anos). Na camada 3, a

variação dos teores foi de 9,1 mg kg^{-1} (5 anos) a 13,2 mg kg^{-1} (12 anos). E, finalmente, na camada 4 os teores de Pi-Hid0,5 variaram de 8,3 mg kg^{-1} (VN) a 12,5 mg kg^{-1} (12 anos).

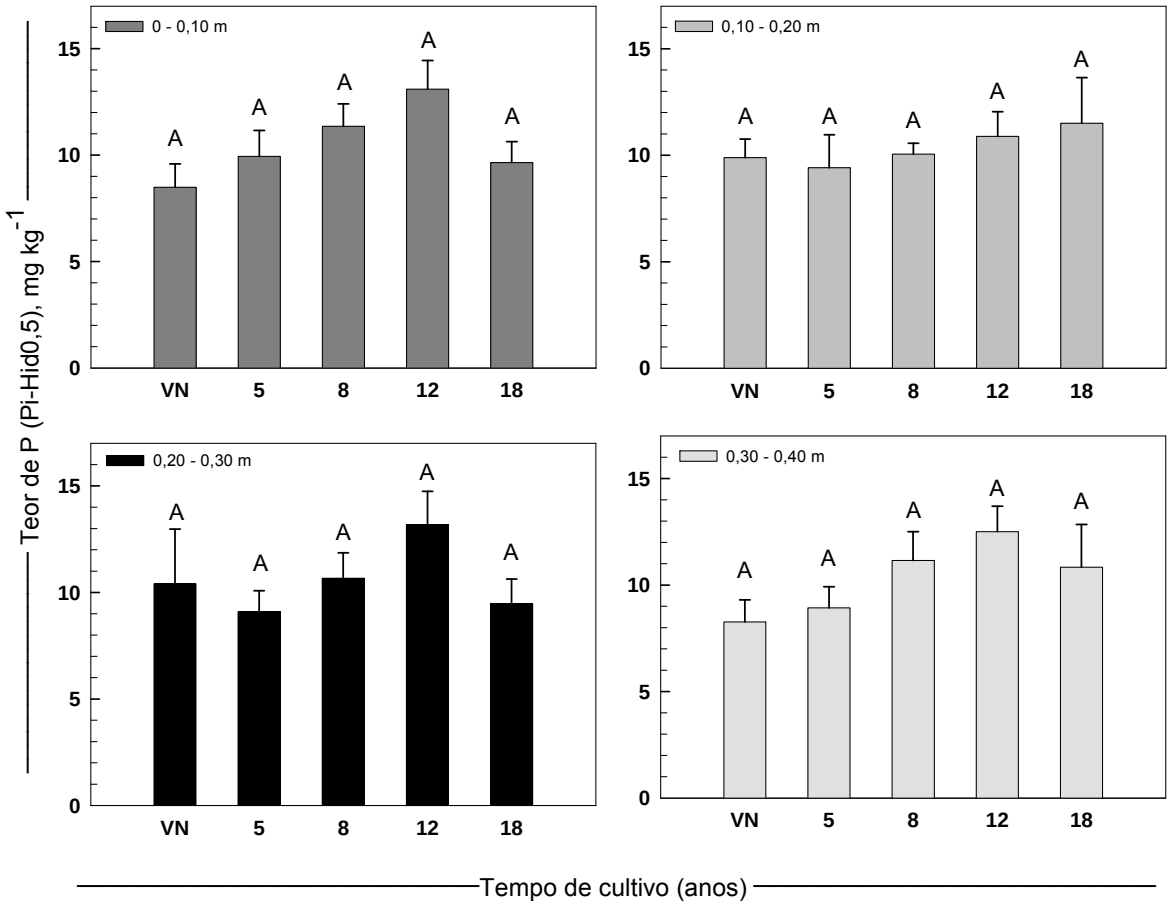

Figura 15 – Fósforo inorgânico extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-Hid0,5) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas da mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

Estes números revelam uma discreta tendência de aumento dos teores da fração, com o tempo cultivo. Contudo, ausência de significação estatística para estes discretos aumentos, já ressaltada, é uma clara evidência de que a aplicação de fertilizante fosfatado não influenciou de modo expressivo os teores de Pi-Hid0,5 no solo, considerando-se até 18 anos de cultivo continuado.

A contribuição percentual Pi-Hid0,5 para o P total obtido pela soma das frações do fracionamento não ultrapassou 10 %. Na camada 1 a participação foi de 6 % na VN e regrediu para 2 % na área 18 anos a (Figura 8). Na camada 2 a variação foi de 7 % na VN para 5 % na área 18 anos (Figura 9). Na camada 3 os percentuais

regrediram de 9 % na VN e área 8 anos para 5 % na área 18 anos (Figura 10). E, finalmente, na camada 4 a variação foi de 10 % na área 8 anos para 7 % na VN e área18 anos (Figura 11).

Como pode ser visto, nas três primeiras camadas (até 0,30 m) os percentuais mais altos de Pi-Hid0,5 foram observados na VN, com tendência de redução em função do tempo de cultivo nas AC. Ainda que discretas, tais reduções nos percentuais dessa fração não lábil nas AC, onde o P foi aplicado, podem estar associadas ao simultâneo incremento dos percentuais de formas lábeis (Pi-RTA e Pi-Bic) ou moderadamente lábeis (Pi-Hid0,1) naquelas áreas (Figuras 8, 9 e 10), ocorridos em decorrência das adubações fosfatadas. Tal comportamento não foi observado na camada 4, onde as influências das adubações fosfatadas se fizeram sentir com intensidade bem menor.

Guardini et al. (2012), avaliando a influência da aplicação de dejetos e cama de suínos por longo período de tempo sobre o acúmulo de fósforo e suas frações, observaram que não houve aumento nos teores de Pi-Hid0,5 nas camadas avaliadas, independentemente da fonte aplicada, situação que se assemelha ao observado no presente estudo.

Diferentemente dos resultados encontrados no presente trabalho, Schimitt et al. (2013), avaliando o acúmulo de P em vinhedos com diferentes tempos de exploração (14 e 30 anos), observaram que tanto na camada superficial quanto na camada mais profunda, os teores de Pi-Hid0,5 foram maiores do que os teores encontrados na área de referência.

2.3.2.1.6 Sumário interpretativo de frações inorgânicas

Neste tópico, foram contempladas frações lábeis (Pi-RTA e Pi-Bic), moderadamente lábil (Pi-Hid0,1 e Pi-HCl) e não lábil (Pi-Hid0,5). Nas camadas mais superficiais, principalmente na camada 1, foram nítidas as grandes influências das aplicações superficiais de P nas frações lábeis e moderadamente lábeis, exceto a fração Pi-HCl, refletidas nas diferenças entre os teores nas AC e na área com vegetação nativa. Nas camadas mais profundas (camadas 3 e 4) as influências só se fizeram sentir nas áreas com maior tempo de cultivo (12 e ou 18 anos). Em relação à frações não lábil e a fração Pi-HCl, independentemente das camadas, as

influências não aconteceram com a mesma intensidade, visto que na maioria das situações não foram detectadas diferenças entre os teores na VN e nas áreas cultivadas.

Em razão da progressiva redução das influências em profundidade do P aplicado em superfície e sem revolvimento, observou-se em relação às frações lábeis e moderadamente lábil, a tendência de formação de um gradiente de disponibilidade de P com o aprofundamento das camadas.

A contribuição percentual máxima da fração Pi-RTA em relação ao P total obtido pela soma das frações do fracionamento foi de 20 %. Para a fração Pi-Bic este valor não ultrapassou 8 %. Em relação à fração Pi-Hid0,1, o valor máximo da contribuição foi de 12 %. Estas contribuições percentuais máximas para o P total do fracionamento aconteceram sempre na camada 1 (0-0,10 m). Entre as frações Pi-HCl e Pi-Hid0,5 não foi observada a mesma constância, visto que a contribuição percentual máxima do Pi-HCl (4 %) ocorreu na camada 2 e a do Pi-Hid0,5 (9 %) ocorreu nas camadas 2 e 3.

2.3.2.2 Frações orgânicas

2.3.2.2.1 Fósforo orgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic)

Os resultados relativos aos teores de Po-Bic estão apresentados na Figura 16.

Assim como o Pi-RTA e Pi-Bic, o P orgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic) corresponde também a uma fração disponível para as plantas (CROSS; SCHLESINGER 1995; GATIBONI, 2003; NEGASSA; LEINWEBER, 2009)

Como pode ser visto, o teor de Po-Bic no solo variou de 0 mg kg^{-1} a 28,2 mg kg^{-1}. Levy e Schlesinger (1999) utilizaram o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) em diversas ordens de solo, incluindo Oxisol, e encontraram teores de Po-Bic que variaram de 0 a 57,5 mg kg^{-1}. Negassa e Leinweber (2009), numa ampla revisão a respeito do fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), relataram teores de Po-Bic variando de 0 a 526 mg kg^{-1}. Considerando apenas os ambientes tropicais e subtropicais, os teores de Po-Bic variaram de 0 a 131 mg kg^{-1}.

Na camada 1, os teores de Po-Bic variaram de 0 mg kg^{-1} (VN) a 28,3 mg kg^{-1} (8 anos). Da mesma forma que para o Pi-RTA e o Pi-Bic, os teores cresceram expressivamente nas AC, diferindo do teor na VN. A área 5 anos apresentou o menor teor entre as AC (15,2 mg kg^{-1}) e foi inferior à área 8 anos, que se destacou com o maior teor (28,3 mg g^{-1}), mas não diferiu das áreas 12 e 18 anos. De modo semelhante ao verificado para a a fração Pi-Bic, a contribuição percentual do Po-Bic para o P total do fracinamento (Figura 8) variou de 0 % (VN) a 7 % (8 anos). Nas AC a variação foi de 4 % (12 anos) a 7 % (8 anos), um pouco mais ampla do que a observada na fração Pi-Bic (variação de 6 a 7 %).

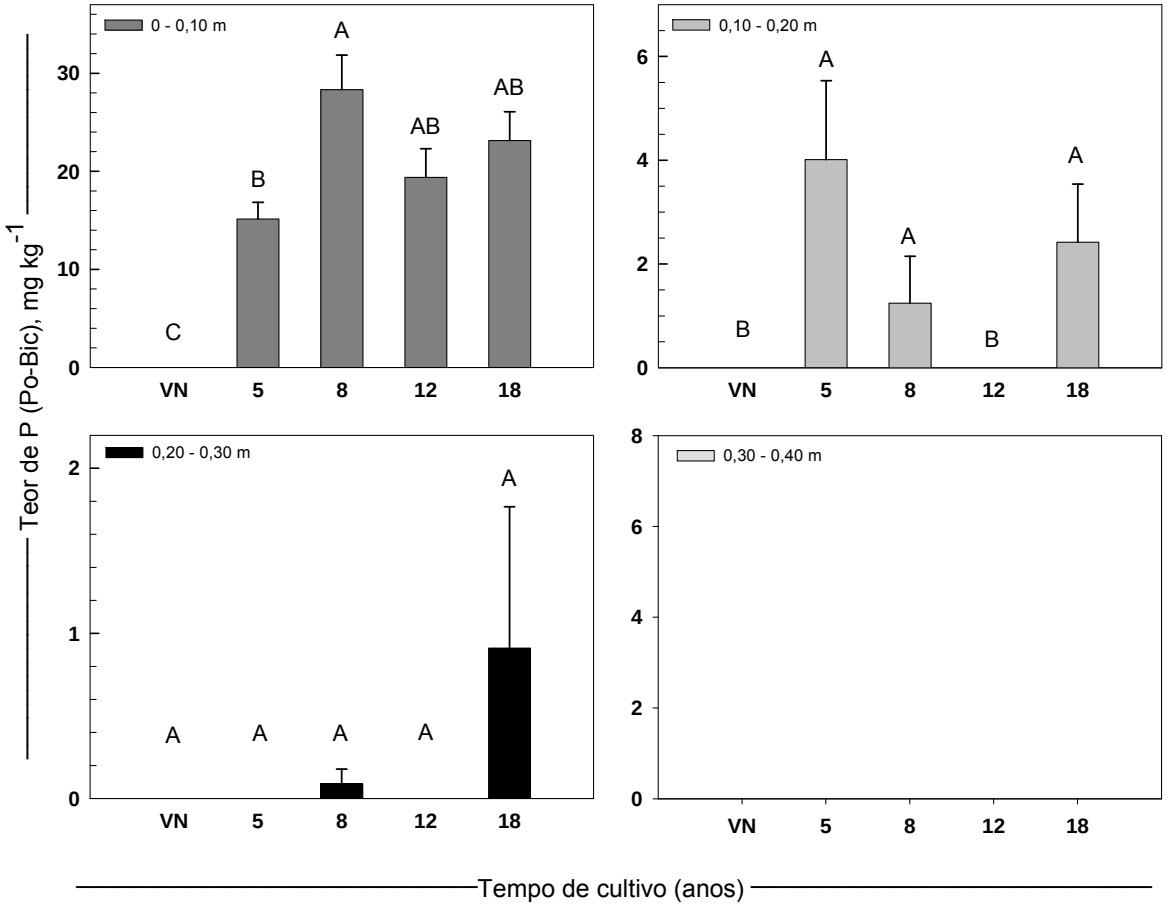

Figura 16 – Fósforo orgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Bic) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

Na camada 2 os teores de Po-Bic foram bem mais baixos (variaram de 0 mg kg^{-1} na VN e área 12 anos a 4,0 mg kg^{-1} na área 5 anos). Entre as AC, o teor mais alto (4,0 mg kg^{-1}) ocorreu na área 5 anos, com decréscimo dos valores nas

demais áreas, ao contrário da tendência de crescimento dos teores com o tempo de cultivo, observada na camada 1. Mesmo com o mencionado decréscimo, não houve diferença entre os teores da fração nas áreas 5, 8 e 18 anos. A contribuição percentual da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 9) foi menor do que na camada 1 (o valor máximo correspondeu a 2 % na área 5 anos).

Na camada 3 os teores de Po-Bic foram muito baixos, tendo sido perceptíveis na Figura 16 apenas os valores correspondentes às áreas 8 anos (0,1 mg kg^{-1}) e 18 anos (0,9 mg kg^{-1}). Não houve diferença estatística entre os teores.

Na camada 4, os teores aproximaram-se de 0 mg kg^{-1}, de modo semelhante ao que ocorreu para o Pi-Bic.

Conforme discutido anteriormente, foi bastante baixa a influência da adubação fosfatada superficial e sem posterior incorporação sobre a fração Pi-Bic na camada 2, quando comparada à camada 1. No caso dos teores de Po-Bic, a interpretação é bem semelhante. Por se tratar, porém, de fração orgânica de P, devem ser também levadas em consideração a deposição de biomassa residual originada dos cultivos e a atividade dos microorganismos. Para ambas as frações não foi possível detectar influência da aplicação do P nas camadas 3 e 4.

