**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Influência de plantas de cobertura e fertilizantes fosfatados nas frações de
fósforo e nos atributos químicos do solo**

Ana Paula Bettoni Teles

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

**Piracicaba
2014**

Ana Paula Bettoni Teles
Engenheira Agrônoma

Influência de plantas de cobertura e fertilizantes fosfatados nas frações de fósforo e nos atributos químicos do solo

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO SÉRGIO PAVINATO**

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

Piracicaba
2014

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

Teles, Ana Paula Bettoni

Influência de plantas de cobertura e fertilizantes fosfatados nas frações de fósforo e nos atributos químicos do solo / Ana Paula Bettoni Teles. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.
76 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Superfosfato simples 2. Fosfato natural 3. Fracionamento de fósforo 4. Labilidade
I. Título

CDD 631.41
T269i

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

DEDICO

***À minha vó Olga (In Memoriam),**
por seu exemplo de vida e superação.*

***Aos meus pais, Luiz e Maria,**
pela minha educação e formação humana,
pelo amor incondicional que sempre dedicaram a mim
e pelo apoio em todos os momentos da minha vida.*

***Aos meus irmãos, Beto e João Paulo,**
por estarem sempre ao meu lado,
dividindo comigo todos os momentos
da minha vida, bons e ruins.*

***Aos meus sobrinhos, Helena, Caio e Lívia,**
que, com seus sorrisos inocentes,
me ensinaram que vale a pena sempre seguir em frente,
sem nunca pensar em desistir.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais, Luiz Teles e Maria Bettoni Teles, pela compreensão e dedicação que sempre tiveram comigo e por sempre me encorajarem na luta pelos meus ideais.

Aos meus irmãos Luiz Alberto Teles e João Paulo Teles, e sobrinhos, Helena, Caio e Livia, que sempre torceram pelas minhas conquistas.

Ao meu orientador, Prof.º Dr. Paulo Sérgio Pavinato, pelo apoio, pela atenção, pelos conselhos, pela dedicação, pela paciência e pelos ensinamentos durante a realização deste trabalho.

Ao Prof.º Dr. João Aguilar Massaroto, meu ex-orientador da graduação e hoje amigo, pela recomendação e incentivo para dar esse passo a frente na minha carreira profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, professores, em especial ao Prof.º Dr. Antonio Carlos Azevedo, e funcionários, que contribuíram para minha formação, dedicando-se com paciência e sabedoria.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa estudos, que fez com que fosse possível a realização do mestrado.

Em especial, ao Marcos Rodrigues, Wilfrand Bejarano e Marta Arruda que contribuíram efetivamente para a realização das minhas análises.

Aos bolsistas de iniciação científica e estagiários, Tobias, Nathanael, Virgilio, Gabriel e Daiane, que me auxiliaram na condução do projeto.

À todos os meus amigos, os de longe e os de perto, por fazerem parte da minha história, mas principalmente aos amigos, colegas e companheiros de pós-graduação, Lucas, Carlos Antonio, Hélio Henrique, Flávio Henrique, Bruna, José Carlos, Ana Carolina, Valdevan, Emanuel, Hugo, Ioná, Renata, Arnon, e tantos outros, pelos momentos compartilhados em grupo que, com certeza, fizeram com que a vida no mestrado se tornasse mais leve.

Ao Raul Alfonso Filho, por todo apoio e incentivo durante o período de tomada de decisões e mudanças.

Enfim, à todos que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização de mais este projeto, o meu muito obrigada!

EPÍGRAFE

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

(Simone de Beauvoir)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Importância do P para as plantas	17
2.2 Plantas de cobertura.....	17
2.3 Mecanismos de plantas para aquisição de P dos solos	19
2.4 Formas e dinâmica do P no solo	21
2.5 Fertilizantes fosfatados	23
2.6 Fracionamento de P	24
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 Descrição da área experimental	27
3.2 Delineamento experimental e tratamentos	27
3.3 Condução do experimento	27
3.4 Caracterização do solo avaliado	28
3.5 Atributos avaliados	31
3.5.1 Fracionamento do fósforo.....	32
3.5.2 Análises químicas do solo	32
3.6 Análise estatística	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Frações de P no solo	35
4.2 Teor de P total no solo.....	53
4.3 Distribuição das frações de P de acordo com a labilidade	55
4.4 Atributos químicos do solo.....	60
5 CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS	71

RESUMO

Influência de plantas de cobertura e fertilizantes fosfatados nas frações de fósforo e nos atributos químicos do solo

As plantas de cobertura podem desenvolver diferentes mecanismos para absorver e solubilizar o fósforo proveniente do solo, especialmente em ambientes com baixa disponibilidade, melhorando também o aproveitamento do P aplicado via fertilizante. Assim, o objetivo deste trabalho foi de avaliar as alterações na disponibilidade e nas frações que o P se encontra no solo, e nos atributos químicos do solo, sob cultivos de plantas de cobertura no inverno, associadas ao efeito residual da adubação fosfatada solúvel e de baixa solubilidade aplicada no cultivo de verão. O experimento foi conduzido com seis plantas de cobertura (ervilhaca - *Vicia sativa*, tremço branco - *Lupinus albus*, nabo forrageiro - *Raphanus sativus*, azevém - *Lolium multiflorum*, aveia preta - *Avena strigosa*, trevo branco - *Trifolium repens*) mais o pousio e duas fontes de fertilizantes fosfatados (Fosfato Natural - FN e Superfosfato Simples - SPS) mais o controle (sem P), com o cultivo de milho no verão, durante três anos. O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados com parcelas subdivididas, em esquema fatorial 7 x 3, com três repetições. As fontes de fertilizantes fosfatados constituíram as parcelas e as espécies de plantas de cobertura, as subparcelas. Após o cultivo das plantas de cobertura, no primeiro e terceiro ano, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, para análise das frações de P no solo, através da técnica de fracionamento, e dos atributos químicos do solo (pH, acidez potencial, cálcio, magnésio e potássio). Os resultados do fracionamento de P mostraram que, tanto as frações lábeis quanto as frações de menor labilidade não foram ou foram pouco influenciadas pelas plantas de cobertura, durante os três anos de cultivo. A aplicação de fertilizantes fosfatados promoveu acúmulo de P no solo, principalmente, nas frações de baixa labilidade. Observou-se também que, ao longo do tempo, independente do tratamento, ocorreu aumento dos teores de P no solo nas formas lábeis e não-lábeis, e diminuição das formas moderadamente lábeis, em todas as camadas. De modo geral, não foi observado efeito significativo das plantas de cobertura sobre os atributos químicos do solo no presente estudo.

Palavras-chave: Superfosfato simples; Fosfato natural; Fracionamento de fósforo; Labilidade

ABSTRACT

Influence of cover crops and phosphate fertilizer sources on soil phosphorus fractions and chemical attributes

The cover crops can develop different mechanisms to uptake and solubilize soil phosphorus, especially in environments with low availability, also improving the use of P from fertilizers. Thus, the aim of this study was to evaluate changes in P availability and P fractions in soil, and soil chemical attributes, under cultivation of winter cover crop, associated with the residual effect of high and low solubility phosphate fertilization applied in the summer crop. The experiment was composed of six cover crops (vetch - *Vicia sativa*, white lupin - *Lupinus albus*, radish - *Raphanus sativus*, ryegrass - *Lolium multiflorum*, black oat - *Avena strigosa*, white clover - *Trifolium repens*) plus a fallow, and two sources of phosphate fertilizers (Rock Phosphate-FN and Simple Superphosphate-SPS) plus a control without P, with the cultivation of maize in summer for three consecutive years. The experimental design used was a split plot distributed in randomized blocks, in a factorial scheme of 7 x 3 with three replications. Phosphate fertilizer sources constituted the plot and cover crop species was the subplot. After the cultivation of cover crops in the first and third year, soil samples were collected in layers of 0-5, 5-10 and 10-20 cm, for analysis of P fractions in the soil, through the technique of fractionation, and chemical attributes of the soil (pH, potential acidity, calcium, magnesium and potassium). The results of the P fractionation showed that both labile and lower lability fractions were not or little influenced by cover crops during the three years of cultivation. The application of phosphate fertilizers promoted accumulation of P in the soil, especially in less labile fractions. Also it was observed that, over time, regardless of treatment, the levels of P in soil in the labile and non-labile fractions increased, and moderately labile fractions decreased, in all the depth layers. Generally, it was not observed significant effect of cover crops on the chemical soil attributes on this study.

Keywords: Simple Superphosphate; Rock Phosphate; Phosphorus fractionation; Lability

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P), por ser um elemento que sofre várias interações com o solo, ficando pouco solúvel principalmente em solos tropicais muito intemperizados, o que o torna um nutriente limitante para o desenvolvimento das plantas e faz com que a produção de alimentos fique altamente dependente do uso de fertilizantes fosfatados, especialmente de fontes solúveis. Na busca pela redução na quantidade recomendada de adubos fosfatados e o seu melhor aproveitamento, surgem cada vez mais pesquisas avançadas no objetivo de entender a dinâmica do P no solo e sua disponibilidade para as plantas.

O cultivo de plantas de cobertura nos intervalos entre as culturas anuais de grãos é uma alternativa para melhorar o aproveitamento desses fertilizantes, isso porque as plantas têm diferentes potenciais de absorção de P do solo e apresentam meios específicos de solubilizar este nutriente, especialmente em ambientes com baixa disponibilidade, seja pela modificação na solubilização, na adsorção ou na difusão do nutriente no solo. Estas estratégias podem se manifestar, entre outras formas, pela maior relação raiz e parte aérea, pelo aumento da superfície radicular, pela maior taxa de absorção por unidade de raiz e pelo aumento da exsudação radicular de fosfatases e ácidos orgânicos (LAJTHA; HARRISON, 1995). Além disso, o P que é acumulado no tecido vegetal dessas plantas é liberado, através da decomposição dos resíduos orgânicos, para a cultura sucessora, já que o material vegetal dessas plantas permanece sobre o solo.

A exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes de plantas de cobertura tem sido foco de muitos estudos nos últimos anos. Isso porque esses ácidos tem a capacidade de interagir com a fase sólida do solo, ocupando sítios de adsorção do fosfato, possibilitando, assim, que o P fique mais disponível em solução. Porém, a eficiência desses ácidos em melhorar a solubilidade de P depende do tipo de ácido orgânico exsudado, da sua permanência no solo e do pH do solo. Os grupos funcionais de compostos da matéria orgânica são dependentes do pH, assim, a maioria dos ácidos orgânicos apresentam caráter aniônico (cargas negativas) em pH superior a 3,5 (valor de PCZ) devido à dissociação do H^+ , isso explica a razão de os ácidos orgânicos e o P poderem competir pelos mesmos sítios de adsorção do solo. Outro fator que é levado em consideração sobre os ácidos orgânicos nesses estudos é que eles também são capazes de formar complexos organometálicos estáveis com Fe e Al, numa larga amplitude de pH do solo (pH 4,0-7,0), o que diminui a precipitação do P com esses elementos na solução do solo (SPOSITO, 1989).

As aplicações de fertilizantes fosfatados no solo, em geral, são muito além das quantidades de P exigidas pelas plantas, assim o solo atua como dreno do P aplicado. A solubilidade desse fosfato aplicado, aliada ao tipo de solo, ao manejo utilizado e às espécies cultivadas, alteram a dinâmica do P no solo, promovendo acúmulo desse nutriente em diversas formas. Uma ferramenta que tem sido usada para identificar as formas preferenciais com que o P é retido no solo, sua ocorrência e magnitude com que contribuem para a capacidade de suprimento de P às plantas, é o fracionamento de P (GATIBONI, 2003). No Brasil, tem sido mais utilizado o método de fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982). Essa técnica usa extratores químicos aplicados sequencialmente em uma mesma amostra, para remoção progressiva das frações mais disponíveis até as mais estáveis de P inorgânico e orgânico.

Sabendo-se, então, que a adsorção de P nos solos é alta, especialmente nos que contêm frações minerais relativamente finas, com alto teor de argila e óxidos de ferro e alumínio, e também que as plantas de cobertura têm diferentes potenciais de absorção de P, apresentando meios específicos de solubilizá-lo para melhorar sua absorção, o objetivo principal deste trabalho foi de avaliar as alterações na disponibilidade e nas frações que o P se encontra no solo, e nos atributos químicos do solo, sob cultivos de plantas de cobertura no inverno, associadas ao efeito residual da adubação fosfatada solúvel e de baixa solubilidade aplicada no cultivo de verão.

A hipótese testada é de que o uso de espécies de plantas de cobertura em um sistema de rotação de culturas promove melhor exploração do P tanto do aplicado via fertilizantes quanto do já presente no solo, por meio do aumento da superfície radicular e dos exsudados radiculares, aumentando, assim, as frações mais solúveis deste nutriente no solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância do P para as plantas

O P é o macronutriente exigido em menor quantidade pelas plantas (RAIJ, 1991), porém, é considerado um dos nutrientes que mais limita a produtividade agrícola. As plantas absorvem o P do solo nas formas iônicas H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} (ortofosfatos), sendo que a absorção de um ou de outro é dependente do pH do solo (HAVLIN et al., 2005). Segundo Novais, Smyth e Nunes (2007), a concentração de P nas plantas varia de 0,5 a 3,0 g kg⁻¹ de matéria seca, e os teores adequados para um bom desenvolvimento estão na faixa entre 1,0 a 1,5 g kg⁻¹.

Após ser absorvido da solução do solo pelas raízes das plantas, o fosfato é incorporado em uma variedade de compostos orgânicos (açúcares-fosfatos, fosfolipídios, nucleotídeos, entre outros), e participa de processos importantes na planta, tais como fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia (componente da ATP), divisão celular, etc. O P também está envolvido na transferência de características hereditárias e em processos que promovem rápida formação de raízes, melhoria da qualidade dos frutos, hortaliças e grãos, além de ser vital à formação da semente (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Dentro da planta, ao contrário do que ocorre no solo, o fosfato é altamente móvel e pode ser translocado em direção ascendente ou descendente. Assim, em situação de déficit, ocorre transferência do P dos tecidos mais velhos para os mais jovens e os sintomas de deficiência aparecem primeiramente nas partes baixas e mais velhas da planta (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

2.2 Plantas de cobertura

A adoção do cultivo de plantas de cobertura tem recebido grande atenção, devido as suas contribuições para a diminuição da acidez do solo e por suas diferentes habilidades de se estabelecerem em solos com baixos níveis de fertilidade. Essas plantas de cobertura são normalmente cultivadas visando à produção de fitomassa e, conseqüentemente, a ciclagem de nutrientes, sendo seus resíduos mantidos na superfície do solo para a formação de cobertura morta, o que contribui para aumentar a eficiência do sistema plantio direto (NOLLA; ANGHINONI, 2006).

Algumas leguminosas são muito utilizadas como cobertura do solo, principalmente no período de inverno na região sul do Brasil, entre elas podemos citar a ervilhaca (*Vicia sativa* L.), o tremoço branco (*Lupinus albus*) e o trevo branco (*Trifolium repens*). Estas plantas possuem sistema radicular profundo e ramificado e têm a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, melhorando a fertilidade do solo. Algumas gramíneas também são cultivadas como cobertura do solo, elas possuem raízes do tipo fasciculada, pequenas e em grande número, sendo que sua formação fibrosa facilita a penetração no solo (BOTREL, 1983). O azevém (*Lolium multiflorum*) e aveia preta (*Avena strigosa*) são exemplos de plantas desta família utilizadas como cobertura do solo no inverno.

Amaral, Anghinoni e Deschamps (2004), estudando o efeito dos resíduos de plantas de cobertura na redução da acidez do solo, observaram que resíduos de aveia preta, ervilhaca comum e nabo forrageiro aplicados em cobertura promoveram aumento do pH na camada superficial do solo. Segundo os autores, isso pode ter ocorrido devido, principalmente, a reação de troca entre H^+ e Al^{3+} do solo pelos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ presentes nesses resíduos vegetais, pois, além do aumento do pH, eles também observaram maiores teores desses nutrientes na camada avaliada. Sendo assim, o cultivo de plantas com diferentes habilidades em modificar o pH do solo, podem também apresentar diferentes capacidades de absorção e utilização de P, podendo alterar a ciclagem e a distribuição das formas deste nutriente no solo. Como resultado se poderia ter maior eficiência de utilização do P adicionado via fertilizantes.

Estudando medidas para aumentar a disponibilidade de P para as culturas, Horst et al. (2001) concluíram que as espécies de plantas de cobertura (*Aeschynomene histrix*, *Arachis hypogaea*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, *Centrosema macrocarpum*, *Centrosema pubescens*, *Chamaecrista rotundifolia*, *Clitoria ternatea*, *Crotolaria ochroleuca*, *Glycine max*, *Lablab purpureus*, *Mucuna pruriens*, *Phaseolus vulgaris*, *Stylosanthes guaianensis*, *Stylosanthes hamata* e *Vigna unguiculata*) podem alterar as formas de P no solo, tendendo para formas mais solúveis. O efeito principal dessas mudanças parece estar relacionado com a reciclagem do P mobilizado no resíduo e também com a colonização de microrganismos solubilizadores de P na rizosfera das culturas subsequentes nos sistemas de rotação. Porém, os autores ressaltam que, principalmente em solos com alta fixação de P, o cultivo dessas plantas não pode substituir inteiramente a aplicação de P via fertilizantes.

Nesta mesma linha de raciocínio, Tiecher et al. (2012) observaram que a aveia preta e tremoço azul, cultivados em sistema de plantio direto, foram mais eficientes na ciclagem de P quando comparados com as outras espécies estudadas (ervilhaca peluda, nabo forrageiro e

trigo), aumentando o teor de P inorgânico lábil no solo nas camadas superficiais, podendo isso ter ocorrido devido a grande produção de biomassa, no caso da aveia preta, e a capacidade de adquirir P de formas de menor labilidade, no caso do tremoço azul.

2.3 Mecanismos de plantas para aquisição de P dos solos

As plantas desenvolvem diferentes estratégias e mecanismos fisiológicos para absorver o P do solo, evidenciando que existem espécies que são capazes de adquirir esse P de frações que não estão disponíveis para todas as plantas. Entre os principais mecanismos, podemos citar as modificações na morfologia das raízes e a liberação de exsudados radiculares, como por exemplo, ácidos orgânicos, responsáveis por modificações químicas e bioquímicas no solo da rizosfera (LAJTHA; HARRISON, 1995; GUPPY et al., 2005; PAVINATO et al., 2008).

Mudanças morfológicas que promovem o aumento da quantidade e tamanho das raízes são estratégias que ajudam, de maneira significativa, na absorção de P. Como o P é um nutriente pouco móvel no solo, quanto maior o volume explorado pelas raízes, maior também será o acesso à fração disponível. A associação de fungos micorrízicos com as raízes das plantas é um mecanismo que leva a modificações na morfologia das raízes de plantas que são colonizadas. Esses fungos beneficiam as plantas porque suas hifas se espalham no solo funcionando como uma extensão do sistema radicular, de modo que a dinâmica dessa simbiose favorece a absorção, a translocação e a utilização de água e nutrientes pelas plantas, principalmente de P (SOUZA et al., 2006). Vários trabalhos demonstram a capacidade que as micorrizas têm de incrementar a absorção de P do solo (DIOP et al., 2003; NISHA; RAJESHKUMA, 2010; SMITH et al. 2011). Incrementos na absorção de outros elementos essenciais, como do zinco, manganês e cobre, também são observados com a presença de micorrizas (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 1996).