Segundo Oberson et al. (2001), os resíduos resultantes das culturas e os microorganismos exercem função chave nas transformações do P orgânico do solo. Rheinheimer e Anghinoni (2003) e Tiecher, Rheinheimer e Calegari (2012) relatam que as condições criadas pelo cultivo em plantio direto favorecem a transformação em P orgânico do P inorgânico adicionado mediante fertilizantes, e ressaltam a importância das reações biológicas na camada superficial de áreas sob esse sistema de cultivo.

Araújo, Salcedo e Sampaio (1993) observaram incremento nos teores de Po-Bic de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar durante 5, 15 e 25 anos. Os autores verificaram na área com 25 anos, tanto na camada superficial como na subseqüente, que os teores da fração foram superiores aos da VN. Para a camada mais profunda (0,15-0,40 m), os autores não observaram diferença entre os teores das áreas estudadas. Estes resultados estão de acordo com o obtido na presente pesquisa, quando alterações no Po-Bic se fizeram sentir somente até 0,20 m de profundidade.

Guardini et al. (2012) constataram aumento nos teores de Po-Bic na camada superficial do solo de áreas que receberam aplicação de dejetos e cama de suínos

por longo período de tempo, em relação a área controle, com exceção da área que recebeu o dejeto suíno na menor dose. À semelhança do presente estudo, na camada mais profunda não houve diferença entre elas.

Tiecher, Rheinheimer e Calegari (2012), avaliando as formas de P orgânico do solo sob diferentes sistemas de manejo, observaram que, como resultado do maior teor de carbono orgânico e P total, além da grande quantidade de biomassa residual depositada em superfície e da grande atividade microbiana na camada superficial em sistemas de plantio direto, houve grande transformação em P orgânico, do P inorgânico adicionando via fertilizantes.

Schimitt et al. (2013), avaliando o acúmulo de P no solo em áreas de vinhedos com diferentes tempos de exploração (14 e 30 anos), observaram que na camada superficial, os teores de Po-Bic foram maiores do que os teores encontrados na área de referência, sem diferir entre eles.

2.3.2.2.2 Fósforo orgânico extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1)

Os resultados relativos aos teores de Po-Hid0,1 estão apresentados na Figura 17.

De acordo com Cross e Schlesinger (1995), Gatiboni (2003) e Negassa e Leinweber, (2009), a fração orgânica de P extraída por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1) é classificada como de moderada disponibilidade para as plantas.

Os teores da fração variaram de 15,8 mg kg^{-1} a 157,3 mg kg^{-1}. Levy e Schlesinger (1999), usando o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) em diversas ordens de solo, incluindo Oxisol, encontraram teores de Po-Hid0,1 que variaram de 0 a 17,3 mg kg^{-1}. Negassa e Leinweber (2009) em ampla revisão a respeito do fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), relataram teores de Po-Hid0,1 variando de 3 a 570 mg kg^{-1}. Considerando os valores relatados para os ambientes tropicais e subtropicais, os teores de Pi-Hid0,1 variaram de 3 a 570 mg kg^{-1}.

Na camada 1 os teores de Po-Hid0,1 variaram de 29,6 mg kg^{-1} (VN) a 157,3 mg kg^{-1} (18 anos). Dentre as AC as variações foram de 69,1 mg kg^{-1} (5 anos) a 157,3 mg kg^{-1} (18 anos). É flagrante, na Figura 17, o crescimento contínuo dos

valores, com o aumento no tempo de cultivo, numa clara evidência da influência da adubação fosfatada sobre os teores de Po-Hid0,1 nessa camada. Todas as AC diferiram da VN. Quanto à contribuição percentual da fração para o P total do fracionamento (Figura 8), os números variaram de 20 % (VN) a 34 % (18 anos). A participação percentual da fração Po-Hid0,1 para o P total do fracionamento foi mais expressiva do que a da fração Pi-Hid0,1.

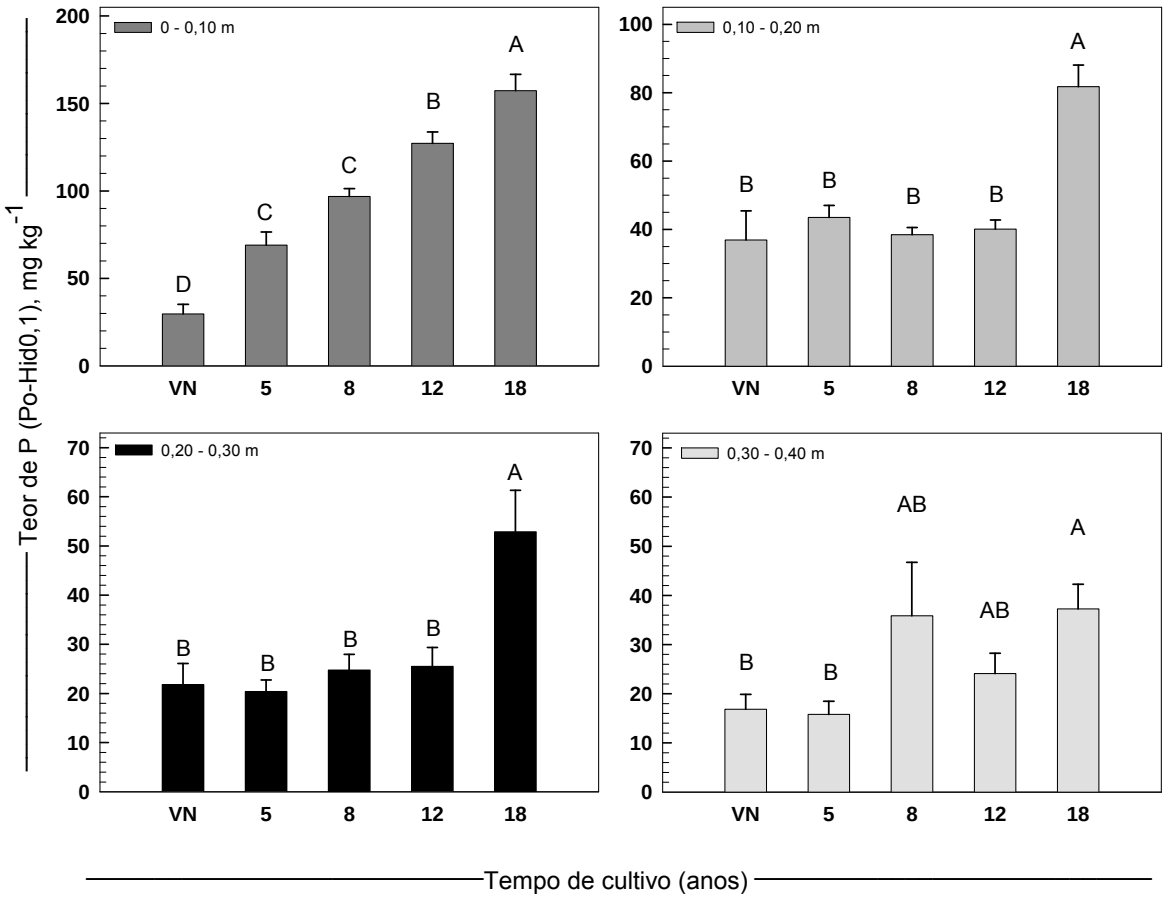

Figura 17 – Fósforo orgânico extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-Hid0,1) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras nos topos das colunas representam os erros padrão da média

Na camada 2, os teores de Po-Hid0,1 variaram de 36,9 mg kg^{-1} (VN) a 81,7 mg kg^{-1} (18 anos). Diferentemente do observado na camada 1, não se delineou na camada 2 uma clara influência do tempo de cultivo sobre os teores de Po-Hid0,1. Como pode ser visto, somente o teor na área 18 anos diferiu de todas as demais áreas cultivadas, cujos teores não diferiram entre si, nem da VN. Este comportamento diferiu do observado para a fração Pi-Hid0,1, na mesma camada, quando se configurou um manifesto crescimento dos teores com o aumento do

tempo de cultivo (Figura 13). Em termos de contribuição da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 9), os números correspondentes ao Po-Hid0,1 variaram de 20 % (12 anos) a 34 % (18 anos), como ocorreu na camada 1.

Na camada 3, os teores de Po-Hid0,1 variaram de 20,4 mg kg^{-1} (5 anos) a 52,9 mg kg^{-1} (18 anos). Como pode ser visto na Figura 17, ainda que com valores mais baixos, o comportamento desta fração na camada 3 assemelhou-se muito ao que ocorreu na camada 2. Assim, somente o teor na área 18 anos foi diferente de todas as demais áreas cultivadas, cujos teores foram iguais entre si e iguais à VN. A contribuição percentual da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 10) variou de 15 % (12 anos) a 29 % (18 anos) e, mais uma vez, superou os percentuais obtidos pela fração Pi-Hid0,1.

Na camada 4, os teores de Po-Hid0,1 variaram de 15,8 mg kg^{-1} (5 anos) a 37,2 mg kg^{-1} (18 anos). Mais uma vez a área 18 anos apresentou o maior teor (37,2 mg kg^{-1}). Contudo, diferentemente do observado nas camadas 1, 2 e 3, o teor foi igual aos das áreas 8 e 12 anos (respectivamente 35,8 e 24,1 mg kg^{-1}). Também não houve diferença significativa entre as áreas VN, 5, 8 e 12 anos. Quanto à contribuição da fração para o P total do fracionamento (Figura 11), os percentuais variaram de 13 % (5 anos) a 27 % (8 anos).

Assim como foi colocado para a fração Po-Bic, a interpretação não pode deixar de levar em consideração a influência da deposição de biomassa residual originada dos cultivos e a atividade dos microorganismos, pois estes exercem papéis primordiais nas transformações do P orgânico do solo (OBERSON et al., 2001).

Os resultados obtidos evidenciam, com maior ou menor intensidade nas diferentes camadas, a influencia positiva do maior tempo de cultivo, e por conseqüência dos maiores aportes de fertilizante fosfatado, nos teores do Po-Hid0,1. Evidenciam também uma redução continuada dos teores da fração, com o aprofundamento das camadas. Conforme destacado acima, em se tratando de fração orgânica de P, é possível que a natural redução da matéria orgânica em profundidade, notadamente sob condições de plantio direto, concorra para a observada redução dos teores de Po-Hid0,1.

No trabalho conduzido por Araújo, Salcedo e Sampaio (1993), houve incremento nos teores de Po-Hid0,1 da camada superficial de um Argissolo cultivado com cana-de-açucar durante 5, 15 e 25 anos. Nas áreas com 25 anos, o teor foi superior à VN. Também na camada subsequente, onde os aumentos dos teores de

Po-Hid0,1 foram menos pronunciados do que na camada superficial, o teor da área com 25 anos de cultivo foi superior ao teor da VN. Para a camada mais profunda avaliada, os autores não observaram diferença entre os teores das áreas estudadas. Há concordância entre os resultados desse trabalho e os do presente estudo, no que diz respeito às influencias positivas do tempo de cultivo sobre os teores da fração no solo.

Resultados semelhantes aos observados no presente estudo e nos estudos anteriormente citados foram também relatados por Doberman, George e Thevs (2002). Os autores, avaliando a influência da adubação fosfatada sobre as frações de P em Ultisols e Oxisols das Filipinas e Indonésia, em um experimento com quatro anos de duração, observaram que as aplicações anuais de P resultaram em teores de Po-Hid0,1 maiores do que os teores encontrados na VN independente da dose de P aplicada.

Guardini et al. (2012), avaliando a influência da aplicação de dejetos e cama de suínos por longo período de tempo, sobre o acúmulo de fósforo e suas frações, observaram que houve aumento nos teores de Po-Hid0,1 na camada superfícial das áreas que receberam a cama de suínos, em relação a área controle, com exceção da área que recebeu dejeto suíno na menor dose.

Schimitt et al. (2013) observaram que, na camada superficial do solo de vinhedos com diferentes tempos de exploração (14 e 30 anos), os teores de Po-Hid0,1 foram maiores do que os teores encontrados na área de referência, sem diferir entre eles. Na camada mais profunda os teores de Po-Hid0,1 também foram maiores do que o teor da área de referência.

2.3.2.2.3 Fósforo orgânico extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5)

Os resultados relativos aos teores de Po-Hid0,5 estão apresentados na Figura 18.

Originalmente, o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), não contempla essa etapa. Segundo Gatiboni et al. (2013), esse passo foi incluído no método proposto por Condron e Goh (1989) buscando substituir a extração com NaOH 0,1 mol L^{-1} + ultrasonificação. O P extraído nessa fração é considerado não-lábil.

Na camada 1, os teores de P orgânico extraídos por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5) variaram de 30,9 mg kg^{-1} (VN) a 83,5 mg kg^{-1} (12 anos), evidenciando uma clara tendência de aumento de valores com o tempo de cultivo. Os teores das áreas 8, 12 e 18 anos alcançaram superioridade em relação ao teor da VN, mas não foram diferentes entre si. O teor da VN foi igual ao valor da área 5 anos (44,5 mg kg^{-1}). Em termos de participação percentual da fração em relação ao P total do fracionamento (Figura 8), o teor de Po-Hid0,5 correspondeu de 14 % (18 anos) a 23 % (VN).

Assim como aconteceu para o P extraído por hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1}, no qual os percentuais da fração orgânica superaram sempre os da inorgânica, também no P extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} os percentuais da fração orgânica foram sempre maiores.