Além das mudanças morfológicas, algumas espécies possuem capacidade de solubilizar o P do solo mediante a exsudação de suas raízes, a qual contém ácidos orgânicos (AO). Esses AO, como por exemplo, citrato, malato e fumarato, agem na dissociação dos grupos funcionais dos coloides do solo, ocupando os sítios de adsorção e mobilizando o P para a solução (LE BAYON et al., 2006). A figura 1 mostra as principais rotas dos AO no solo. Assim, é possível observar que esses ácidos também são capazes de formar complexos com metais livres na solução do solo, como o Fe e Al, capazes de precipitar o P, tornando-o indisponível às plantas. Ou ainda serem captados e metabolizados pela biomassa microbiana

do solo (BMS), que, após mineralização, excretam esses ácidos de volta para a solução (JONES, 1998). Bais et al. (2006) citam que muitas são as espécies capazes de aumentar a excreção de AO e absorver formas de P de baixa labilidade, quando sob deficiência de P. Entre essas espécies estão a colza (*Brassica Napus*), o tremçoço (*Lupinus alba*) e a alfafa (*Medicago sativa*).

Figura 1 - Diagrama esquemático mostrando os principais fluxos dos ácidos orgânicos e compartimentos no solo. Adaptado de Jones (1998)

De modo geral, a eficiência dos AO em aumentar a disponibilidade de P no solo depende do pH, uma vez que a remoção de P adsorvido na rizosfera aumenta com a acidificação (GERKE, 1994), do tipo de ânion orgânico e da sua persistência no solo, pois muitos desses AO são degradados em poucos dias após a liberação dos resíduos vegetais (KIRK; SANTOS; SANTOS, 2000). Pode-se dizer, então, que as espécies vegetais variam grandemente na capacidade de modificar o pH da rizosfera, bem como na concentração de cada AO no tecido e sistema radicular. A presença de AO como o malato, citrato e oxalato aumentam a taxa de dissolução dos fosfatos na solução do solo, o que pode levar a valores de 10 a 1.000 vezes maiores de P na solução (FOX; COMERFORD; MCFEE, 1990; GERKE, 1994).

2.4 Formas e dinâmica do P no solo

De maneira simplificada, podemos dizer que o P presente no solo pode se apresentar de diversas formas, sendo, assim, distribuídos em diferentes compartimentos. Entre esses compartimentos podemos citar o P adsorvido aos colóides, principalmente à óxidos de Fe e Al, o P precipitado com Al, Fe e Ca, o P ligado à matéria orgânica e o P na solução. Essas diferentes formas de P exibem variadas capacidades de fixação, influenciando diretamente a disponibilidade deste elemento às plantas (RAIJ, 1991). A deficiência de P, geralmente, está associada a solos tropicais, altamente intemperizados, isso porque, nesses solos, há predomínio de óxidos de ferro e alumínio na fração argila, capazes de adsorvê-lo, além de grandes concentrações de elementos como o Fe e o Al, capazes de precipitá-lo. Em função disso, mesmo que os solos apresentem altos teores de P total, apenas uma pequena parte está em equilíbrio com o P da solução, podendo ser absorvido pelas plantas (GATIBONI, 2003) e para que haja manejo eficiente de P, é importante compreender as relações e interações das várias formas que ele se encontra no solo e os inúmeros fatores que influenciam a sua disponibilidade (HAVLIN et al., 2005).

Na solução do solo, em função do pH, o P ocorre nas formas aniônicas H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} , ou PO_4^{3-} . Em solos tropicais, onde, normalmente, há dominância de solos ácidos, ou seja, pH abaixo de 7, o P ocorre quase que exclusivamente como o ânion H_2PO_4^- . Já em solos alcalinos ocorre predomínio do ânion HPO_4^{2-} . O ânion PO_4^{3-} pode ser encontrado em solos muito alcalinos, com pH acima de 10 (HAVLIN et al., 2005).

A adsorção específica de P aos coloides ocorre através de troca de ligantes, porém, a aproximação do fosfato para a superfície dos coloides é gerada por atração eletrostática, numa primeira fase rápida. Assim, no processo de adsorção, as hidroxilas ou moléculas de água presentes nas superfícies dos coloides são deslocadas pelos íons H_2PO_4^- , formando um novo complexo de superfície (HINGSTON; POSNER; QUIRK, 1972). Esta reação forma ligação predominantemente covalente, conhecida como adsorção específica e ocorre lentamente, podendo levar anos para atingir o equilíbrio (BARROW, 1985). Com o tempo, este P adsorvido na superfície dos coloides difunde-se para seu interior. Como as reações de adsorção e dessorção são fenômenos de superfície, o tamanho dos constituintes mineralógicos da fração argila do solo pode ser considerado um dos principais fatores que influenciam essas reações. Assim, solos com alto teor de goethita tem maior capacidade de adsorver P quando comparado a solos com alto teor de hematita, devido, em parte, pela maior

área superficial específica da goethita em relação à da hematita (SOUZA; CURI; GUEDES, 1991).

A precipitação (reação entre íons, com formação de uma nova fase ou composto) do P em solos ácidos ocorre com íons Al^{3+} ou Fe^{2+} presentes na solução e, no caso de solos alcalinos com íons Ca^{2+} (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Assim, no caso de solos ácidos, para evitar estas reações, deve-se neutralizar o Al e grande parte do Fe do solo através de calagem antes da fertilização fosfatada. Por outro lado, o uso excessivo de calcário promoveria, a pH acima de 7,0, novo aumento da fixação, via precipitação do fosfato com Ca^{2+} .

O P também pode estar presente no solo ligado à matéria orgânica, sendo, assim, denominado de P orgânico (Po). O Po apresenta-se basicamente nas formas de ortofosfato de monoésteres, ortofosfato de diésteres e fosfonatos e pode representar de 15% a 80% do P total do solo (HAVLIN et al., 2005). Por meio da mineralização, este Po pode se tornar importante fonte de P para as plantas, principalmente em solos bem intemperizados (VINCENT; TURNER; TANNER, 2010) e em solos cultivados com baixa disponibilidade de P (GATIBONI et al., 2005). Apesar da sua importância, não se tem dado muita atenção a esta forma de P, devido a suas limitações analíticas, tornando difícil sua quantificação no solo (TURNER; FROSSARD; BALDWIN, 2005).

Os ortofosfatos de monoésteres, principalmente os hexafosfatos de inositol (fitatos), representam de 50 a 90% do Po do solo, enquanto os ortofosfatos de diésteres correspondem, em média, a 2%, isso pode ocorrer porque os fitatos possuem maior afinidade pelos oxidróxidos de Fe e Al, fazendo com que eles permaneçam mais tempo no solo (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

Estudos têm mostrado que o aumento da matéria orgânica (MO) no solo também pode aumentar a disponibilidade de P. Isso ocorre, segundo Havlin et al. (2005), pela formação de compostos organofosforados, facilmente assimilados pelas plantas, pela substituição do H_2PO_4^- em sítios de adsorção e pelo aumento do P disponível por meio da mineralização. Ânions orgânicos produzidos a partir de decomposição da MO formam complexos estáveis com Fe^{2+} e Al^{3+} , impedindo que eles reajam com o H_2PO_4^- . Estes ânions também podem deslocar para a solução o P que está adsorvido nos óxidos de Fe e Al. Os ânions citrato, oxalato, tartarato e malato são eficientes em reduzir a capacidade de adsorção de P nos solos (NAGARAJAH; POSNER; QUIRK, 1970).

2.5 Fertilizantes fosfatados

De maneira geral, os fertilizantes fosfatados são divididos em dois grupos, o dos fosfatos solúveis (industrializados) e o dos fosfatos insolúveis (fosfato natural) (NOVAIS e SMITH, 1999). A matéria prima para a produção dos fertilizantes solúveis são as rochas fosfáticas. As rochas, quando atacadas com ácido sulfúrico (H_2SO_4), dão origem ao superfosfato simples, que, após esse tratamento, devem apresentar valor mínimo de P solúvel em água de 15% (BRASIL, 2004). Os fosfatos naturais (FNs) resultam da simples moagem da rocha fosfática, podendo ou não passar por processos físicos de concentração, e a solubilidade pode variar de acordo com o material de origem.

As características de solubilidade das fontes de fósforo são de grande importância quando se deseja avaliar a sua eficiência. No Brasil, o uso de fertilizantes solúveis na agricultura é muito maior quando comparado ao uso dos FNs. Isso porque os fosfatos solúveis disponibilizam o P para as plantas de maneira rápida e intensa, favorecendo, principalmente, as culturas de ciclo curto. Porém, essa rápida liberação, favorece também os processos de adsorção e precipitação de P no solo, originando compostos de baixa solubilidade. Dessa maneira, uma vez que os FNs liberam o P gradualmente, eles podem minimizar esses processos de fixação, o que levaria a um melhor aproveitamento do P pelas culturas. Porém, essa liberação lenta muitas vezes acaba não atendendo as exigências das plantas. Fatores como acidez, teores de P e Ca do solo e a habilidade que a espécie cultivada tem de exsudar ácidos podem contribuir com liberação do P contido nesses FNs (SOUZA; LOBATO, 2004).

Os FNs podem ser de origem sedimentar, ígnea e metamórfica. Os fosfatos de origem ígnea são pouco reativos nos solos, pois se formam a partir do resfriamento do magma, resultando em material compacto e com baixa superfície específica (RAJAN, WATKINSON e SINCLAIR, 1996). Isso explica porque a maioria dos trabalhos demonstra baixa eficiência agrônômica desse tipo de FN, principalmente em culturas anuais. Já o FN de origem sedimentar se forma a partir da deposição acumulada de matérias como ossadas e esqueletos de animais marinhos no fundo do mar. Alterações químicas tanto no FN ígneo quanto no sedimentar podem ocorrer e o resultado dessas alterações será os FN de origem metamórfica (HOROWITZ; MEURER, 2004).

Devido a restrições quanto a sua solubilidade, a aplicação de FNs nos solos, tem ocorrido principalmente como fosfatagem corretiva com incorporação no perfil da

camada arável do solo, com o objetivo de elevar o teor de P disponível a uma faixa razoável para cultivo (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

2.6 Fracionamento de P

A determinação das diversas formas de P presentes no solo através de extrações sequenciais com extratores que apresentam diferentes modos de ação é denominada “fracionamento de fósforo”. O trabalho desenvolvido por Chang e Jackson (1956) foi o precursor da técnica de fracionamento de P nos solos. Segundo esses autores o P no solo está dividido em quatro grandes grupos, sendo eles os fosfatos de cálcio, de alumínio, de ferro e os fosfatos precipitados no interior dos minerais, além daqueles incapazes de serem detectados pelos extratores utilizados, que são, de maneira sequencial, o $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{F}$, o NaOH , o H_2SO_4 e o $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$. Uma vez que essa técnica não separa as formas de P de acordo com sua labilidade, não estimando sua potencial disponibilidade para as plantas e nem identifica, separadamente, as formas de P orgânico, algumas críticas e modificações a este método foram sugeridas e vários outros métodos foram desenvolvidos como por exemplo o de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) e Zhang e Kovar (2009). Nos trabalhos desenvolvidos no Brasil, tem sido mais utilizado o método de fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) (GATIBONI et al., 2007; GONÇALVES; MEURER, 2009; PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009). Isto porque, com este método, é possível estimar a labilidade das frações extraídas, uma vez que ocorre remoção progressiva das frações mais disponíveis até as mais estáveis, tanto do P inorgânico quanto do P orgânico, de uma mesma amostra. Os extratores utilizados neste método originalmente são: Resina Trocadora de Ânions, NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} a pH 8,5; NaOH 0,1 mol L^{-1} ; NaOH 0,1 mol L^{-1} + ultrasonificação; HCl 1,0 mol L^{-1} e digestão com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$.

Segundo o estudo realizado por Cross e Schlesinger (1995), as frações de fósforo extraídas pelo fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) são agrupadas de acordo com sua labilidade. A resina trocadora de ânions (RTA) e o NaHCO_3 extraem as frações lábeis de P inorgânico e P inorgânico e orgânico, respectivamente. O P extraído por NaOH 0,1 mol L^{-1} representam, em geral, o P inorgânico ligado aos óxidos e às argilas silicatadas, com energia de ligação intermediária, e o P orgânico de frações moderadamente lábeis. A utilização de ultrasonificação em conjunto com o NaOH extrai o fósforo inorgânico e orgânico química e fisicamente protegidos nas superfícies internas dos microagregados. O HCl extrai o P inorgânico contido nos fosfatos de cálcio e fortemente

adsorvido aos coloides. E, por fim, a digestão do solo com H_2SO_4 e H_2O_2 extrai o P residual, na qual se encontra o que sobrou no solo de P inorgânico e orgânico e que, teoricamente, não contribui para a nutrição das plantas. Esta última fração também pode ser chamada de P recalcitrante.

Devido a restrições laboratoriais, principalmente em relação à falta de um aparelho de ultrasom, várias modificações para o método de fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) foram propostas. Dentre essas modificações, destaca-se a proposta por Condon, Goh e Newman (1985), onde estes autores excluíram a extração em duplicata para quantificação de P da biomassa microbiana, substituíram a extração com NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ com ultrassonificação por uma extração com NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (sem ultrassonificação), sendo esta realizada após a extração com HCl 1 mol L^{-1} . Em estudos mais recentes tem se adotado também a lavagem do solo com NaCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ entre uma extração e outra, para que não fique resíduo do extrator anterior, evitando, assim, que ele interfira na extração subsequente (GATIBONI, 2003).

Quando se realiza uma adubação fosfatada, ocorre uma sequência de eventos físico-químicos, transformando o P aplicado em substâncias complexas, as quais passam a governar a disponibilidade do nutriente no solo. Assim, resumidamente, é importante adotar a técnica de fracionamento de P quando há interesse em melhor entender a dinâmica do P no solo e identificar as formas preferenciais com que o P é retido no solo, podendo, então, determinar como estas formas contribuem para o suprimento de P às plantas, uma vez que métodos mais simples, como Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions, estimam apenas o P considerado disponível.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área experimental

O solo avaliado neste estudo foi proveniente de um experimento conduzido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, localizado no município de Dois Vizinhos - PR, nas coordenadas 25° 44' 05" Sul e 53° 03' 31" Oeste, com altitude de aproximadamente 509 metros.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima do município é caracterizado como subtropical úmido mesotérmico, do tipo Cfa, sem estação seca definida, com chuvas bem distribuídas e verões rigorosos. As médias das temperaturas dos meses mais quentes e mais frios ficam em torno de 22 °C e 13 °C, respectivamente. A pluviosidade média anual é de aproximadamente 2100 mm.

Antes da instalação do experimento, a área vinha sendo conduzida há sete anos no sistema de semeadura direta, com cultivo de culturas comerciais como milho e soja no verão e trigo ou aveia no inverno.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com parcelas subdivididas, em esquema fatorial 7 x 3, com três repetições. Os tratamentos foram: seis espécies de plantas de cobertura de inverno (ervilhaca - *Vicia sativa*, tremoço branco - *Lupinus albus*, nabo forrageiro - *Raphanus sativus*, azevém - *Lolium multiflorum*, aveia preta - *Avena strigosa*, trevo branco - *Trifolium repens*) mais um pousio, intercalados com duas fontes de fertilizantes fosfatados, aplicados na cultura de verão, o Fosfato Natural da Argélia (9% de P₂O₅ solúvel em H₂O e 29% de P₂O₅ total) e o Superfosfato Simples (18% de P₂O₅ solúvel em H₂O) e um controle (sem aplicação de fosfato). As fontes de fertilizantes fosfatados constituíram as parcelas e as espécies de plantas de cobertura, as subparcelas. Cada subparcela apresentava dimensões de 5 x 5 m, totalizando 25 m².

3.3 Condução do experimento

O experimento teve início no verão de 2008/2009, com o cultivo de feijão (*Phaseolus vulgaris*) nesta primeira safra, sendo cultivado milho (*Zea mays*) nas duas safras

subsequentes de verão (2009/2010 e 2010/2011) em sistema de semeadura direta. A implantação das culturas de verão ocorreu em meados de outubro de cada ano, cuja semeadura foi realizada com semeadora mecanizada. O espaçamento entre linhas do milho foi de 80 cm e no feijão foi de 45 cm. A adubação fosfatada com as duas fontes de P foi realizada a lanço em área total, sem incorporação, antecedendo a semeadura das culturas de verão em cada ano. A dose aplicada para ambas as fontes foi 135 kg ha^{-1} de P_2O_5 solúvel no feijão (primeiro ano) e 105 kg ha^{-1} de P_2O_5 solúvel no milho nos anos subsequentes.

A semeadura das plantas de cobertura foi realizada manualmente na primeira quinzena de maio nos três anos (2009, 2010 e 2011). Os sulcos para semeadura foram abertos com auxílio de enxada e as linhas de semeadura foram espaçadas 20 cm entre si. A quantidade de sementes viáveis utilizada na semeadura foi de 70 kg ha^{-1} de ervilhaca, 100 kg ha^{-1} de tremoço branco, 20 kg ha^{-1} de nabo forrageiro, 20 kg ha^{-1} de azevém (cultivar Barjumbo), 60 kg ha^{-1} de aveia preta (cultivar IPR 61) e 4 kg ha^{-1} de trevo branco, todos com sementes certificadas.

Não houve adubação fosfatada nas plantas de cobertura, objetivando avaliar apenas o efeito residual sobre a adubação previamente realizada na cultura de verão. As plantas de cobertura não leguminosas receberam adubação nitrogenada em cobertura, na dose de 40 kg ha^{-1} de N, na forma de ureia. O manejo das plantas de cobertura foi realizado de acordo com as recomendações para cada cultura, sendo utilizados herbicidas e inseticidas nas doses e épocas recomendadas. Houve dessecação uniforme da área antes da semeadura das culturas de verão, com uso de glifosate, na dose de 3 L ha^{-1} do produto comercial de mesmo nome.

3.4 Caracterização do Solo Avaliado

Para caracterizações químicas e físicas, antes da implantação do experimento, foram coletadas amostras de solo em três camadas (0-5; 5-10 e 10-20 cm). Estas amostras foram secas ao ar (TFSA), peneiradas ($<2 \text{ mm}$) e submetidas a análises químicas e granulométricas, segundo metodologias propostas por Raij et al. (2001) e Bouyoucos (1926), respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 1. O solo estudado é classificado como Nitossolo Vermelho, de textura argilosa (EMBRAPA, 2006).