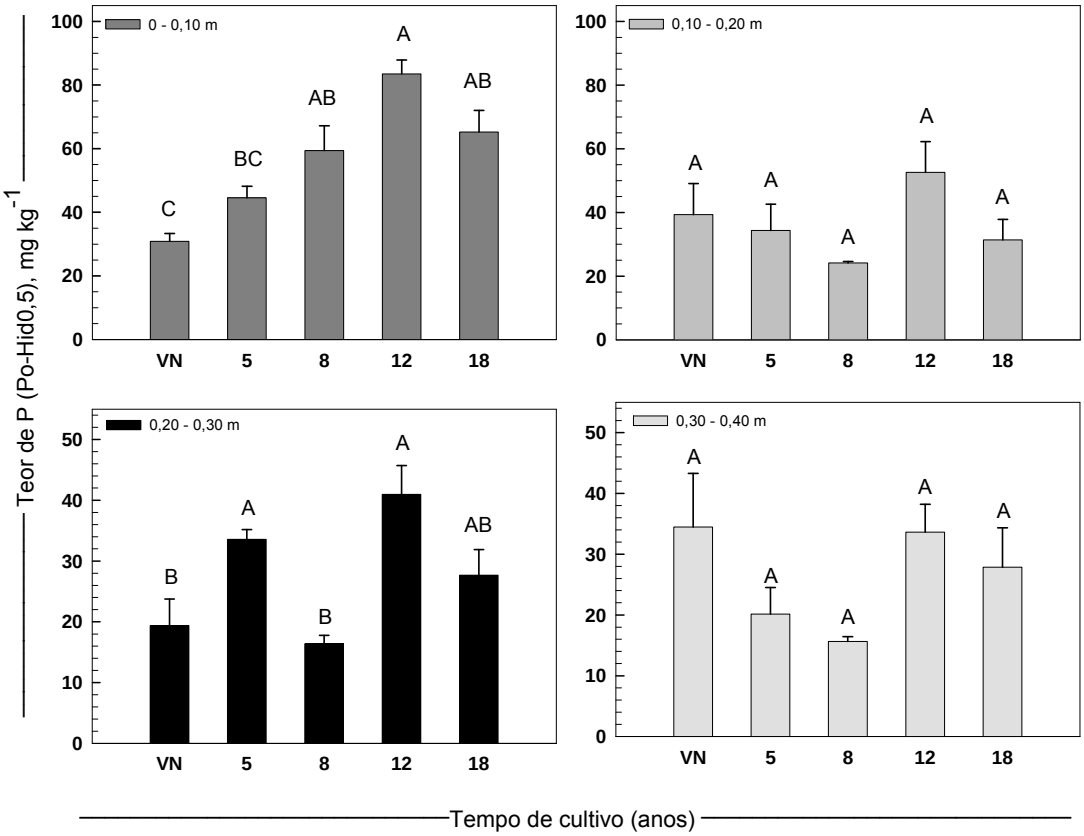

Figura 18 – Fósforo orgânico extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-Hid0,5) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

Apesar de ter sido observado aumentos nos teores de Po-Hid0,5 na camada 1 das AC em relação à VN (Figura 18), a contribuição relativa dessa fração não lábil

para o P total do fracionamento diminuiu nas AC (Figura 8), indicando que o aumento nas frações lábeis e moderadamente lábeis foram, nas áreas cultivadas, as que mais contribuíram para o P total obtido pela soma das frações do fracionamento.

Na camada 2, os teores de Po-Hid0,5 variaram de 24,2 mg kg^{-1} (8 anos) a 52,6 mg kg^{-1} (18 anos), sem diferenças entre as médias de todas as situações. A contribuição relativa da fração para o P total do fracionamento (Figura 9) variou de 13 % (18 anos) a 25 % (VN e 12 anos). Mesmo não tendo sido encontradas diferenças nos teores (Figura 18), houve variação na contribuição do Po-Hid0,5 para o P total do fracionamento (Figura 9), verificando-se nas AC (excessão para a área 12 anos) menor participação percentual dessa fração não lábil, em comparação à VN.

Na camada 3, os teores de Po-Hid0,5 variaram de 16,4 mg kg^{-1} (8 anos) a 41,0 mg kg^{-1} (12 anos). Os maiores teores foram observados nas áreas 5, 12 e 18 anos (respectivamente 33,5, 41,0 e 27,7 mg kg^{-1}), que não diferiram entre si. Delas apenas a área 18 anos não foi superior às áreas VN e 8 anos (respectivamente 19,4 e 16,4 mg kg^{-1}). Em termos de contribuição relativa da fração para o P total do fracionamento (Figura 10), os números variaram de 14 % (8 anos) a 27 % (5 anos), sendo que nas áreas 8 e 18 anos as contribuições percentuais desta fração não lábil foram menores do que na VN.

Na camada 4, os teores de Po-Hid0,5 estiveram entre 15,7 mg kg^{-1} (8 anos) a 34,5 mg kg^{-1} (VN), sem diferir entre si. Também não possibilitam a visualização de qualquer tendência de variação em relação ao tempo de cultivo, comportamento bem semelhante ao observado na camada 2. Em termos de contribuição percentual da fração para o P total do fracionamento (Figura 11), os números variaram de 13 % (8 anos) a 28 % (VN). Cabe destacar que o percentual desta fração não lábil na VN foi maior do que os percentuais observados em todas as AC.

Enquanto que para a fração Pi-Hid0,5 não foram verificadas diferenças entre as áreas, em qualquer uma das camadas estudadas, para o Po-Hid0,5 foi possível detectar diferenças decorrentes de variações no tempo de cultivo, mais manifestas na camada 1. Essa informação está de acordo com o que foi relatado por Tiecher, Rheinheimer e Calegari (2012), que avaliando as formas de P orgânico do solo sob diferentes sistemas de manejo, observaram que o maior teor de carbono orgânico e do P total, somados à grande quantidade de biomassa residual depositada na superfície e à grande atividade microbiana na camada superficial, em sistemas de

plantio direto, favoreceram a transformação do P inorgânico do fertilizante em P orgânico que se acumulou em todas as frações avaliadas de P orgânico (Po-Bic, Po-Hid0,1 e Po-Hid0,5).

Guardini et al. (2012), avaliando a influência da aplicação de dejetos e cama de suínos por longo período de tempo, sobre o acúmulo de fósforo e suas frações, observaram que as áreas que receberam cama de suíno apresentaram teores de Po-Hid0,5 superiores às demais. Na camada mais profunda, não houve diferença entre os teores de Po-Hid0,5 das áreas avaliadas. Estes resultados estão de acordo com o que foi constatado no presente estudo, no que diz respeito à influencia positiva dos materiais aplicados como fertilizantes sobre os teores do Po-Hid0,5, na camada próxima da zona de aplicação, assim como em relação à ausência de respostas em camadas mais profundas.

Schimitt et al. (2013), avaliando o acúmulo de P no solo de vinhedos, em áreas com diferentes tempos de exploração (14 e 30 anos), observaram que na camada superficial dessas áreas os teores de Po-Hid0,5 foram superior ao da área nativa. Na camada mais profunda, apenas a área com 30 anos de cultivo apresentou teor de Po-Hid0,5 superior a área nativa.

2.3.2.2.4 Sumário interpretativo de frações orgânicas

Avaliou-se neste tópico uma fração lábil (Po-Bic), uma moderadamente lábil (Po-Hid0,1) e uma não lábil (Po-Hid0,5). À semelhança do observado nas frações inorgânicas, na camada mais superficial (0-0,10 m) foram expressivas as influências das aplicações superficiais de P sobre as frações lábil e moderadamente lábil, refletidas na superioridade dos seus teores em todas as áreas cultivadas, em relação à VN. Nas camadas 2, 3 e 4 as influências não foram tão marcantes, evidenciando-se mais na área com maior tempo de cultivo (18 anos). Em relação à fração não lábil, ainda que se tenha constatado na camada 1 influência da adubação fosfatada sobre os seus teores, somente a partir da área com 8 anos de cultivo tais efeitos se fizeram manifestos. A partir da camada 2, as influências não aconteceram com a mesma intensidade, visto que na maioria das situações não foram detectadas diferenças entre os teores na VN e nas áreas cultivadas.

A contribuição percentual máxima da fração Po-Bic em relação ao P total obtido pela soma das frações do fracionamento não ultrapassou 7 %, valor bem

próximo dos 8 % observados para o Pi-Bic. Já em relação à fração Po-Hid0,1, o valor máximo da contribuição para o P total do fracionamento foi de 34 %, muito acima dos 12 % observados para o Pi-Hid0,1. Para a fração não lábil Po-Hid0,5 a participação relativa máxima foi de 28 %, também mais alta do que os 9 % alcançados pela correspondente Pi-Hid0,5. Diferentemente do observado para as frações inorgânicas correspondentes, houve uma ampla variação no que diz respeito às camadas onde os percentuais máximos ocorreram. Em relação ao Po-Bic este percentual ocorreu na camada 1. Para a fração Po-Hid0,1 nas camadas 1 e 2. E para a fração Po-Hid0,5 o percentual máximo ocorreu na camada mais profunda (0,30-0,40 m).

2.3.2.3 Fósforo residual (P-Residual)

Os resultados relativos aos teores de P-Residual estão apresentados na Figura 19.

De acordo com Cross e Schlesinger (1995), Gatiboni (2003) e Negassa e Leinweber (2009), a fração de P residual é classificada como não disponível às plantas.

De maneira geral, o teor de P-Residual variou de 43,4 mg kg^{-1} a 75,8 mg kg^{-1}. Levy e Schlesinger (1999), usando o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), em diversas ordens de solo, incluindo Oxisol, encontraram teores de P-Residual que variaram de 0 a 60,9 mg kg^{-1}. Negassa e Leinweber (2009), numa ampla revisão a respeito do fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), relataram teores de P-Residual variando de 19 a 3.786 mg kg^{-1}. Considerando apenas os ambientes tropicais e subtropicais, os teores de P-Residual variaram de 19 a 1.279 mg kg^{-1}.

Na camada 1, os teores de P-Residual variaram de 44,5 mg kg^{-1} (VN) a 75,8 mg kg^{-1} (12 anos). A Figura 19 indica aumento dos teores da fração com o tempo de cultivo. A área 12 anos, que apresentou o maior teor, 75,8 mg kg^{-1}, foi estatisticamente igual à área 18 anos (68,3 mg kg^{-1}) e superior a todas as demais. O teor da área 8 anos (61,2 mg kg^{-1}) não diferiu do obtido na área 5 anos (48,1 mg kg^{-1}), que por sua vez não diferiu da VN (44,5 mg kg^{-1}). Em termos de contribuição relativa da fração para o P total do fracionamento, a Figura 8 mostra que a maior

participação foi na VN, seguindo-se uma discreta redução dos valores com o tempo de cultivo.

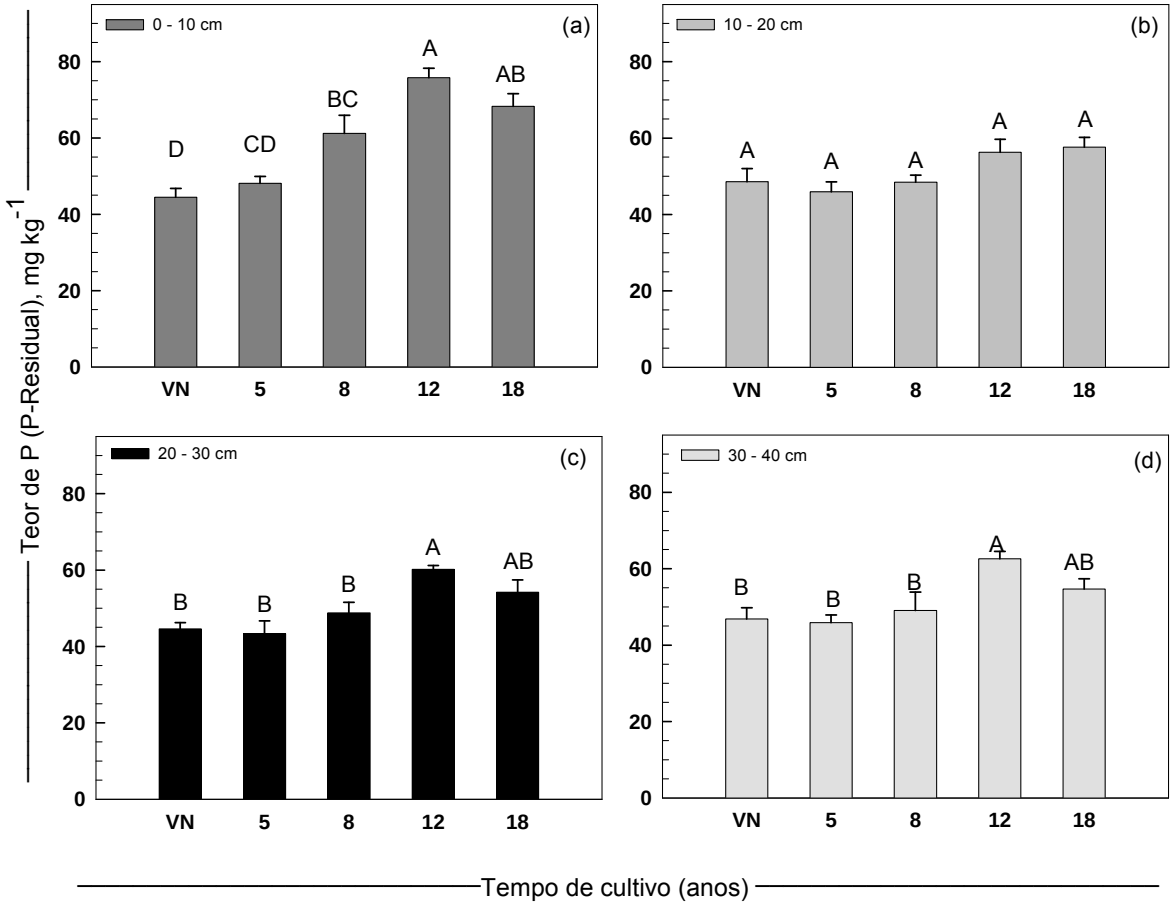

Figura 19 – Fósforo residual (P-Residual) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

Na camada 2, os teores de P-Residual variaram de 46,0 mg kg^{-1} (5 anos) a 57,6 mg kg^{-1} (18 anos), sem diferir entre eles. Em termos de contribuição relativa da fração para o P total do fracionamento, a Figura 9 mostra que a maior participação, assim como na camada 1, foi na VN, sem uma tendência bem definida no comportamento dessa participação com o tempo de cultivo.

Na camada 3, os teores de P-Residual variaram de 43,4 mg kg^{-1} (5 anos) a 60,2 mg kg^{-1} (12 anos). As áreas 12 e 18 anos foram as que apresentaram os maiores teores de P-Residual (respectivamente 60,2 e 54,2 mg kg^{-1}), sem diferir entre elas. A área 18 anos não diferiu das demais áreas. Em termos de contribuição relativa da fração para o P total do fracionamento, a Figura 10 mostra leve tendência

de redução com o crescimento do tempo de cultivo. Observou-se que, no geral, os percentuais de P-residual crescem a medida que se aprofunda no solo.

Na camada 4, os teores de P-Residual variaram de 45,9 mg kg^{-1} (5 anos) a 62,6 mg kg^{-1} (12 anos). De modo bem semelhante à camada 3, as áreas 12 e 18 anos apresentaram os maiores teores da fração (respectivamente 62,6 e 54,7 mg kg^{-1}), que não diferiram. Da mesma forma, a área 18 anos não diferiu das demais áreas.

Guardini et al. (2012), avaliando a influência da aplicação de dejetos e cama de suínos por longo período de tempo, sobre o acumulo de fósforo e suas frações, observaram que houve aumento nos teores de P-Residual na camada superfícial das áreas que receberam a cama de suínos, em relação a área controle, enquanto que na camada mais profunda não houve diferença entre os teores.