As análises de óxidos de ferro, difração de raios-X e capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) foram realizadas em amostra composta de solo (TFSA) coletada na

camada de 0-20 cm, no ano de 2009, das parcelas que não receberam adubação e estavam em pousio (controle).

Tabela 1 - Resultados das análises químicas e granulométricas de amostras de solo coletadas previamente à implantação do experimento, 2008

Camada (cm)	pH CaCl ₂	MO	P resina	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	V
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----	mmol _c dm ⁻³	-----			%
0-5	5,4	40,2	8,1	0,0	34,2	54,0	26,9	5,0	71,5
5-10	5,2	40,2	9,7	0,0	36,8	56,2	29,8	2,8	70,7
10-20	5,0	26,8	4,8	0,8	39,7	43,2	21,3	1,3	62,4
Camada (cm)	Argila		Silte		Areia				
	-----		g kg ⁻¹		-----				
0-5	701,4		259,3		39,3				
5-10	739,0		243,2		17,8				
10-20	751,5		231,5		17,0				

O Ferro referente aos óxidos de ferro pedogênicos (Fe_d) foi extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) a 80° C (MEHRA; JACKSON, 1960), enquanto o ferro referente aos óxidos de ferro (Fe_o) de baixa cristalinidade (amorfo) foi extraído com oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ (SCHWERTMANN, 1964). Os teores de ferro solubilizados nos dois extratores foram determinados por espectrometria de absorção atômica e os resultados estão apresentados na Tabela 2. O baixo valor da razão Fe_o/Fe_d (< 0,05) indicou que esses óxidos são predominantemente cristalinos, com alta estabilidade no solo.

Tabela 2 - Resultados das análises de Ferro ditionito (Fe_d) e oxalato (Fe_o) e a relação entre eles (Fe_d/Fe_o)

Amostra	Fe _d	Fe _o	Fe _o /Fe _d
	-----g kg ⁻¹ -----		
0-20 cm	81,37	1,09	0,013

Para identificação dos principais minerais presentes neste solo, foram realizadas análises por difração de raios-X (DRX) da fração argila. O tratamento do solo e o preparo das lâminas seguiram o método descrito por Jackson (1979). Para identificação dos óxidos de Fe, foi preparada lâmina orientada contendo ferro (argila total). Outra amostra de argila foi desferrificada, dividida e saturada com KCl 1 mol L⁻¹ e MgCl₂ 1 mol L⁻¹, para que ocorresse a saturação das entrecamadas com K⁺ e Mg²⁺, possibilitando, assim, a identificação dos filossilicatos. As amostras saturadas passaram pelos seguintes tratamentos: K⁺ na

temperatura ambiente (K25), K^+ aquecido a $300^{\circ}C$ (K300), K^+ aquecido a $500^{\circ}C$ (K500), Mg^{2+} na temperatura ambiente (Mg25) e Mg^{2+} solvatada com etilenoglicol (Mg+EG).

Os difratogramas foram gerados utilizando o aparelho Miniflex II Desktop X-Ray Diffractometer Rigaku, radiação $CuK\alpha$, com intervalo de análise de 5 a $30^{\circ}2\theta$ e 10 a $50^{\circ}2\theta$ para amostras sem ferro e com ferro, respectivamente. Os difratogramas, com a identificação dos minerais, são apresentados nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Difratograma de Raios X, argila total, lâmina orientada. Minerais identificados: Caulinita (Ct), Gibbsita (Gb), Maghemita (Mh) e Hematita (Hm)

Figura 3 – Sequência de difratogramas de Raios X, argila desferri-fused, lâmina orientada. Minerais identificados: Esmectita com hidroxí entre-camadas (EHE), Caulinita (Ct), Gibbsita (Gb), Anatásio (An), Quartzo (Qz) e Rutilo (Ru)

Para avaliar a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), amostras compostas coletadas na camada de 0-20 cm, foram tomadas para determinação, sendo utilizadas 2,0 g de solo (TFSA) recebendo 9 doses de P (0; 5; 10; 20; 40; 80; 120; 200 e 280 mg L⁻¹) utilizando como fonte o KH₂PO₄ (p.a.). As doses foram aplicadas em um meio contendo 20 mL de solução de equilíbrio com cloreto de cálcio (CaCl₂.2H₂O 0,01 mol L⁻¹). Posteriormente, agitou-se por 36 horas à 180 oscilações min⁻¹, seguida de 12 horas de repouso, totalizando 48 horas de contato do solo com a solução. Por fim, as amostras foram centrifugadas por 15 min a 4000 rpm, sendo determinada a concentração de P no sobrenadante por colorimetria (MURPHY; RILEY, 1962). A CMAP do solo, de acordo com a curva ajustada, é de 1599,6 mg kg⁻¹ de solo (Figura 4).

Figura 4 – Capacidade máxima de adsorção de fósforo no solo da área experimental

3.5 Atributos avaliados

Após o primeiro e terceiro anos de cultivo das plantas de cobertura, final de setembro de 2009 e 2011, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, uma amostra por parcela, utilizando como ferramenta uma pá de corte, para realização das seguintes análises:

3.5.1 Fracionamento do fósforo

O fracionamento químico do fósforo no solo foi realizado de acordo com a metodologia de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com as modificações propostas por Condon, Goh e Newman (1985). Em resumo, esta metodologia baseia-se em pesar 0,5 g de solo e submetê-lo a diferentes extratores em ordem sequencial (Figura 5), sendo eles: resina de troca aniônica, extrai P inorgânico (P_{iRTA}), $NaHCO_3$ 0,5 mol L⁻¹, extrai P inorgânico e orgânico (P_{iBIC} e P_{oBIC}), NaOH 0,1 mol L⁻¹, extrai P inorgânico e orgânico ($P_{iHID-0,1}$ e $P_{oHID-0,1}$), HCl 1,0 mol L⁻¹, extrai P inorgânico (P_{iHCl}) e NaOH 0,5 mol L⁻¹, extrai P inorgânico e orgânico ($P_{iHID-0,5}$ e $P_{oHID-0,5}$). Dos extratos alcalinos ($NaHCO_3$ 0,5 mol L⁻¹; NaOH 0,1 mol L⁻¹ e NaOH 0,5 mol L⁻¹), retirou-se uma alíquota para determinação do P total por digestão com persulfato de amônio ((NH₄)₂S₂O₈) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) em autoclave, em que o P orgânico é obtido pela diferença entre o P total e o P inorgânico. Diferentemente da metodologia, aqui foi realizada a digestão do P total (P_{total}) no solo com H₂SO₄ + H₂O₂, e pela diferença entre o P total da digestão e a soma das frações determinadas anteriormente, estimou-se o P residual ($P_{residual}$).

As leituras dos extratos foram feitas em espectrofotômetro de absorção, seguindo a metodologia de Murphy e Riley (1962) para os extratos ácidos e segundo Dick e Tabatabai (1977) para os extratos alcalinos. Os compartimentos estimados com as respectivas frações foram: lábil (P_{iRTA} , P_{iBIC} e P_{oBIC}), moderadamente lábil ($P_{iHID-0,1}$, $P_{oHID-0,1}$ e P_{iHCl}) e não lábil ($P_{iHID-0,5}$, $P_{oHID-0,5}$ e P residual).

3.5.2 Análises Químicas do Solo

Foram avaliadas também as mudanças químicas que ocorreram no solo após três anos de cultivo com os mesmos tratamentos. Assim, essas mesmas amostras de solo foram submetidas a análises de rotina, seguindo as metodologias propostas por Raij et al. (2001), onde foi determinado o pH em CaCl₂ (relação 1:2,5 de solo:solução), a acidez potencial (H + Al, determinados por correlação ao índice SMP), e também as bases trocáveis: potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), extraídos com resina trocadora catiônica.

3.6 Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com o auxílio do programa SAS 9.2 (SAS INSTITUTE, 2008), considerando o efeito isolado dos fatores ou a interação, quando significativa, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Figura 5 - Esquema da técnica do fracionamento de fósforo proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com as modificações propostas por Condron, Goh e Newman (1985). Adaptado de Rotta (2012)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Frações de P no solo

Os resultados da análise de variância para as frações de P no solo (Tabela 3) indicaram que houve interações entre os fatores estudados, na camada de 0-5 cm para as variáveis P_{iRTA} e P_{iBIC} no ano de 2009 e P_{iHCl} no ano de 2011, na camada de 5-10 cm somente para P_{iHCl} no ano de 2009 e na camada de 10-20 cm para P_{iBIC} , P_{oBIC} , $P_{iHID-0,5}$ e $P_{residual}$ no ano de 2009 e P_{oBIC} e $P_{residual}$ no ano de 2011. Houve efeito significativo das plantas de cobertura em apenas algumas frações de P e algumas camadas do solo. Isso resultou em diferenças significativas, apenas nas frações P_{iRTA} e P_{iBIC} na camada de 5-10 cm no ano de 2009 e as frações de P_{iRTA} e $P_{iHID-0,5}$ na camada de 0-5 cm no ano de 2011.

No ano de 2009 as fontes de fertilizantes fosfatados interferiram significativamente nas frações de $P_{iHID-0,1}$, P_{iHCl} , $P_{iHID-0,5}$ e $P_{oHID-0,5}$ na camada de 0-5 cm, no P_{oBIC} , $P_{oHID-0,1}$ e $P_{iHID-0,5}$ na camada de 5-10 cm e no $P_{iHID-0,1}$, $P_{oHID-0,1}$, P_{iHCl} e $P_{oHID-0,5}$ na camada de 10-20 cm. Já no ano de 2011, houve efeito significativo das fontes para as frações de P_{iRTA} , P_{iBIC} , P_{oBIC} , $P_{iHID-0,1}$, $P_{iHID-0,5}$, $P_{oHID-0,5}$ e $P_{residual}$ na camada de 0-5cm, e de $P_{oHID-0,5}$ na camada de 5-10 cm (Tabela 3).