Schimitt et al. (2013), avaliando o acumulo de P em solo de vinhedos com diferentes tempos de exploração (14 e 30 anos), observaram que na camada superficial os teores de P-Residual foram maiores do que os teores encontrados na área de referência. Já na camada mais profunda, apenas o vinhedo com 14 anos apresentou teores de P-Residual maior do que o teor da área de referência. Também no presente estudo, os teores do P residual na camada de 0-0,10 m da maioria das áreas cultivadas (exceção para a área 5 anos) foram superiores ao da área VN (Figura 19).

2.3.2.3.1 Sumário interpretativo de fósforo residual

Comparativamente a outras frações, sobretudo frações lábeis ou moderadamente lábeis, os teores do P-residual pouco se alteraram em função da profundidade. Há evidências de aumento dos teores da fração com o tempo de cultivo, sobretudo na camada 1. Nesta camada e nas camadas 3 e 4 os maiores teores foram observados na área 12 anos.

Nas camadas 1 e 2 a participação relativa do P-residual no P total do fracionamento foi maior na área VN do que em todas as áreas cultivadas. Na camada 3 o percentual da área 8 anos superou levemente o da VN, observando-se tendência de redução do percentual com o aumento do tempo de cultivo. Na camada 4 o percentual da VN foi superado pelo da área 5 anos.

2.3.2.4 Fósforo total

O fósforo total foi obtido por meio da soma das frações do fracionamento químico (P-SF) e também pela digestão total do solo (P-Total).

De maneira geral, o teor de P-SF (Figura 20) variou de 100,2 mg kg^{-1} (5 anos; camada 4) a 480,1 mg kg^{-1} (12 anos; camada 1). Negassa e Leinweber (2009), numa ampla revisão a respeito do fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), relataram teores de P-SF variando de 116 a 4.986 mg kg^{-1}. Considerando-se apenas os valores para os ambientes tropicais e subtropicais, os teores de P-SF variaram de 116 a 3.177 mg kg^{-1}.

Na camada 1, o teor de P-SF (Figura 20 a) variou de 145,9 mg kg^{-1} (VN) a 480,1 mg kg^{-1} (12 anos). É nítida a influência dos adubos fosfatados aplicados nas áreas cultivadas sobre o P total, evidenciada pela superioridade de todos os teores de P-SF nas AC em relação ao teor na VN. De modo coerente com esta afirmativa, os maiores teores foram detectados nas áreas cultivadas há mais tempo (8, 12 e 18 anos), cujos valores foram, respectivamente, 407,2 mg kg^{-1}; 480,1 mg kg^{-1}; e 468,9 mg kg^{-1},). Estes teores foram iguais entre si e superiores ao observado na área 5 anos (286,8 mg kg^{-1}).

Diferentemente do ocorrido na camada 1, na camada 2 (Figura 20 b) apenas o teor de P-SF da área 18 anos (237,6 mg kg^{-1}) alcançou diferença estatística da VN (150,0 mg kg^{-1}), em mais uma indicação da necessidade de um tempo maior para que o adubo fosfatado aplicado superficialmente possa influir em camadas mais profundas. A VN e as áreas 5, 8 e 12 anos não foram diferentes e apresentaram, respectivamente, os seguintes teores de P-SF: 150,0 mg kg^{-1}; 172,5 mg kg^{-1}; 158,5 mg kg^{-1}; e 201,3 mg kg^{-1}.

Em mais uma demonstração da necessidade de maior tempo de cultivo para que as influências do P aplicado superficialmente ocorram nas camadas mais profundas, verificou-se que na camadas 3 (Figura 20 c) apenas os teores de P-SF das áreas 12 anos (174,2 mg kg^{-1}) e 18 anos (180,5 mg kg^{-1}) diferiram da VN (111,6 mg kg^{-1}). A VN e as áreas 5 e 8 anos (respectivamente 111,6 mg kg^{-1}; 127,5 mg kg^{-1}; e 119,4 mg kg^{-1}) não foram diferentes estatisticamente.

Na camada 4 (Figura 20 d), as áreas 12 e 18 anos foram as que apresentaram maiores teores de P-SF (respectivamente 150,6 mg kg^{-1} e 154,08 mg kg^{-1},), que não diferiram estatisticamente das áreas VN (116,7 mg kg^{-1}) e 8 anos (123,07 mg kg^{-1}).

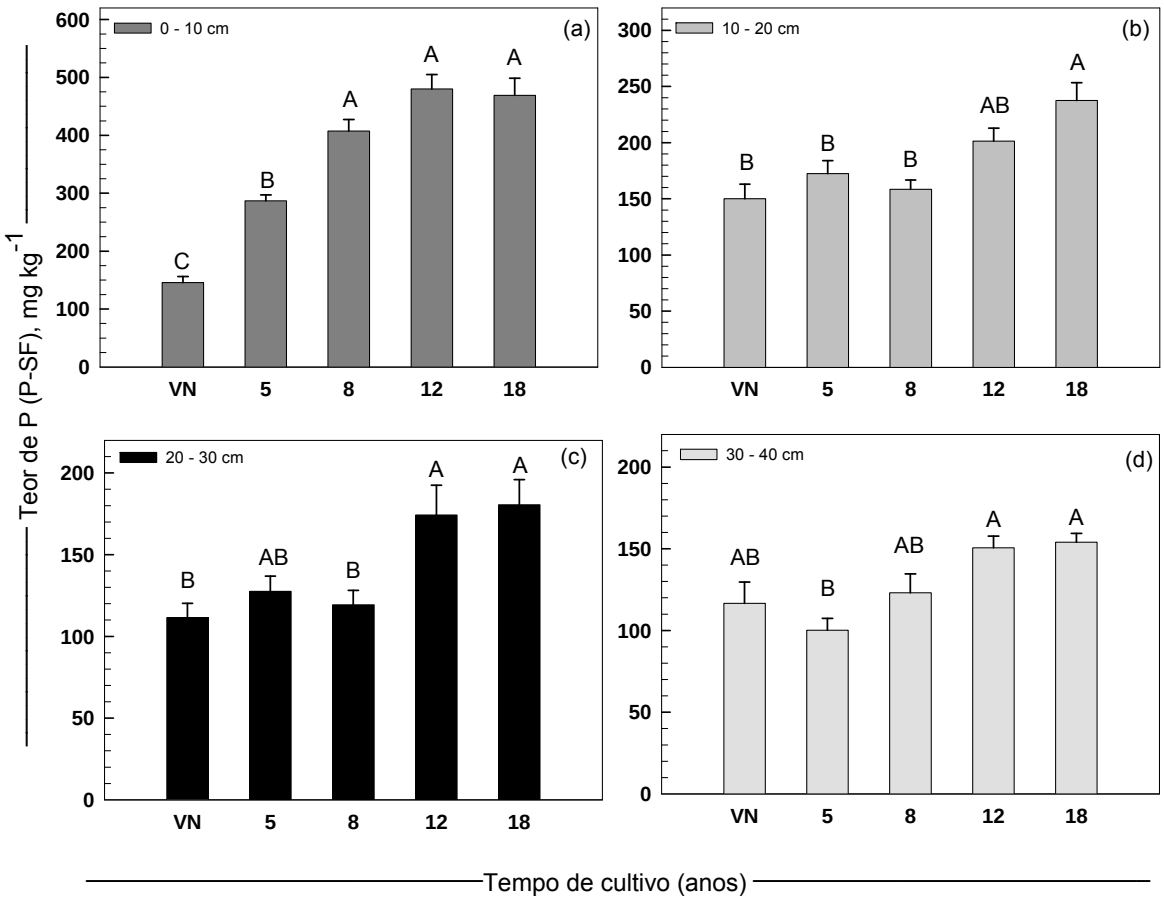

Figura 20 – Fósforo obtido pela soma das frações (P-SF) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

Guardini et al. (2012), avaliando a influência da aplicação de dejetos e cama de suínos por longo período de tempo, sobre o acumulo de fósforo e suas frações, observaram que na camada superficial houve aumento nos teores de P-SF nas áreas que receberam a maior dose dos materiais, em relação à área controle. Na camada mais profunda apenas a área que recebeu a cama de suínos na maior dose apresentou teores superiores aos teores das demais áreas.

Schimitt et al. (2013), avaliando o acumulo de P em vinhedos com diferentes tempos de exploração (14 e 30 anos), observaram que tanto na cama superficial quanto na camada mais profunda, os teores de P-SF foram maiores do que os teores encontrados na área de referência.

Para o P-Total (Figura 21), o teor variou de 140,6 mg kg^{-1} (5 anos; camada 4) a 435,0 mg kg^{-1} (8 anos; camada 1). Levy e Schlesinger (1999) usando o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) em diversas ordens de solo, incluindo Oxisol, encontraram teores de P-Total que variaram de 11,4 a 1.128,9 mg kg^{-1}.

Na camada 1, o P-Total (Figura 21 a) variou de 195,2 (VN) a 435,0 (8 anos), Assim como no P-SF, todas as AC apresentaram teores de P-Total maiores do que o teor da VN. A área 5 anos apresentou P-Total de 299,8 mg kg^{-1}, estatisticamente inferior às demais áreas cultivadas, que não diferiram entre si.

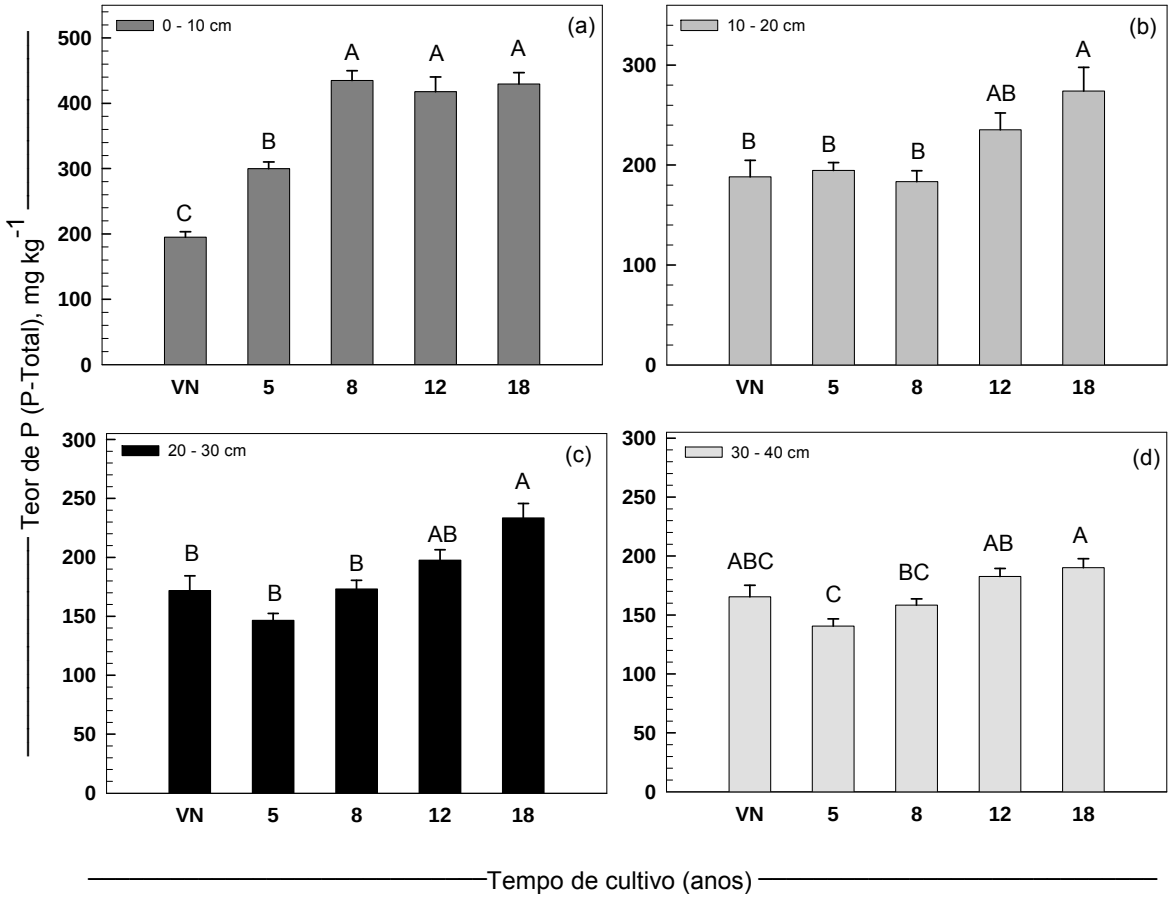

Figura 21 – Fósforo obtido pela digestão total do solo (P-Total) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos. Colunas seguidas de mesma letra dentro de cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p<0,05$). As barras no topo das colunas representam os erros padrão da média

De modo também semelhante ao observado no P-SF, na camada 2 (Figura 21 b) somente o teor do P-Total da área 18 anos (274,1 mg kg^{-1}) diferiu da VN (188,2 mg kg^{-1}). A VN e as áreas 5, 8 e 12 anos não foram diferentes

estatisticamente e apresentaram, respectivamente, os seguintes teores de P-Total: 188,2 mg kg^{-1}; 194,8 mg kg^{-1}; 183,6 mg kg^{-1}; e 235,4 mg kg^{-1}.

O mesmo comportamento da camada 2 foi observado na camada 3 (Figura 21 c), na qual somente a área 18 anos apresentou teor de P-Total (233,5 mg kg^{-1}) superior a VN (171,9 mg kg^{-1}), que por sua vez foi estatisticamente igual às demais áreas cultivadas.

Na camada 4 (Figura 21 d) a área 18 anos apresentou o maior teor de P total (190,1 mg kg^{-1}), que não diferiu estatisticamente da VN. O menor valor foi observado na área 5 anos (140,6 mg kg^{-1}), que foi estatisticamente inferior às áreas 12 e 18 anos.

Houve variação entre os teores do fósforo obtidos pela digestão total do solo (P-Total) e pela soma das frações do fracionamento (P-SF). A menor variação ocorreu na camada 1 da área 5 anos, onde a diferença percentual entre o P-Total e o P-SF foi de 4 %. A maior variação foi observada na camada 3 da VN onde essa diferença foi de 35 % (Figura 22). Não obstante, a alta correlação entre os dois métodos ($r = 0,94$; $p<0,01$) indica a possibilidade de que um ou outro seja usado para estimar o fósforo total no solo em estudo.

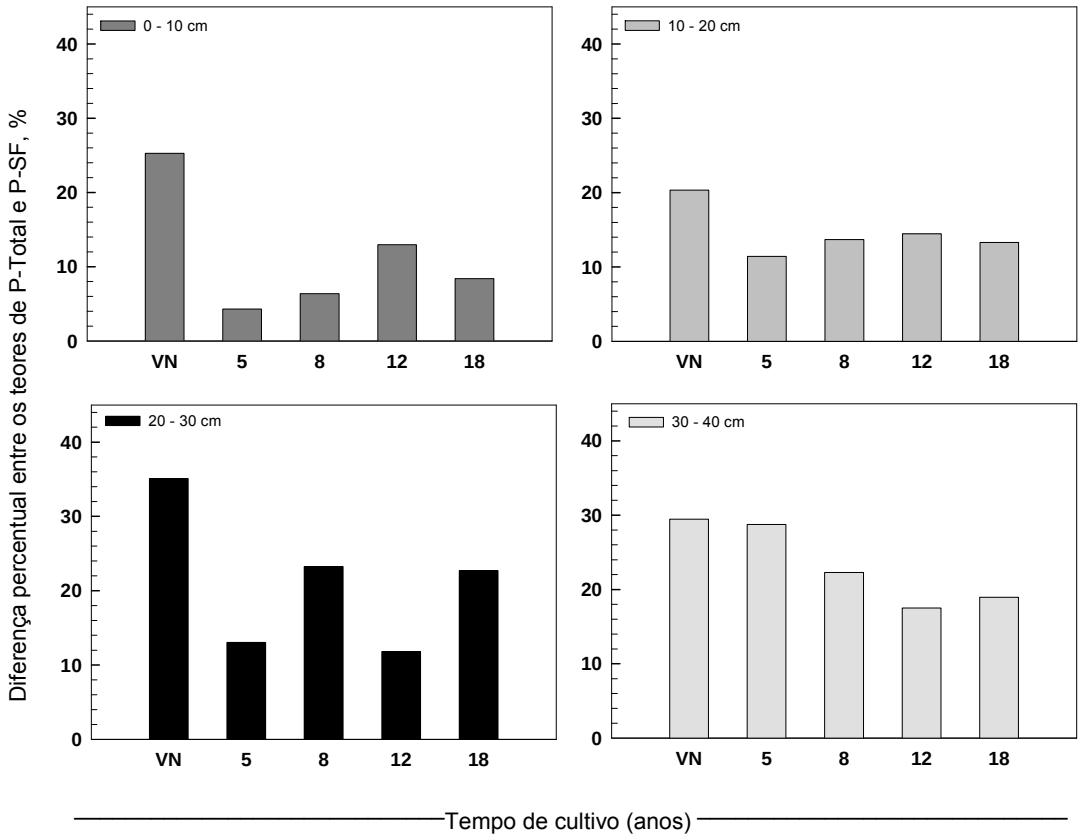

Figura 22 – Diferença percentual entre o fósforo obtido pela digestão total do solo (P-Total) e o fósforo obtido pela soma das frações do fracionamento químico proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e modificado por Condron e Goh (1989) em quatro camadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos

2.3.2.4.1 Sumário interpretativo de fósforo total

É nítida a influência dos adubos fosfatados aplicados nas áreas cultivadas sobre o fósforo total do solo, quer tenha sido obtido por meio da soma das frações do fracionamento químico (P-SF), quer tenha sido obtido pela digestão total do solo (P-Total). Coerentemente com esta constatação, para ambos os métodos de determinação, os maiores teores foram detectados nas áreas cultivadas há mais tempo (12 e 18 anos), que presumivelmente receberam maiores aportes de fertilizantes.

A estreita correlação entre os dois métodos indica a possibilidade de que possam ser usados com eficiência equivalente para estimar o fósforo total no solo em estudo.

2.3.3 Espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure)

2.3.3.1 Características espectrais dos padrões

A avaliação e o entendimento das características espectrais em termos de coordenação molecular local são importantes para identificar as espécies químicas de P no solo e como essas formas podem diferir de modelos análogos (HESTERBERG, 2010). Em alguns casos, apenas pela visualização dos espectros é possível identificar algumas feições que são características da associação de P com determinados elementos e prever de antemão a sua participação no espectro a ser avaliado.

De maneira geral, os espectros dos padrões em que o P está associado ao Al apresentaram picos mais finos e intensos, sem apresentar nenhum pico na região da pré-borda de absorção (Figura 23). Já os espectros dos padrões em que o P está associado ao Fe (Figura 24), apresentaram picos menos intensos em relação aos espectros dos padrões de P associado ao Al, com exceção dos padrões em que o P está adsorvido aos minerais de Fe e Al, nos quais os picos se apresentaram mais intensos do que os demais.

Um pico de menor intensidade na região da pré-borda de absorção foi observado nos espectros dos padrões em que o Fe se apresenta no estádio mais oxidado (Fe^{+3}), sendo ausente no padrão em que o Fe se apresenta no estádio de oxidação +2, nesse caso a vivianita. Dentre os espectros que apresentaram o pico na região da pré-borda de absorção, observou-se que o pico foi menos evidente nos padrões em que o P está adsorvido ao mineral de Fe, em comparação com os padrões onde o P faz parte da estrutura do mineral de Fe (fosfatos de Fe).

Hesterberg et al. (1999) e Beauchemin et al. (2003), avaliando a associação de P com Fe, seja estrutural ou adsorvido, verificaram que os fosfatos de Fe exibiram o pico na região da pré-borda de absorção, sendo que a intensidade do pico aumentou com o aumento da cristalinidade do mineral. Para o padrão em que o P está adsorvido ao mineral de Fe o pico se mostrou tênue.

Buscando entender a distribuição do P entre ferridrita e boemita, Khare et al. (2004) demonstraram a presença de pico na região da pré-borda de absorção, para o espectro do P adsorvido à ferridrita, e ausência no espectro do P adsorvido à

boemita. Quando esses minerais foram misturados na proporção de 1:1 o espectro evidenciou feições observadas nos anteriormente citados, indicando que a técnica foi capaz de diferenciar os tratamentos em que o P está associado ao Fe, daqueles em que o P que está associado ao Al.

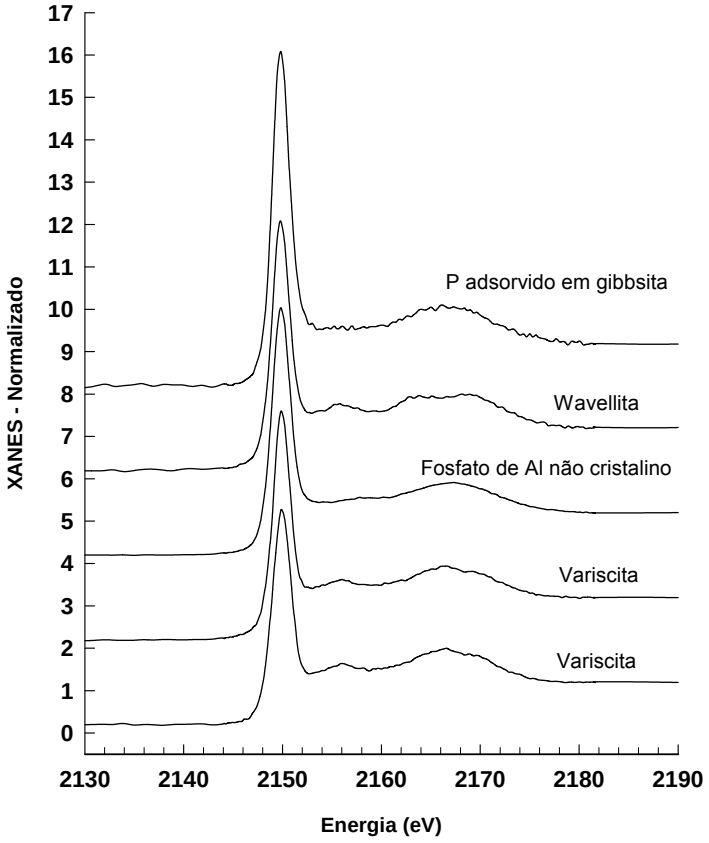

Figura 23 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo dos padrões em que o fósforo está associado ao alumínio e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear

Os espectros dos padrões em que o P está associado ao Ca (Figura 25) apresentaram picos menos intensos, em relação àqueles em que o P está associado ao Al, e com intensidade mais próxima aos espectros em que o P está associado ao Fe. Foi possível identificar uma feição muito comum nesse tipo de espectro, conhecida como ombro (Shoulder). Observou-se que no espectro da hydroxiapatita essa feição se apresentou de forma mais destacada, enquanto na monetita e brushita não foi possível notar tal forma.

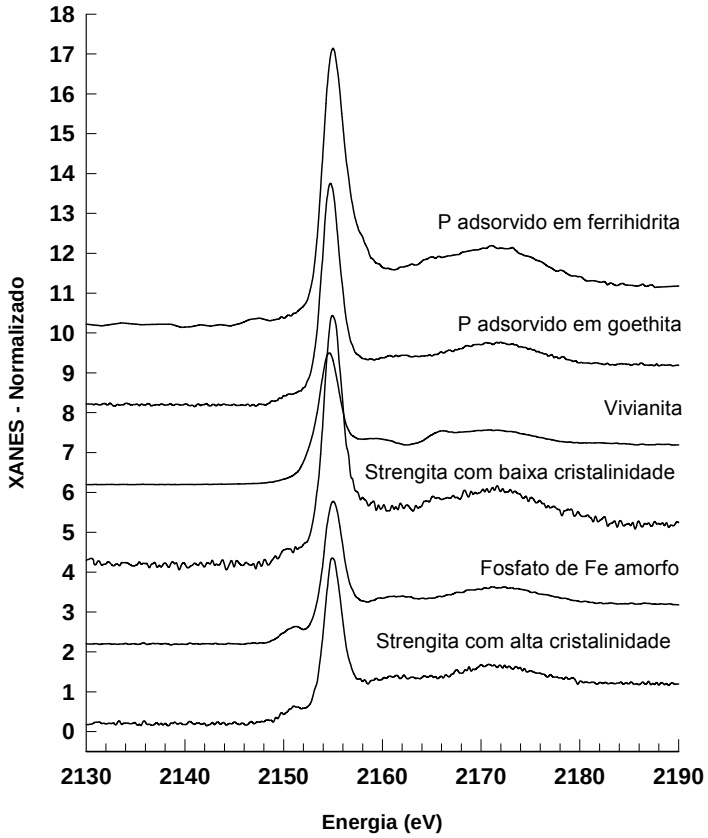

Figura 24 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo dos padrões em que o fósforo está associado ao ferro e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear

Segundo Hesterberg et al. (1999) e Hesterberg (2010), há uma variação entre diferentes fosfatos de Ca em relação a proeminência dessa feição, que diminui à medida que aumenta a solubilidade do mineral.

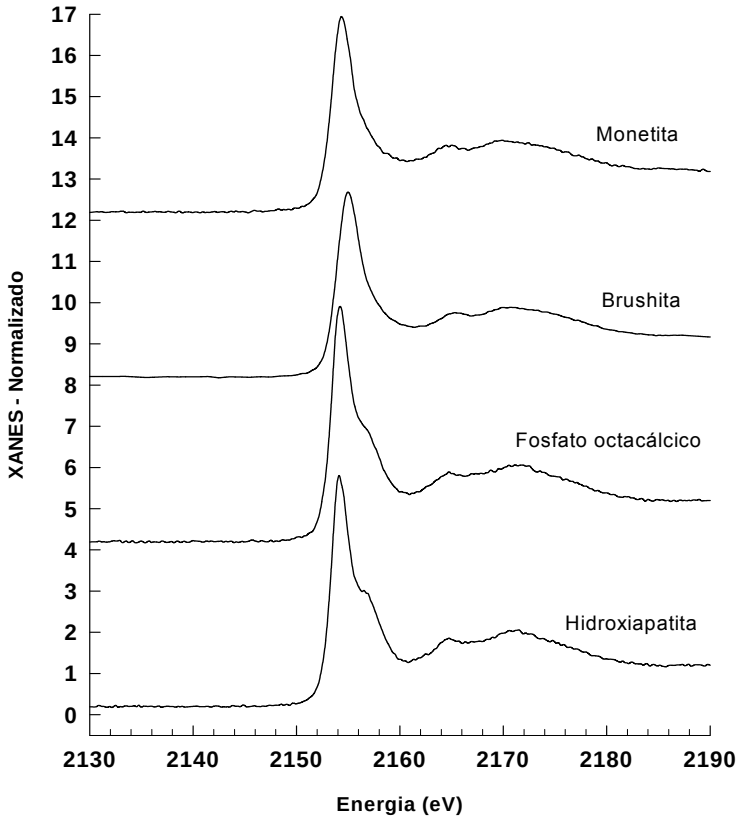

Figura 25 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo dos padrões em que o fósforo está associado ao cálcio e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear

Os espectros dos padrões em que o P está presente em compostos orgânicos apresentaram características distintas entre eles (figura 26). Os dois espectros de lecitina apresentaram picos mais proeminentes do que os picos do fosfonato e do fitato de sódio. Observou-se no espectro do fosfonato o aparecimento de uma feição após a borda de absorção.

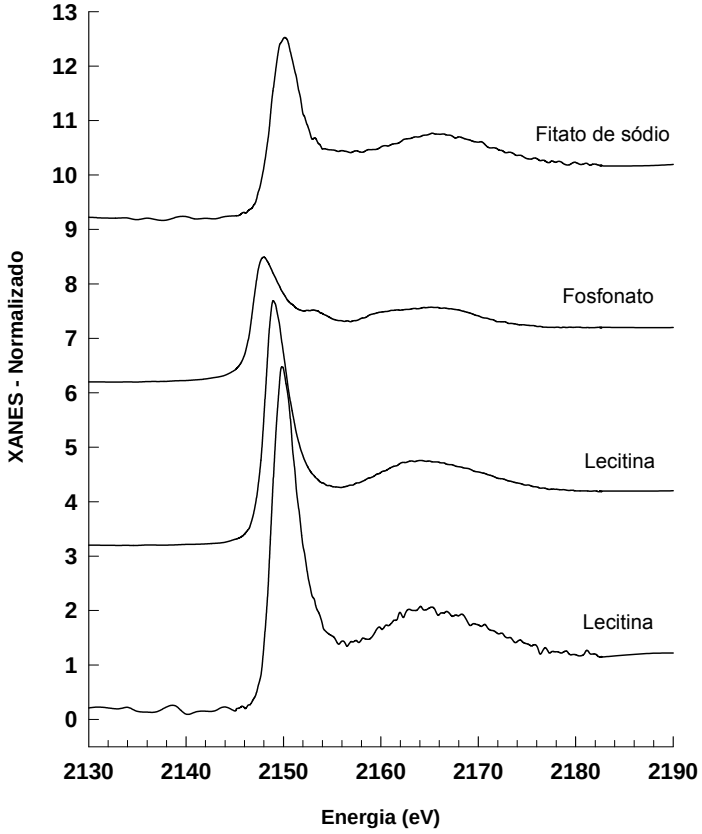

Figura 26 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo dos padrões em que o fósforo está em formas orgânicas e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear

2.3.3.2 Características espectrais e ajuste de combinação linear (LCF) das áreas em estudo

Os resultados que tratam da distribuição do P do solo associado ao alumínio (P-Al), ferro (P-Fe), cálcio (P-Ca) e a compostos orgânicos (P-orgânico) estão apresentados na tabela 6.