Os resultados para a fração de P_{iRTA} estão apresentados na Tabela 4. De modo geral, observa-se que, após o cultivo das plantas de cobertura, as médias dos teores de P disponível em função das fontes fosfatadas na camada de 0-5 cm tenderam a aumentar na sequência controle, fosfato solúvel (SFS) e fosfato natural (FN), isso em ambos os anos avaliados, mas com valores mais distintos na avaliação do terceiro ano (2011). Isso pode ter ocorrido devido ao efeito residual do FN, uma vez que o P deste fosfato é solubilizado lentamente no solo. Não foi observado efeito das fontes fosfatadas no teor de P_{iRTA} nas camadas mais profundas (5-10 e 10-20 cm), em ambos os anos avaliados (2009 e 2011).

Tabela 3 - Análise da variância para frações de P do fracionamento de Hedley em função de fontes de fertilizantes fosfatados e plantas de cobertura

Causa de Variação	Frações de P do fracionamento de Hedley									
	P _{RTA}	P _{iBIC}	P _{oBIC}	P _{iHID-0,1}	P _{oHID-0,1}	P _{HCl}	P _{iHID-0,5}	P _{oHID-0,5}	P _{residual}	P _{total}
----- 2009 -----										
0-5 cm										
FFF	*	*	ns	*	ns	*	*	*	ns	*
PC	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FFF*PC	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
5-10 cm										
FFF	ns	ns	*	ns	*	*	*	ns	ns	*
PC	*	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
FFF*PC	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
10-20 cm										
FFF	ns	ns	*	*	*	*	*	*	*	*
PC	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FFF*PC	ns	*	*	ns	ns	ns	*	ns	*	ns
----- 2011 -----										
0-5 cm										
FFF	*	*	*	*	ns	*	*	*	*	*
PC	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
FFF*PC	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
5-10 cm										
FFF	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FFF*PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
10-20 cm										
FFF	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FFF*PC	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns

* - significativo a 5% pelo Teste F; ns - não significativo

FFF= fontes de fertilizantes fosfatados; PC= plantas de cobertura

Tabela 4 – Frações lábeis de P extraídas com resina de troca aniônica (RTA) em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura do solo

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mg kg ⁻¹ -----							
0-5 cm								
Pousio	7,10 Aa	7,71 Aab	7,84 Aa	7,55	5,20	12,80	20,45	12,81 a
Ervilhaca	6,00 Aa	6,12 Ab	12,96 Aa	8,36	5,47	8,76	12,01	8,74 ab
Tremoço	6,89 Aa	15,41 Aa	10,32 Aa	10,87	*	*	*	*
Nabo	7,04 ABa	9,06 Aab	5,56 Ba	7,22	4,65	6,33	10,85	7,60 b
Azevém	5,43 Aa	11,43 Aab	11,24 Aa	9,37	4,96	8,18	7,54	7,13 b
Aveia	5,25 Aa	9,56 Aab	10,95 Aa	8,58	6,65	6,90	9,17	7,57 b
Trevo	6,52 Ba	6,63 Bb	17,05 Aa	10,07	4,92	12,32	15,42	10,89 ab
MÉDIA	6,32	9,42	10,84		5,37 C	9,21 B	12,57 A	
C.V.(%)	37,18				37,31			
5-10 cm								
Pousio	3,32	2,72	3,36	3,13 b	4,29	2,46	3,78	3,51 a
Ervilhaca	2,92	2,29	3,01	2,80 b	6,85	4,65	5,12	5,54 a
Tremoço	4,27	3,55	3,13	3,65 b	*	*	*	*
Nabo	4,91	4,74	2,33	3,99 ab	5,19	6,91	2,58	4,89 a
Azevém	5,66	6,06	6,06	5,92 a	4,18	5,47	3,43	4,36 a
Aveia	3,64	2,43	3,30	3,12 b	4,43	2,80	3,97	3,73 a
Trevo	2,95	2,33	4,76	3,35 b	2,58	7,55	3,82	4,65 a
MÉDIA	3,95 A	3,50 A	3,71 A		4,58 A	4,97 A	3,78 A	
C.V.(%)	40,26				50,66			
10-20 cm								
Pousio	1,97	1,92	1,92	1,93 a	2,39	2,19	2,36	2,31 a
Ervilhaca	1,77	1,41	2,53	1,90 a	1,57	1,78	2,80	2,05 a
Tremoço	3,21	1,98	3,28	2,82 a	*	*	*	*
Nabo	2,26	2,55	1,76	2,19 a	3,21	2,29	1,47	2,43 a
Azevém	4,16	4,50	2,77	3,81 a	2,13	3,79	2,38	2,76 a
Aveia	1,52	1,80	2,40	1,90 a	1,44	2,60	1,99	2,01 a
Trevo	1,80	1,59	2,29	1,89 a	1,58	2,13	3,49	2,40 a
MÉDIA	2,38 A	2,25 A	2,42 A		2,05 A	2,46 A	2,47 A	
C.V.(%)	58,15				44,91			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Foi observada a formação de um gradiente de P no perfil do solo, tendendo de maiores para menores teores de P da camada superior à inferior, respectivamente, como seria o esperado, em consequência do longo tempo sob plantio direto (Tabela 4). Tiecher et al. (2012), estudando os efeitos do preparo do solo e de culturas de inverno na dinâmica do P, observaram o mesmo gradiente para todas as culturas de cobertura na fração extraída com RTA no sistema de plantio direto. Como o P é um nutriente pouco móvel no solo, esses autores atribuem os resultados à aplicação anual de fertilizantes fosfatados na superfície do solo, sem o revolvimento do mesmo, o que pode justificar o ocorrido no presente estudo também. Porém, onde não houve aplicação de fertilizantes, a concentração de P na camada superior pode ser atribuída à reciclagem proporcionada pelas plantas, que absorvem o P disponível de camadas mais profundas, deixando-o na superfície após a decomposição de seus resíduos (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001).

O P_{iRTA} e P_{iBIC} são frações cujo teores de P obtidos são classificados como lábil ou prontamente disponível às plantas, estando tais frações sensíveis às mudanças na solução do solo pela absorção pelas plantas. Desdobrando, então, a interação entre os fatores estudados para a fração P_{iRTA} e P_{iBIC} na camada de 0-5 cm, do ano de 2009, foi possível observar que, sob a adubação com FN e ausência de fertilizante fosfatado, não houve diferenças nos teores de P entre as plantas de cobertura (Tabela 4 e 5). Já onde foi aplicado o SPS, o tremoço se destacou entre as plantas, proporcionando maior teor de P disponível no solo, diferindo estatisticamente da ervilhaca (P_{iRTA}) e do trevo (P_{iRTA} e P_{iBIC}).

O tremoço é conhecido por excretar grande quantidade de ácidos orgânicos como citrato, malato e fumarato, mesmo em condições de disponibilidade de P relativamente altas (LA BAYON et al., 2006), isso pode ter contribuído para os resultados obtidos neste estudo, uma vez que esses ácidos podem dissolver e ocupar os sítios de adsorção de P no solo. Outro fator que pode ajudar a explicar esses resultados é o caráter não micorrízico do tremoço, assim, para compensar a inexistência dos benefícios de tal associação, o tremoço produz maior quantidade de enzimas fosfatases ácidas que são capazes de mineralizar fosfatos orgânicos no solo (COSTA; LOVATO, 2004).

A associação do nabo com o FN proporcionou, na camada de 0-5 cm, o menor teor de P na fração de P_{iRTA} em 2009, não tendo diferenças significativas para o cultivo do nabo sem aplicação de fosfato (Tabela 4). Como esses resultados foram observados somente nos casos em que o fornecimento de P era restrito, a ausência de associação micorrízica no nabo pode ter sido responsável por estes menores teores de P encontrados. Já para o trevo o

FN resultou em maior teor de P nas frações lábeis (P_{iRTA} e P_{iBIC}) (Tabelas 4 e 5, respectivamente).

As plantas de cobertura também influenciaram significativamente as frações de P_{iRTA} e P_{iBIC} na camada de 5-10 cm em 2009. O azevém proporcionou maior teor de P comparado às demais plantas, embora não tenha diferido estatisticamente dos resultados obtidos com o nabo (fração de P_{iRTA} e P_{iBIC}), o tremoço e o trevo (P_{iBIC}). Na camada de 10-20 cm, o desdobramento dos fatores mostrou que, para a fração de P_{iBIC} , onde não foi aplicado fertilizante, o azevém proporcionou maior teor de P diferindo apenas dos valores encontrados nas parcelas onde foi cultivado o trevo. Para a fração P_{iRTA} não foi detectada diferença na camada 10-20 cm em função das plantas de cobertura (Tabelas 4 e 5).

Já para os dados do terceiro ano (2011) foi possível observar menores teores de P disponível no solo onde a adubação fosfatada foi ausente e na camada de 0-5 cm (P_{iRTA} e P_{iBIC}) (Tabelas 4 e 5). Os teores P lábil variaram entre as plantas no ano de 2011, mas apenas na fração P_{iRTA} e na camada 0-5 cm, sendo que o melhor resultado foi observado no pousio (sem plantas cultivadas), que não diferiu estatisticamente da ervilhaca e do trevo. O maior teor de P no solo no pousio pode ser atribuído principalmente à aplicação do FN, uma vez que não havia planta para absorver o P que está sendo liberado gradualmente desta fonte.