De maneira geral, os ajustes de combinação linear (LCF) indicaram a ampla predominância de P-Al e P-Fe, em relação ao P-Ca e P-orgânico, sobressaindo-se o P-Al com as maiores percentagens. A participação conjunta dessas duas formas de P no solo (P-Al e P-Fe) variou de 59 % (VN) a 74 % (5 anos). Nas demais áreas (8,12 e 18 anos) o percentual ficou em torno de 70 %. O P-Al variou de 39 % (5 anos) a 59 % (VN) enquanto que o P-Fe variou de 22 % (8 anos) a 35 % (5 anos). Não foi possível detectar em nenhum dos espectros das áreas estudadas (figuras 27, 28, 29, 30 e 31) picos na região da pré-borda de absorção. A não detecção desse pico indicou que nessas áreas ocorre a predominância de P associado ao Fe

em estádio de oxidação +2 e que a associação do P com o Fe está mais relacionada a fenômenos de adsorção do que a precipitação. Observou-se que o espectro da VN (figura 27) apresentou pico mais intenso, em relação aos picos das demais áreas (figuras 28, 29, 30 e 31), corroborando o resultado do LCF que mostrou que a VN apresenta mais P-Al do que as demais áreas.

Tabela 6 – Distribuição relativa do fósforo estimada por meio do ajuste de combinação linear (LCF) na camada 0-0,10 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico sob vegetação nativa de Cerrado (VN) e cultivado por 5, 8, 12 e 18 anos

Área	Fator R	X^2	SPP	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-orgânico
				%			
VN	0,011	3,239	1,086	59 ± 1	-	3 ± 4	38 ± 4
5 anos	0,002	0,020	1,003	39 ± 2	35 ± 2	10 ± 2	17 ± 2
8 anos	0,002	0,021	1,022	47 ± 2	22 ± 2	17 ± 2	14 ± 2
12 anos	0,003	0,027	0,996	43 ± 3	27 ± 3	11 ± 3	18 ± 3
18 anos	0,003	0,024	0,992	40 ± 2	30 ± 2	7 ± 2	23 ± 2

P-Al: fósforo associado ao alumínio; P-Fe: fósforo associado ao ferro; P-Ca: fósforo associado ao cálcio; P-orgânico: fósforo em formas orgânicas; Fator R: fator que indica a qualidade do ajuste; X^2: indica a qualidade do ajuste; SPP: soma dos pesos dos padrões utilizados no ajuste de combinação linear (LCF).

Numa terceira posição, após a ampla predominância observada para o P-Al e P-Fe, situou-se o P-orgânico, cuja participação variou de 14 % (8 anos) a 38 % (VN). Esse resultado apresenta comportamento semelhante ao do carbono orgânico total (tabela 2), no que diz respeito ao decréscimo dos seus teores com a conversão da área nativa para cultivo agrícola, o que reforça a associação entre o P-orgânico e o carbono orgânico total.

Com menor participação entre todas as formas de P do solo, o P-Ca variou de 3 % (VN) a 17 % (8 anos). Esses resultados indicaram que mesmo com as aplicações de calcário e fertilizante fosfatado, que favoreceram a formação de compostos entre o P e o Ca nas áreas cultivadas, as formas de P-Ca não aumentaram ao ponto de alcançar os valores apresentados para P-Al e P-Fe. Não foi possível observar a feição conhecida como ombro, em nenhum dos espectros das áreas estudadas (figuras 27, 28, 29, 30 e 31), indicando que nessas áreas as formas de Ca são predominantemente solúveis.

Segundo Lindsay (1979), o Al é um dos principais constituintes do solo e junto com o Fe são considerados como elementos que controlam a dinâmica do P em solos ácidos, onde o Ca não exerce papel preponderante.

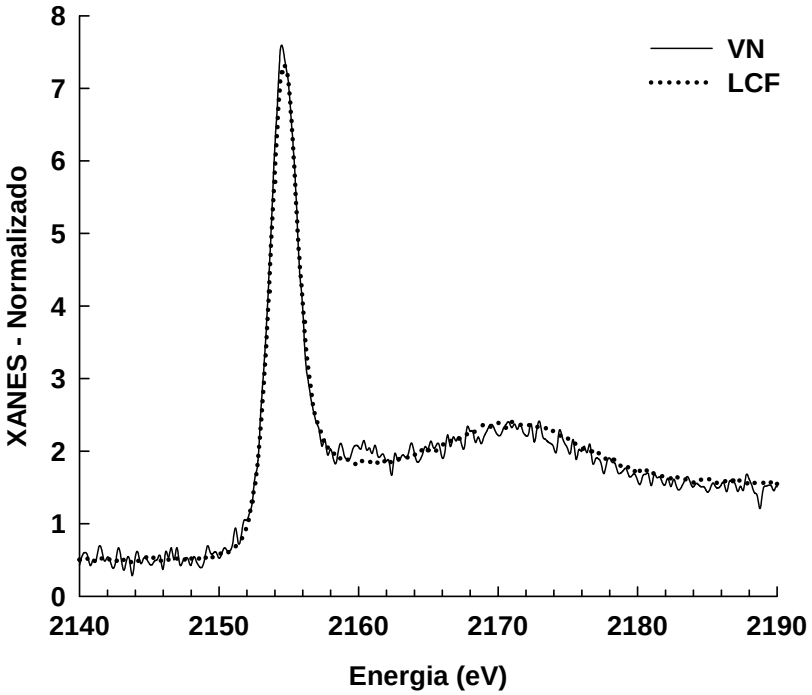

Figura 27 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo em solo sob vegetação nativa (VN) e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF)

Beauchemin et al. (2003), avaliando as formas de P em solos utilizados para cultivos agrícolas, observaram, nos solos ácidos estudados, que a soma do P-Al com o P-Fe correspondeu a 88 % no solo com pH 5,8 e 82 % no solo com pH 6,2, enquanto que o P-Ca correspondeu a 12 % no solo com pH 5,8 e 18 % no solo com pH 6,2 indicando, assim como no solo usado no presente estudo, a predominância de P-Al e P-Fe em solos ácidos.

Avaliando as formas de P em solos ácidos em cultivo mínimo por mais de 10 anos, Khatiwada et al. (2012) verificaram que o P-Al e o P-Fe corresponderam a 100 % do P do solo no tratamento controle. Após a aplicação de fertilizantes fosfatados houve também aumento no P-Ca.

Buscando avaliar as formas de P em solos ácidos explorados com diferentes culturas, Liu et al. (2013) observaram que de 62 a 71 % do P estava associado ao ferro, enquanto de 29 a 38 % estava associado ao alumínio.

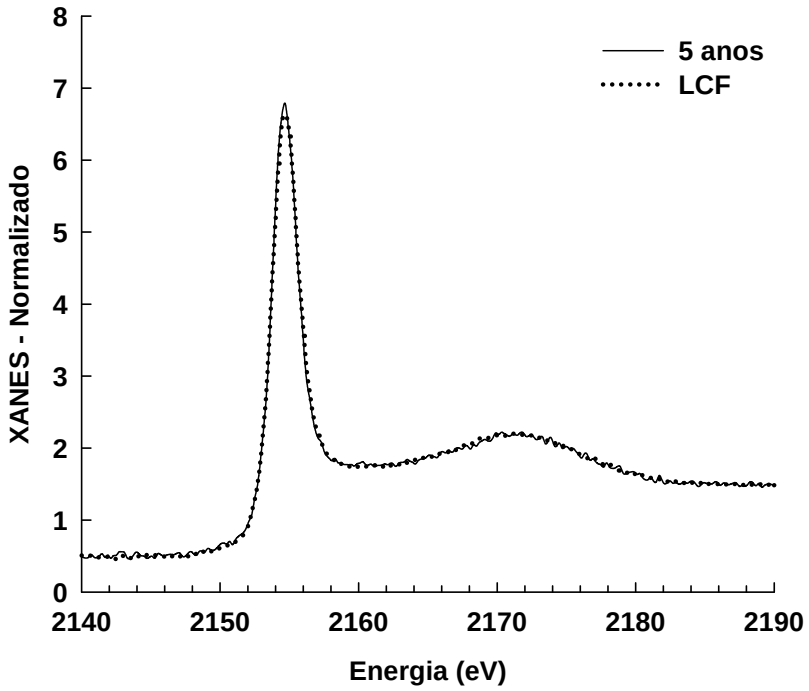

Figura 28 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo em solo cultivado por 5 anos e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF)

Na figura 27 estão apresentados os espectros referentes a área VN e ao seu LCF. O ruído observado no espectro da VN ocorreu devido à baixa concentração de P na amostra e resultou em menor qualidade do ajuste (X^2 = 3,239), quando comparado aos ajustes das demais áreas (X^2 = 0,020 a 0,027). Esse resultado indica que a concentração de P da amostra é um fator que poderia limitar a aplicação da técnica XANES em solos altamente desenvolvidos e naturalmente pobres em P, no ambiente tropical. Porém, o constante e rápido desenvolvimento que a técnica vem sofrendo nos últimos anos como, por exemplo, no sistema de detecção, tem reduzido essa limitação e permitido que as análises sejam realizadas com razoável sucesso. Observou-se que o espectro da VN apresentou uma parte que não foi coberta pelos padrões utilizados na faixa de energia entre 2150,8 a 2160,2 eV.

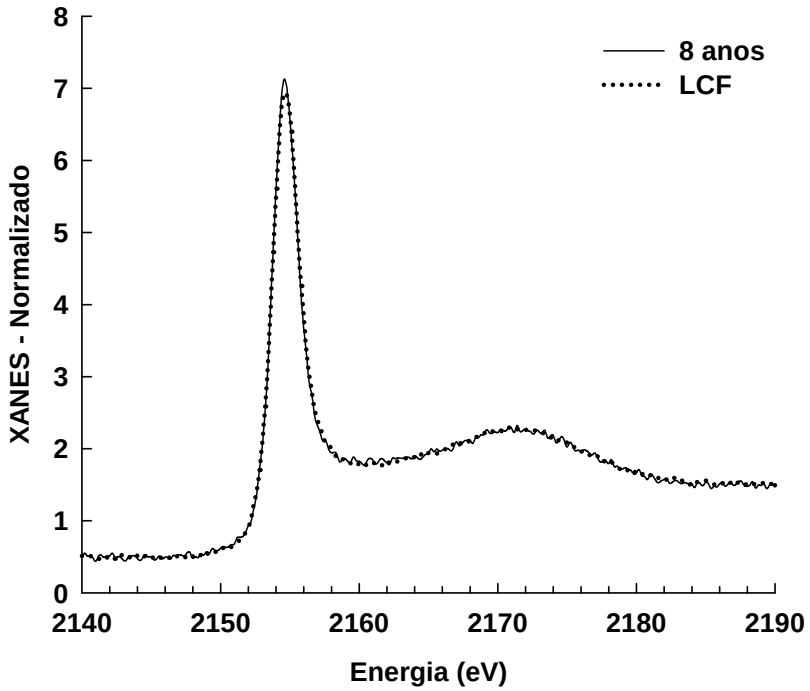

Figura 29 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo em solo cultivado por 8 anos e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF)

Em estudo conduzido por Lombi et al. (2006), também o solo do tratamento controle (onde não foi aplicado P) apresentou qualidade do ajuste (X^2 = 5,22) inferior à qualidade observada para o solo dos tratamentos que receberam fertilizante fosfatado (X^2 = 0,06 a 0,38). Buscando avaliar as formas de P em solos que receberam resíduos orgânicos e fertilizantes fosfatados, Ajiboye et al. (2008) observaram que as amostras que apresentavam menor teor de P apresentaram ruído mais evidente do que as amostras com maior quantidade de P. Os autores ressaltam que mais pesquisas devem ser desenvolvidas buscando aumentar a eficiência dos detectores. Tentando contornar essa limitação, Beauchemin et al. (2003) sugerem que a concentração das amostras por meio da separação das frações do solo pode ser uma alternativa para avaliação daquelas com baixo teor de P.

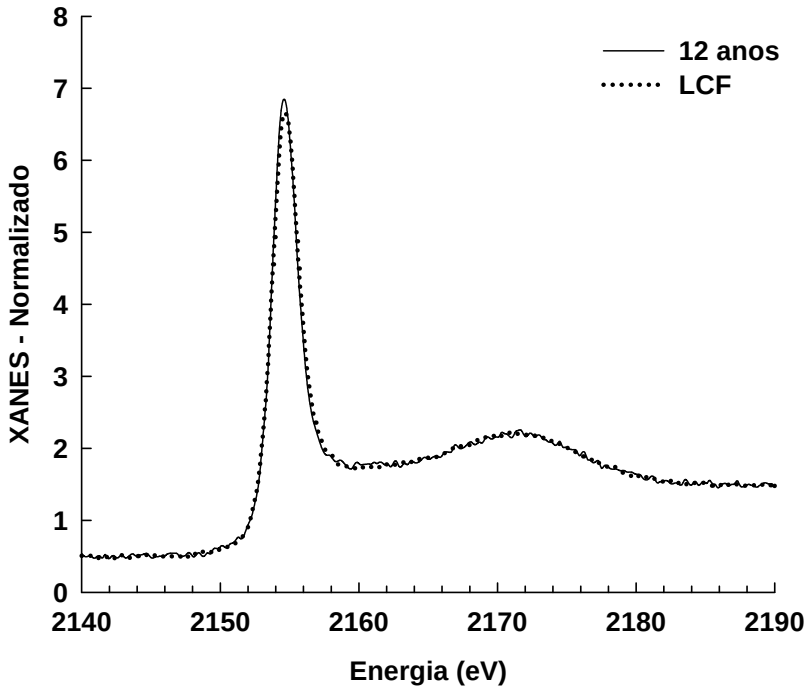

Figura 30 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo em solo cultivado por 12 anos e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF)

Para os espectros das demais áreas (5, 8, 12 e 18 anos) e seus respectivos LCF (figuras 28, 29, 30 e 31) foi possível observar baixo ruído e consequentemente maior qualidade do ajuste comparado ao ajuste da VN. O menor ruído está associado à maior quantidade de P nas amostras.

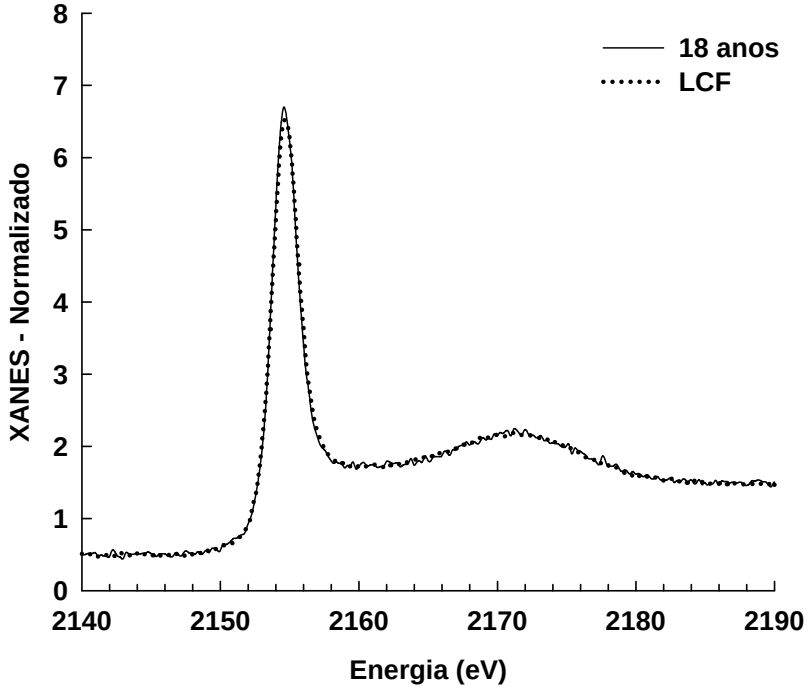

Figura 31 – Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure) obtidos na camada K do fósforo em solo cultivado por 18 anos e o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF)

2.3.3.3 Sumário interpretativo de XANES

A aplicação da técnica XANES evidenciou a seqüência P-Al > P-Fe > P-orgânico > P-Ca, perfeitamente compatível com a condição de solo ácido, altamente desenvolvido e pobre em P, que caracteriza o Latossolo de Cerrado do presente estudo.

A menor qualidade do ajuste da técnica XANES no solo da área VN decorreu da sua baixa concentração em P. De maneira inversa, nas áreas cultivadas, onde foram maiores os teores de P, a qualidade do ajuste foi melhor. Isto evidencia limitações, que não podem ser desconsideradas, no que diz respeito à aplicação da técnica em condições de baixas concentrações de P nas amostras.

A aplicação da técnica XANES evidenciou nas áreas cultivadas percentuais do P-Ca maiores do que o observado na área VN, refletindo a influência positiva dos aportes do calcário e fertilizante fosfatado sobre tais percentuais nas AC.

3 CONCLUSÕES

- Os teores de P no solo (principalmente nas formas lábeis e moderadamente lábeis e com maior expressão na camada de 0-0,10 m) foram sempre mais altos nas áreas cultivadas, em comparação às áreas com vegetação nativa, o que reflete o impacto das adubações fosfatadas em solos pobres em P, como os Latossolos sob vegetação de cerrado;
- As estreitas correlações entre o P extraído por Mehlich-1, o P extraído por meio da resina de troca iônica em esferas e o P extraído por meio da resina de troca iônica em laminas, indicam as suas equivalências como extratores para o fósforo disponível no solo do presente estudo. Contudo, os diferentes valores absolutos de P obtidos com cada extrator requerem o estabelecimento de níveis críticos e faixas de interpretação específicos a cada um deles;
- Ainda que nas áreas cultivadas tenham sido detectadas influências do P aplicado em superfície em até 0,40 m de profundidade, foram evidentes os menores teores da maioria das frações, em função do aprofundamento das amostragens, o que gerou nítidos gradientes de P no perfil do solo (redução do teor com o aumento da profundidade), principalmente para as frações lábeis e moderadamente lábeis;
- Os teores das frações orgânicas foram maiores em todas as camadas e situações de uso do solo, em comparação às correspondentes frações inorgânica (exceção para o P extraído com o bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1});
- As contribuições relativas das frações orgânicas na composição do fósforo total sobressaíram-se àquelas das frações inorgânicas;
- Em todas as camadas da área com vegetação nativa a participação relativa das frações não lábeis e residual no fósforo total superou a das frações lábeis e moderadamente lábeis. Tal predomínio cresceu com o aprofundamento das amostragens, alcançando o maior percentual na camada de 0,30-0,40 m;
- Nas camadas de 0-0,10 m das áreas cultivadas ocorreu o predomínio percentual das frações lábeis e moderadamente lábeis, o que reflete a influência positiva das adubações fosfatadas em superfície, sobre o percentual de formas de P mais disponíveis, nas proximidades da zona de

aplicação. Nas camadas mais profundas foi maior a participação relativa das frações não lábeis e residual;

- Os espectros de XANES revelaram-se apropriados à distinção de formas de fósforo no solo, em razão das feições únicas apresentadas para cada padrão avaliado;
- As formas de fósforo associado ao alumínio e ao ferro predominaram no solo de todas as áreas avaliadas, com destaque para as formas associadas ao alumínio;
- A associação de fósforo com ferro ocorreu predominantemente por meio de fenômenos de adsorção, em detrimento de fenômenos de precipitação.

REFERÊNCIAS

AB´SABER, A.N. **Os Domínios da natureza no Brasil**: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 159 p.

ADÁMOLI, J.; MACÊDO, J.; AZEVEDO, L.G.; MADEIRA NETTO, J. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, W.J. (Ed.). **Solos dos Cerrados**: tecnologias e estratégias de manejo. São Paulo: Nobel, 1987. p. 33-74.

AGUIAR, A.C.F.; CÂNDIDO, C.S.; CARVALHO, C.S.; MONROE, P.H.M.; MOURA, E.G. Organic matter fractions and pools of phosphorus as indicators of the impact of land use in the Amazonian periphery. **Ecological Indicators,** Philadelphia, v. 30, p. 158-164, 2013.

AJIBOYE, B.; AKINREMI, O.O.; HU, Y.; JURGENSEN, A. XANES speciation of phosphorus in organically amended and fertilized Vertisol and Mollisol. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 72, n. 5, p. 1256-1262, 2008.

ALLEONI, L.R.F.; FERNANDES, A.R.; CORREIA, B.L. Sequential extraction of phophorus in an Oxisol amended with biosolids in a long-term field experiment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment,** Philadelphia, v. 161, p. 145-151, 2012.

ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 27, p. 985-1002, 2003.

ALMEIDA NETO, J.X. de; BRASIL SOBRINHO, M.O.C. do. Fixação de fósforos em três solos sob cerrado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 1, n. 1, p. 12-15, 1977.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.

ALVIM, P.T.; ARAUJO, W.A. El Suelo como factor ecológico en el desarrolo de la vegetación en el centro-oeste del Brasil. **Turrialba,** San José, v. 2, n. 4, p. 153-160, 1952.

ALVIM, P.T.; SANTANA, C.J.L.; MIRANDA, E.R. de. Avaliação de fertilidade de alguns solos de cerrado em Brasília por meio de ensaios de microparcelas. **Ciência & Cultura,** Campinas, v. 20, p. 613-619, 1968.

ANGHINONI, I. Fertilidade do Solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 15, p. 873-928.

ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açucar. I. Intensidade e formas de acumulação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 17, p. 389-396, 1993.

ARAÚJO, M.S.B.; SCHAEFER, C.E.R.; SAMPAIO, E.V.S.B. Plant phosphorus availability in Latosols and Luvisols from northeastern semi-arid Brasil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis,** London, v. 34, n. 3/4, p. 407-425, 2003.

ARAÚJO, M.S.B.; SCHAEFER, C.E.R.; SAMPAIO, E.V.S.B. Frações de fósforo após extrações sucessivas com resina e incubação, em Latossolos e Luvissolos do semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 28, p. 259-268, 2004a.

_____. Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. **Geoderma,** Philadelphia, v. 119, p. 309-321, 2004b.

ARAI, Y.; SPARKS, D.L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: A multiscale approach. **Advances in Agronomy,** San Diego, v. 94, p. 135-179, 2007.

ASSIS, C.P.; OLIVEIRA, T.S.; DANTAS, J.N.; MENDONÇA, E.S. Organic matter and phosphorus fractions in irrigated agroecosystems in a semi-arid region of Notrheastern Brazil. **Agriculture, Ecossystems and Environment**, Amsterdam, v. 138, p. 74-82, 2010.

ASSOCIAÇÃO DE AGRICULTORES E IRRIGANTES DA BAHIA. **Anuário da Região Oeste da Bahia:** safra 2012/2013. Disponível em: <http://aiba.org.br/wp-content/uploads/2013/11/anuario_oeste_bahia_2013.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2014.

BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A.C. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos do planalto central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 7, n. 3, p. 221-226, 1983.

BARRETO, A.G.O.P.; BERNDES, G.; SPAROVEK, G.; WIRSENIUS, S. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975-2006 period. **Global Change Biology,** Oxford, v. 19, n. 6, p. 1804-1815, 2013.

BEAUCHEMIN, S.; HESTERBERG, H.; CHOU, J.; BEAUCHEMIN, M.; SIMARD, R.R.; SAYERS, D.E. Speciation of phosphorus in phosphorus-enriched agricultural soils using X-ray absorption near-edge strucuture spectroscopy and chemical fractionation. **Journal of Environmental Quality,** Madison, v. 32, n. 5, p. 1809-1819, 2003.

BECK, M.A.; SANCHEZ, P.A. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 34, p. 23-31, 1996.

_____. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 34, p. 1424-1431, 1994.

BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** 2. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. v. 1, 425 p.

BOWMAN, R.A.; COLE, C.V. An exploratory method for fractionation of orgmanic phosphorus from grassland soils. **Soil Science,** Philadelphia, v. 125, n. 2, p. 95-101, 1978.

BUSATO, J.G.; CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açucar por longo tempo. I – Fracionamento sequencial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 29, p. 935-944, 2005.

CARNEIRO, L.F.; RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; SANTOS, J.Z.L.; CURI, N.; REIS, T.H.P.; VALLE, L.A.R. Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 35, p. 483-491, 2011.

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

CONDRON, L.M.; GOH, K.M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 383-395, 1989.

CONDRON, L.M.; NEWMAN, S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractions of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments,** New York, v. 11, n. 5, p. 830-840, 2011.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 27, p. 893-900, 2003.

CORREIA, J.R.; REATTO, A.; SPERA, S.T. Solos e suas relações com o uso e manejo In: SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 29-61.

CROSS, A.N.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaloation of the Hedley fractionantion: applications to the biogeochemical cycles of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma,** Amsterdam, v. 64, p. 197-214, 1995.

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.

DOBERMANN, A.; GEORGE, T.; THEVS, N. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 66, p. 652-660, 2002.

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

FERNADES, L.A.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N. Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 37, n. 3, p. 373-383, 2002.

FREITAS, I.F. de; NOVAIS, R.F.; VILLANI, E.M.A.; NOVAIS, S.V. Phosphorus extracted by ion exchange resisns and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 37, p. 667-677, 2013.

GALVANI, R.; HOTTA, L.F.K.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus sources and fractions in an Oxisol under no-tilled soybean. **Scientia Agricola,** Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 415-421, 2008.

GALVÃO, S.R.S.; SALCEDO, I.H. Soil phosphorus fractions in sandy soils amended with cattle manure for long periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 33, p. 613-622, 2009.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231 p. Tese (Doutorado em Biodinâmica dos Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D.R. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 29, n. 3, p. 363-371, 2005.

GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: Usos e Limitações. In: ARAÚJO, A.P; ALVES, B.J.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 141-187.

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, p. 691-699, 2007.

GEBRIM, F.O.; NOVAIS, R.F.; SILVA, I.R. da; SCHULTHAIS, F.; VERGUTZ, L.; PROCÓPIO, L.C.; MOREIRA, F.F.; JESUS, G.L. de. Mobility of inorganic and organic phosphorus forms under different levels of phosphate and poultry litter fertilizantion in soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 34, p. 1195-1205, 2010.

GOEDERT, W.J. Região dos Cerrados: potencial agrícola e política para seu desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 24, n. 1, p. 1-17, 1989.

GONÇALVES, G.K.; MEURER, E.J. Frações de fósforo no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 33, p. 357-362, 2009.

GONÇALVES, J.L.M.; FIRME, D.J.; NOVAIS, R.F.; RIBEIRO, A.C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 9, n. 2, p. 107-111, 1985.

GONÇALVES, J.L.M.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; RIBEIRO, A.C. Cinética de transformação de fósforo-lábil em não-lábil, em solos de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 13, n. 1, p. 13-24, 1989.

GUARDINI, R.; COMIN, J.J.; SCHMITT, D.E.; TIECHER, T.; BENDER, M.A.; SANTOS, D.R.; MEZZARI, C.P.; OLIVEIRA, B.S.; GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G. Accumulation of phosphorus fractions in typic Hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep pig litter in a no-tillage system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems,** Dordrecht, v. 93, p. 215-225, 2012.

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.

HESTERBERG, D. Macroscale chemical properties and x-ray absorption spectroscopy of soil phosphorus. In: SINGH, B.; GRAFE, M. (Ed.). **Synchrotron-based techniques in soils and sediments.** Amsterdam: Elsevier B.V., 2010. p. 313-356.

HESTERBERG, D.; ZHOU, W.; HUTCHISON, K.J.; BEAUCHEMIN, S.; SAYERS, D.E. XAFS study of adsorbed and mineral forms of phosphate. **Journal of Synchrotron Radiation,** Copenhagen, v. 6, p. 636-638, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE:** contas nacionais trimestrais – indicadores de volume e valores correntes – julho/setembro 2013. Disponível em:<ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Nacionais/Contas_Nacionais_Trimestrais/Fasciculo_Indicadores_IBGE/pib-vol-val_201303caderno.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E OS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório técnico de monitoramento do desmatamento no bioma Cerrado, 2002 a 2008:** dados revisados. Disponível em: <http://siscom.ibama.gov.br/monitorabiomas/cerrado/Relatorio%20tecnico_Monitoramento%20Desmate_Bioma%20Cerrado_CSR_REV.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2014.

_____. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite:** monitoramento do bioma Cerrado 2009-2010. Disponível em: <http://siscom.ibama.gov.br/monitorabiomas/cerrado/RELATORIO%20FINAL_CERRADO_2010.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2014.

JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis**: advanced course. Madison: Prentice-Hall, 1979. 895 p.

JANEGITZ, M.C.; INOUE, B.S.; ROSOLEM, C.A. Formas de fósforo no solo após o cultivo de braquiária e tremoço branco. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 43, n. 8, p. 1381-1386, 2013.