Ao isolar o tratamento controle (Sem P + Pousio) das frações de P_{iRTA} e P_{iBIC} da camada superior (0-5 cm) e compara-lo ao longo do tempo, é possível observar que houve diminuição do teor de P_{iRTA} (Tabela 4) e, concomitantemente, houve aumento de P na fração P_{iBIC} (Tabela 5). Isso indica que os teores de P extraídos nessas frações estão relacionados e estimam o P do mesmo compartimento (P lábil).

Tiecher et al. (2012), estudando os efeitos de plantas de cobertura de inverno e sistemas de manejo do solo, observaram que as plantas proporcionaram mudanças significativas nos teores de P inorgânico extraído com água destilada, RTA, $NaHCO_3$ e HCl nos primeiros 5 cm do solo. Os maiores valores observados pelos autores foram com o cultivo de aveia preta e o tremoço azul, sob sistema de plantio direto.

A fração de P orgânico extraído por $NaHCO_3$ 0,5 mol L⁻¹ (P_{oBIC}) é também considerada como lábil no solo (GATIBONI, 2003). Os resultados obtidos nesta fração (Tabela 6) mostram que, ao longo do tempo, ocorreu aumento do teor de P, independente dos tratamentos. Porém, onde foi aplicado fertilizante fosfatado estes aumentos foram mais expressivos, principalmente sob FN. Esse comportamento foi observado em todas as camadas analisadas. Tais resultados concordam com os obtidos por Gatiboni et al. (2007), que também observaram aumento nos teores de P_{oBIC} ao longo do tempo em cultivos sucessivos, porém

estes autores ressaltam que tal aumento foi pouco influenciado pela aplicação de P. Sendo assim, o aumento médio do P orgânico nesta fração, no presente estudo, poderia ser atribuído ao aumento da ciclagem de material orgânico no solo, proporcionado pelo cultivo das plantas de cobertura, sob plantio direto, que mantém todo o material vegetal produzido sobre o solo.

Entre as fontes de fertilizantes fosfatados foi possível observar que no ano de 2009, a não aplicação de fosfato proporcionou o maior valor de $P_{O_{BIC}}$, na camada de 5-10 cm (Tabela 6). Isso pode ser consequência de possíveis imobilizações em ambientes com baixo P disponível, reduzindo essa fração quando fontes minerais são adicionadas ao solo. Já no ano de 2011, as fontes fosfatadas proporcionaram os maiores teores de P, porém, esse efeito foi somente na camada de 0-5 cm. Tais resultados discordam de Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2003), que estudando o efeito de doses crescentes de fosfato solúvel em sistema de plantio direto nas frações de P no solo, concluíram que as modificações nos teores de P devido à aplicação de fertilizantes fosfatados no solo restringem-se as formas de P inorgânico.

Quando se considera os efeitos das plantas de cobertura, em ambos os anos não houve qualquer influência nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm) na fração de $P_{O_{BIC}}$ (Tabela 6). No entanto, para a camada de 10-20 cm em ambos os anos avaliados houve interação. Em 2009, as fontes de fertilizantes fosfatados não proporcionaram diferenças entre as plantas de cobertura, mas onde se usou SPS o trevo promoveu maior teor de P em relação às demais culturas. Nesta camada, o FN, de maneira geral, resultou em maiores quantidades de $P_{O_{BIC}}$, no ano de 2009, quando associado com as plantas de cobertura, as exceções foram o pousio, o tremoço e o nabo, em que seus resultados independeram das fontes de fertilizantes. No ano de 2011, desdobrando os fatores na camada de 10-20 cm observou-se que onde foi aplicado FN o trevo proporcionou maior teor de P diferindo apenas do nabo. A ervilhaca, o azevém, a aveia e o trevo proporcionaram maiores quantidades de P no solo quando associadas com o FN, sendo que não houve diferença entre a associação com o SPS para o azevém e o trevo e de onde não foi aplicado P para a ervilhaca. Mas de modo geral, as diferenças observadas na camada de 10-20 cm provavelmente foram muito mais em função da variabilidade do solo do que do efeito de plantas de cobertura em si, pois seria esperado efeito de plantas nas camadas mais superficiais, em função da deposição de resíduos e decomposição dos mesmos na superfície (MERLIN; ROSOLEM, 2011).

Os teores de P inorgânico e orgânico extraídos com $NaOH\ 0,1\ mol\ L^{-1}$ estão apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente. Olhando individualmente cada camada de solo avaliada, pode-se destacar que na camada 0-5 cm o SPS proporcionou maior teor de P inorgânico no primeiro ano de avaliação, não diferindo da média dos tratamentos sem P, já na

camada de 10-20 cm ocorreu o inverso, o SPS resultou nos menores teores de P inorgânico, não diferindo de onde não foi aplicado P, não diferindo na camada intermediária (5-10 cm). No ano de 2011 foi observada diferença somente na camada de 0-5 cm, em que o FN proporcionou maiores teores de P inorgânico quando comparado ao controle. Isso pode ser explicado pelo efeito residual do fertilizante, uma vez que altas doses de P foram aplicadas via FN, em formas insolúveis, pois a base para fertilização foi em função do teor solúvel do nutriente. Mas é importante destacar que esse acúmulo ocorreu significativamente somente na camada mais superficial.

Os teores de P orgânico extraído com NaOH 0,1 mol L⁻¹ não foram influenciados pelos tratamentos, com exceção dos resultados observados no ano de 2009 nas camadas de 5-10 e 10-20 cm em que os teores de P orgânico nesta fração foram menores onde se aplicou fertilizante fosfatado, não diferindo entre o SPS e o controle (sem P) na camada de 10-20 cm (Tabela 8).

De maneira geral, os resultados obtidos na fração extraída com NaOH 0,1 mol L⁻¹ foram pouco influenciados pelos tratamentos (Tabelas 7 e 8), isso pode ser devido a este extrator remover do solo formas de P moderadamente lábeis, onde o P inorgânico e orgânico são extraídos pelos ânions OH⁻ da solução extratora que dissolvem uma porção do nutriente ligado ao ferro e alumínio nos coloides, hidrolisando-os (P inorgânico) (FIXEN; GROVE, 1990) e provocam a hidrólise parcial dos compostos orgânicos, extraíndo o P orgânico (DALAL, 1977). Ao longo do tempo o P orgânico desta fração tendeu a diminuir, tal tendência não foi observada para o P inorgânico. Este mesmo comportamento foi observado por Gatiboni et al. (2007), a partir do sexto cultivo consecutivo, tanto onde não foi quanto onde foi aplicado fertilizantes. Como não foram observados aumentos expressivos nas frações lábeis (Pi_{RTA} e Pi_{BIC}), no presente estudo, o P mineralizado nesta fração pode ter sido adsorvido aos coloides do solo e transformado em formas de P inorgânico de menor labilidade.