KELLY, S.D.; HESTERBERG, D.; RAVEL, B. Analysis of soil and minerals using x-ray absorption spectroscopy. In: ULERY, A.L.; DREES, L.R. (Ed.). **Methods of soil analysis.** Madison: Soil Science Society of America, 2008. pt. 5: Mineralogical methods, p. 387-463.

KER, J.C. **Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil**.1995. 181 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

KHARE, N.; HESTERBERG, D.; BEAUCHEMIN, S.; WANG, S. XANES determination of adsorbed phosphate distribution between ferrihydrite and boehmite in mixtures. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 68, p. 460-469, 2004.

KHATIWADA, R.; HETTIARACHCHI, G.M.; MENGEL, D.B.; FEI, M. Speciation of phosphorus in a fertilized, reduced-till soil system: In-field treatment incubation study. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 76, n. 6, p. 2006-2018, 2012.

KIZEWSKI, F.; LIU, Y.; MORRIS, A.; HESTERBERG, D. Spectroscopic approaches for phosphorus speciation in soils and other environmental systems. **Journal of Environmental Quality,** Madison, v. 40, n. 3, p. 751-766, 2011.

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 of reactive Arad phosphate rock in Oxisol with different land use histories. **African Journal of Agricultural Research,** Nigeria, v. 8, n. 26, p. 3454-3461, 2013.

LEAL, J.R.; VELLOSO, A.C.X. Adsorção de fosfato em Latossolos sob vegetação de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** série agronomia, Brasília, v. 8, p. 81-88, 1973.

LEVY, E.T.; SCHLESINGER, W.H. A comparison of freactionation methods for forms of phosphorus in soils. **Biogeochemistry,** Dordrecht, v. 47, p. 25-38, 1999.

LILIENFEIN, J.; WILCKE, W.; AYARZA, M.A.; VILELA, L.; LIMA, S.C.; ZECH, W. Chemical fractionation of phosphorus, sulfur, and molybdenum in Brazilian savannah Oxisols under different land use. **Geoderma,** Philadelphia, v. 96, p. 31-46, 2000.

LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils.** New York: Wiley-Interscience, 1979. 449 p.

LIU, J.; CADE-MENUN, B.J.; LIANG, X.; HU, Y.; LIU, C.W.; ZHAO, Y.; LI, L.; SHI, J. Complementary phosphorus speciation in agricultural soils by sequential fractionation, solution ^{31}P nuclear magnetic resonance, and phosphorus K-edge X-ray absorption near edge structure spectroscopy. **Journal oe Environmental Quality,** Madison, v. 42, n. 6, p. 1763-1770, 2013.

LOMBI, E.; SUSINI, J. Synchtron-based techniques for plant and soil science: opportunities, challenges and future perspectives. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 320, n. 1/2, p. 1-35, 2009.

LOMBI, E.; HETTIARACHCHI, G.M.; SCHECKEL, K.G. Advanced in situ spectroscopic techniques and their application in environmental biogeochemistry: introduction to the special section. **Journal of Environmental Quality,** Madison, v. 40, n. 3, p. 659-666, 2011.

LOPES, A.S.; COX, F.R. A survey of the fertility status of surface soils under “Cerrado” vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 4, p. 742-747, 1977.

LOPES, A.S.; COX, F.R. Relação de características físicas, químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, n. 2, p. 82-88, 1979.

LOPES, A.S. **Solos sob Cerrado**: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Potafos, 1983. 162 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. (Ed.). **Avaliação do estado nutricional das plantas:** princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MALAVOLTA. E.; CROCOMO, O.J.; ANDRADE, R.G. de; ALVIZURI, C.; VENCOWSKY, R.; FREITAS. L.M.M. de. Estudos sobre a fertilidade dos solos do cerrado. I. Efeito da calagem na disponibilidade do fósforo (Nota prévia). **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”,** Piracicaba, v. 22, p. 131-138, 1965.

MATIAS, M.C.B.; SALVIANO, A.A.C.; LEITE, L.F.C.; GALVÃO, S.R.S. Propriedades químicas em Latossolo Amarelo de Cerrado do Piauí sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Agronomica,** Fortaleza, v. 40, n. 3, p. 356-362, 2009.

McCLUNG, A.C.; FREITAS, L.M.M. de; MIKKELSEN, D.S.; LOTT, W.L. **A adubação do algodoeiro em solos de campo no estado de São Paulo.** New York: IBEC Research Institute, 1961. 35 p. (Boletim, 27).
McCLUNG, A.C.; MARTINS de FREITAS, L.M.; ROMANO GALLO, J.; QUINN, L.RL; MOTT, G.O. Alguns estudos preliminares sobre possíveis problemas de fertilidade, em solos de diferentes campos cerrados de São Paulo e Goiás. **Bragantia,** Campinas, v. 17, n. 3, p. 29-34, 1958.

MENDONÇA, E.S.; MATOS, E.S. **Matéria orgânica do solo**: métodos de análises. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 107 p.

MIKKELSEN, D.S.; FREITAS, L.M.M. de; McCLUNG, A.C. **Efeitos da calagem e adubação na produção de algodão, milho e soja em três solos de campo cerrado.** São Paulo: Instituto de Pesquisas IRI, 1963. 48 p. (Boletim, 29).

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

MOREIRA, J.F.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; LEAL, P.G.L. Efeito do tempo de contato do fósforo com o solo sobre sua disponibilidade para mudas de eucalipto, **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 15, n. 3, p. 303-308, 1991.

MOTTA, P.E.F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; RAIJ, B. van; FURTINI NETO, A.E.; LIMA, J.M. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 26, p. 349-359, 2002.

MURAOKA, T. Avaliação dos teores totais de zinco e manganês do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Campinas, v. 8, p. 155-158, 1984.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionantion reflect impact of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science,** New York, v. 172, p. 305-325, 2009.

NEPTUNE, A.M.L.; MURAOKA, T.; STEWART, J.W.B. Efficiency of fertilizer phosphorus utilization by common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Carioca. under different methods of aplaying phosphatic fertilizer. **Turrialba,** San Jose, v. 29, n. 1, p. 29-34, 1979.

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

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

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. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.

OBERSON, A.; FRIESEN, D.K.; RAO, I.M.; BU¨ HLER, S.; FROSSARD, E. Phosphorus transformations in an Oxisol under contrasting land-use systems: the role of the soil microbial biomass. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 237, p. 197–210, 2001.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.;ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. da. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 393-486.

PARTELLI, F.L.; BUSATO, J.G.; VIEIRA, H.D.; VIANA, A.P.; CANELLAS, L.P. Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 2065-2072, 2009.

PAVINATO, P.S.; DAO, T.H.; ROSOLEM, C.A. Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. **Geoderma,** Amsterdam, v. 156, p. 207-215, 2010.

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research,** Amsterdam, v. 105, p. 149-155, 2009.

PEREIRA, G.; AGUIAR, J.L.; MOREIRA, L.; BEZERRA, H.S. Área e população do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 32, n. 7, p. 759-763, 1997.

PEREIRA, P.A.A.; MARTHA Jr, G.B.; SANTANA, C.A.M.; ALVES, E. The development of Brazilian agriculture: future technological challenges and opportunities. **Agriculture and Food Security**, London, v. 1, n. 4, p. 1-12, 2012.

RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Campinas, v. 2, n. 1, p. 1-9, 1978.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico, 1997. 285 p. (IAC. Boletim, 100).

RAVEL, B.; NEWVILLE, M. ATHENA, ARTEMIS, HEPHAESTUS: Data analysis for X-ray absorption spectroscopy using IFEFFIT. **Journal of Synchrotron Radiation,** Copenhagen, v. 12, n. 2, p. 537-541, 2005.

REIS, T.H.P.; GUIMARÃES, P.T.G.; FURTINI NETO, A.E.; GUERRA, A.F.; CURI, N. Soil phosphorus dynamics and availability and irrigated coffee yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 35, p. 503-512, 2011.

RESENDE, J.C.F.; MARKEWITZ, D.; KLINK, C.A.; BUSTAMANTE, M.M.C.; DAVIDSON, E.A. Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequent burning. **Biogeochemistry,** Dordrecht, v. 105, n. 1/3, p. 105-118, 2011.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 151-160, 2001.

_____. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 2339-2354, 2003.

RODRIGUES, M. **Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos de Cerrado**. 2013. 113 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

ROLIM, M.V.; NOVAIS, R.F.; NUNES, F.N.; ALVAREZ V., V.H. Efeito da moagem do solo no teor de fósforo disponível por Mehlich-1, resina em esferas e em lâmina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 32, p. 1181-1190, 2008.

ROSEMARIN, A.; BRUIJNE, I.; CALDWELL, I. The next inconvenient truth – peak phosphorus. **The Broker**, Stolcomo, v. 3, n. 15, p. 6-9, 2009.

RUCKAMP, D.; AMELUNG, W.; THEISZ, N.; BANDEIRA, A.G.; MARTIUS, C. Phosphorus forms in Brazilian termite nests and soils: Relevance of feeding guild and ecosystems. **Geoderma,** Amsterdam, v. 155, p. 269-279, 2010.

SANO, E.E.; ROSA, R.; BRITO, J.L.S.; FERREIRA, L.G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do bioma cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 153-156, 2008.

_____. Land cover mapping of the tropical savana region in Brasil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Netherlands, v. 166, p. 113-124, 2010.

SANO, E.E.; SANTOS, C.C.M. dos; SILVA, E.M.; CHAVES, J.M. Fronteira agrícola do oeste baiano: considerações sobre os aspectos temporais e ambientais. **Geociências,** São Paulo, v. 30, n. 3, p. 479-489, 2011.

SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

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 fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 32, p. 705-714, 2008.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT software version 9.2**. Cary, 2008.
SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 611-617, 2000.

SCHMITT, D.E.; COMIN, J.J.; CERETTA, C.A.; GATIBONI, L.C.; TIECHER, T.; LORENSINI, F.; HEIZEN, J.; AMBROSINI, V.G.; MORAES, M.T.; BRUNETTO, G. Accumulation of phosphorus fractions and contamination potential in vineyard soils in the southern region of the state of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 37, p. 1256-1266, 2013a.

SCHMITT, D.E.; COMIN, J.J.; GATIBONI, L.C.; TIECHER, T.; LORENSINI, F.; MELO, G.W.B.; GIROTTO, E.; GUARDINI, R.; HEINZEN, J.; BRUNETTO, G. Phosphorus fractions in sandy soils of vineyards in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 37, p. 472-481, 2013b.

SCHONINGER, E.L.; GATIBONI, L.C.; ERNANI, P.R. Rizhosphere pH and phosphorus forms in an Oxisol cultivated with soybean, brachiaria grass, millet and sorghum. **Scientia Agricola,** Piracicaba, v. 69, n. 4, p. 259-264, 2012.

SELLES, F.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil & Tillage Research,** Amsterdam, v. 44, p. 23-34, 1997.

SILVA, F.C. da; ABREU, M.F. de; PÉREZ, D.V.; EIRA, P.A da; ABREU, C.A. de; RAIJ, B. van; GIANELLO, C.; COELHO, A.M.; QUAGGIO, J.A.; TEDESCO, M.J.; SILVA, C.A.; CANTARELLA, H.; BARRETO, W.O. Métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. In: SILVA, F.C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p. 107-189.

SILVA, M.A.; NÓBREGA, J.C.A.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; MARQUES, J.J.G.S.M.; MOTTA, P.E.F. Frações de fósforo em Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 38, n. 10, p. 1197-1207, 2003.

SILVA, W.M.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; KURIHARA, C.H.; MAEDA, S.; HERNANI, L.C. Eficiência de extratores de fósforo em dois Latossolos do Mato Grosso do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 34, n. 12, p. 2277-2285, 1999.

SILVEIRA, M.M.L.; ARAÚJO, M.S.B.; SAMPAIO, E.V.S.B. Distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do semi-árido da Paraíba e de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 30, p. 281-291, 2006.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2004. 416 p.

SOUZA, R.F.; FAQUIN, V.; ANDRADE, A.T.; TORRES, P.R.F. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 31, p. 1535-1544, 2007.

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.

SPAGNOLO, T.F.O.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; MARTINS, E.S.; COUTO JÚNIOR, A.F. Dinâmica da expansão agrícola do município de São Desidério-BA entre os anos de 1984 a 2008, importante produtor nacional de soja, algodão e milho. **Geo UERJ,** Rio de Janeiro, v. 2, n. 23, p. 603-618, 2012.

STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. **Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. 2nd ed. New York: Wiley, 1999. 427 p.

STEWART, W.M.; DIBB, D.W.; JOHNSTON, A.E.; SMYTH, T.J. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 1, p. 1-6, 2005.

SYERS, J.K.; EVANS, T.D.; WILLIAMS, J.D.H.; MURDOCK, J.T. Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science,** Baltimore, v. 112, p. 267-275, 1971.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, p. 271–281. 2012.

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

TIESSEN, H.; MOIR, J.O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R.; GREGORICH, E.G. (Ed.). **Soil sampling and method of analysis.** Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 293-306.

TIESSEN, H.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifiting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment,** Amsterdam, v. 38, p. 139-151, 1992.

TOKURA, A.M.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C.H.; ALOVISI, A.A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 37, n. 10, p. 1467-1476, 2002.

TOKURA, A.M.; FURTINI NETO, A.E.; CARNEIRO, L.F.; CURI, N.; SANTOS, J.Z.L.; ALOVISI, A.A. Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum. Agronomy,** Maringá, v. 33, n. 1, p. 171-179, 2011.

TOSELLO, A. **De grão em grão o cerrado perde espaço:** Cerrado impactos no processo de ocupação. Brasília: WWF/PRO-CER Base de Dados Tropicais - BDT, 2000. 66 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Methods of chemical analysis for water and wastes.** Cincinnati, 1971. 491 p.

VALLADARES. G.S. **Caracterização dos solos e classes de terra para irrigação do Oeste da Bahia.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2002. 34 p.

VOLKWEISS, S.J.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 1977, Belo Horizonte. Belo Horizonte: Ed. Itatiaia, 1977. p. 317-332.

XAVIER, F.A.S.; ALMEIDA, E.F.; CARDOSO, I.M.; MENDONÇA, E.S. Soil phosphorus distribution in sequentially extracted fractions in tropical coffee-agroecosystems in the Atlantic Forest biome, Southeastern Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems,** Dordrecht, v. 89, p. 31-44, 2011.

XAVIER, F.A.S.; OLIVEIRA, T.S.; ANDRADE, F.V.; MENDONÇA, E.S. Phosphorus fractionation in a Sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil. **Geoderma,** Philadelphia, v. 151, p. 417-423, 2009.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.