Tabela 5 – Teores de P inorgânico no solo extraído com bicarbonato de sódio (NaHCO_3) em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mg kg ⁻¹ -----							
0-5 cm								
Pousio	10,88 Aa	12,95 Aab	13,69 Aa	12,51	12,41	20,10	23,19	17,99 a
Ervilhaca	16,38 Aa	20,53 Aab	17,00 Aa	17,97	12,33	12,86	22,65	15,95 a
Tremoço	14,26 Aa	23,99 Aa	15,83 Aa	18,03	*	*	*	*
Nabo	13,11 Aa	18,53 Aab	13,27 Aa	14,97	13,15	15,86	13,81	14,27 a
Azevém	12,92 Aa	20,20 Aab	15,64 Aa	16,25	12,26	25,95	15,46	16,88 a
Aveia	12,72 Aa	14,72 Aab	15,44 Aa	14,29	13,78	18,96	9,17	13,97 a
Trevo	14,08 Ba	11,60 Bb	23,01 Aa	16,23	12,49	19,86	25,71	18,54 a
MÉDIA	13,48	17,50	16,27		12,74 B	18,52 A	17,57 AB	
C.V.(%)	24,03				37,00			
5-10 cm								
Pousio	8.35	9.03	11.95	9,87 b	10.38	12.82	14.18	12,45 a
Ervilhaca	12.66	9.49	11.37	11,17 b	12.75	14.58	13.86	13,72 a
Tremoço	11.56	11.66	12.34	11,85 ab	*	*	*	*
Nabo	14.18	12.24	11.10	12,50 ab	9.14	13.25	14.30	11,97 a
Azevém	13.41	17.49	13.79	14,89 a	12.09	15.14	13.34	13,54 a
Aveia	10.39	11.75	11.56	11,23 b	10.63	12.30	13.94	12,28 a
Trevo	12.53	12.54	12.88	12,65 ab	11.77	12.80	13.54	12,81 a
MÉDIA	11,87 A	12,02 A	12,14 A		11,09 A	13,47 A	13,86 A	
C.V.(%)	20,77				26,51			
10-20 cm								
Pousio	9,23 Aab	9,52 Aa	10,33 Aa	9,69	11,21	10,57	17,70	13,16a
Ervilhaca	10,54 Aab	7,37 Aa	10,41 Aa	9,44	10,73	10,49	12,97	11,39a
Tremoço	9,87 Aab	9,52 Aa	11,93 Aa	10,44	*	*	*	*
Nabo	11,07 Aab	10,68 Aa	7,88 Aa	9,87	10,97	26,67	14,17	17,27a
Azevém	14,86 Aa	7,21 Aa	8,21 Aa	10,09	11,65	10,57	16,90	13,59a
Aveia	9,91 Aab	10,19 Aa	10,09 Aa	10,06	10,33	12,89	10,57	11,26a
Trevo	7,58 Ab	9,82 Aa	11,21 Aa	9,54	9,23	10,93	11,77	10,60a
MÉDIA	10,43	9,19	10,01		10,63 A	14,05 A	14,01A	
C.V.(%)	23,92				38,93			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Tabela 6 – Teores de P orgânico no solo extraído com bicarbonato de sódio (NaHCO₃) em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mg kg ⁻¹ -----							
0-5 cm								
Pousio	24,71	14,03	25,52	21,42 a	40,20	28,42	58,24	42,29 a
Ervilhaca	28,44	22,81	29,00	27,07 a	23,49	46,01	51,20	39,52 a
Tremoço	16,94	26,59	30,17	25,37 a	*	*	*	*
Nabo	25,19	26,21	25,25	25,50 a	28,83	26,52	54,35	37,54 a
Azevém	23,57	29,87	27,65	27,03 a	29,35	42,92	45,98	39,42 a
Aveia	21,05	21,80	26,49	23,28 a	18,87	14,65	35,05	23,36 a
Trevo	23,74	22,57	34,02	26,01 a	19,64	35,31	65,67	40,21 a
MÉDIA	23,43 A	23,27 A	27,83 A		27,09 B	31,50 AB	51,74 A	
C.V.(%)	27,17				68,93			
5-10 cm								
Pousio	22,25	15,23	15,94	17,81 a	30,25	40,82	50,33	39,23 a
Ervilhaca	22,48	16,61	17,43	18,64 a	53,91	32,41	65,11	50,47 a
Tremoço	24,93	23,02	17,82	21,92 a	*	*	*	*
Nabo	30,92	21,08	15,25	23,31 a	48,74	33,54	39,01	39,39 a
Azevém	26,26	15,84	17,72	19,94 a	56,91	48,60	68,90	58,13 a
Aveia	21,57	12,51	16,33	16,80 a	35,70	29,40	69,95	45,02 a
Trevo	21,25	14,38	19,86	18,37 a	44,26	41,46	38,23	41,32 a
MÉDIA	24,32 A	17,11 B	17,00 B		44,74 A	37,71 A	55,54 A	
C.V.(%)	23,46				68,08			
10-20 cm								
Pousio	9,60 Aa	9,31 Ab	14,65 Aa	11,19	57,27 Aa	14,03 Aa	24,22 Aab	34,07
Ervilhaca	11,85 ABa	9,62 Bb	36,42 Aa	19,29	58,20 Aa	11,85 Ba	31,51 ABab	33,52
Tremoço	12,38 Aa	12,48 Ab	27,38 Aa	18,04	*	*	*	*
Nabo	12,29 Aa	9,96 Ab	14,22 Aa	11,90	43,33 Aa	25,05 Aa	18,60 Ab	28,99
Azevém	14,84 Ba	10,11 Ab	22,19 Aa	15,58	5,03 Ba	16,72 ABa	25,02 Aab	15,59
Aveia	10,74 Ba	6,82 Bb	40,48 Aa	19,34	11,58 Ba	9,52 Ba	43,07 Aab	21,39
Trevo	14,88 Ba	43,80 Aa	46,24 Aa	29,75	12,20 Ba	26,67 ABa	54,94 Aa	31,27
MÉDIA	12,39	13,49	27,46		28,83	17,37	33,73	
C.V.(%)	38,41				59,37			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Tabela 7 – Teores de P inorgânico no solo extraído com hidróxido de sódio 0,1 mol L⁻¹ (NaOH 0,1 mol L⁻¹) em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
----- mg kg ⁻¹ -----								
0-5 cm								
Pousio	32,20	30,77	28,77	30,58 a	34,80	32,24	47,25	38,09 a
Ervilhaca	27,70	46,94	21,32	32,52 a	29,92	34,52	42,85	35,76 a
Tremoço	33,75	37,35	27,48	32,86 a	*	*	*	*
Nabo	32,77	32,87	30,40	32,01 a	18,50	23,33	29,57	23,79 a
Azevém	37,07	25,62	21,75	28,15 a	18,20	41,08	30,50	29,92 a
Aveia	32,92	33,78	22,47	29,72 a	22,55	18,74	43,99	28,42 a
Trevo	32,35	38,93	39,48	36,92 a	22,01	28,29	48,17	32,82 a
MÉDIA	32,93 AB	35,18 A	27,38 B		24,33 B	29,70 AB	40,38 A	
C.V.(%)	28,56				47,58			
5-10 cm								
Pousio	21,61	16,89	18,03	18,84 a	29,55	18,21	32,55	26,77 a
Ervilhaca	34,80	20,59	20,75	25,38 a	24,05	29,76	33,40	29,07 a
Tremoço	28,05	20,04	21,90	23,33 a	*	*	*	*
Nabo	33,35	14,60	19,61	22,52 a	21,81	25,60	34,12	27,17 a
Azevém	27,91	29,05	23,90	26,95 a	38,91	35,57	35,90	36,79 a
Aveia	21,47	22,13	21,90	21,83 a	25,67	20,62	28,75	25,01 a
Trevo	28,48	26,01	30,74	28,41 a	23,84	26,61	32,01	27,48 a
MÉDIA	27,95 A	21,33 A	22,40 A		27,30 A	26,06 A	32,79 A	
C.V.(%)	39,98				30,43			
10-20 cm								
Pousio	14,31	13,45	20,69	16,15 a	20,93	23,09	34,36	26,12 a
Ervilhaca	24,35	15,26	22,63	20,74 a	25,42	21,08	27,79	24,38 a
Tremoço	31,56	15,45	25,49	23,24 a	*	*	*	*
Nabo	20,47	18,03	14,67	17,72 a	22,86	37,42	29,99	30,09 a
Azevém	21,04	11,69	16,47	16,40 a	23,34	18,71	34,38	25,47 a
Aveia	13,45	10,30	18,44	14,06 a	21,62	33,02	21,16	25,26 a
Trevo	13,88	18,16	24,13	18,72 a	23,12	19,80	27,21	23,37 a
MÉDIA	19,28 AB	14,62 B	20,36 A		22,88 A	25,51 A	29,22 A	
C.V.(%)	35,82				41,42			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Tabela 8 – Teores de P orgânico no solo extraído com hidróxido de sódio 0,1 mol L⁻¹ (NaOH-0,1 mol L⁻¹) em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
----- mg kg ⁻¹ -----								
0-5 cm								
Pousio	253,74	230,13	283,54	255,80 a	185,87	214,41	167,62	189,30 a
Ervilhaca	244,62	195,93	302,85	247,80 a	207,75	182,08	213,28	201,37 a
Tremoço	232,03	295,61	273,84	267,16 a	*	*	*	*
Nabo	263,71	227,39	152,27	214,46 a	163,61	189,35	130,62	161,19 a
Azevém	260,30	298,12	262,87	273,76 a	180,92	202,74	134,15	172,60 a
Aveia	239,84	183,72	274,02	235,53 a	198,12	129,06	98,21	141,80 a
Trevo	230,30	117,93	178,85	175,30 a	164,68	239,36	138,79	180,94 a
MÉDIA	246,36 A	221,26 A	250,30 A		183,66 A	192,83 A	147,11 A	
C.V.(%)	37,80				49,27			
5-10 cm								
Pousio	206,33	192,59	196,72	198,55 a	76,89	161,48	168,13	135,50 a
Ervilhaca	250,22	161,03	182,14	191,24 a	106,41	178,92	164,28	149,87 a
Tremoço	261,84	230,31	185,82	225,99 a	*	*	*	*
Nabo	293,02	179,19	128,67	199,96 a	101,65	138,09	158,95	132,89 a
Azevém	303,30	192,29	191,29	228,96 a	149,78	156,11	88,69	131,53 a
Aveia	223,17	168,25	173,08	188,17 a	112,23	114,53	132,95	119,90 a
Trevo	242,52	81,18	118,28	150,96 a	137,13	148,30	152,68	146,04 a
MÉDIA	254,55 A	171,98 B	170,49 B		114,01 A	149,57 A	144,28 A	
C.V.(%)	27,26				41,10			
10-20 cm								
Pousio	167,49	162,19	134,02	154,56 a	135,79	116,62	115,98	122,80 a
Ervilhaca	124,70	118,89	124,09	122,56 a	126,29	119,64	88,21	111,38 a
Tremoço	160,36	216,00	122,22	166,19 a	*	*	*	*
Nabo	180,23	203,75	82,57	155,52 a	123,85	150,09	132,71	135,55 a
Azevém	202,51	161,17	101,47	155,05 a	105,83	115,46	90,80	104,03 a
Aveia	156,48	187,75	105,28	149,84 a	114,10	121,69	116,56	117,45 a
Trevo	182,86	87,27	112,64	127,59 a	96,46	92,75	132,51	107,24 a
MÉDIA	167,80 A	162,43 A	111,75 B		117,05 A	119,38 A	112,80 A	
C.V.(%)	33,24				39,94			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

As médias de P no solo extraídas com HCl podem ser observadas na Tabela 9. Essa fração diz respeito ao P ligado ao cálcio (Ca) que formam os fosfatos de Ca precipitados no solo (CROSS; SCHLESINGER, 1995). A partir dos resultados, é possível concluir que, para o ano de 2009, o FN proporcionou maiores valores de P para todas as camadas, exceto na camada de 5-10 na qual o desdobramento dos fatores mostrou que o FN proporcionou mais P no solo apenas onde foi cultivado o trevo, para as outras plantas não foi observada diferença entre as fontes. No entanto, os valores nas camadas 5-10 e 10-20 cm são relativamente baixos, sendo realmente maiores somente na camada de 0-5 cm.

No ano de 2011, na camada de 0-5 cm, o desdobramento dos fatores mostrou que o FN resultou em valores superiores as demais fontes na fração P_{HCl} para todas as culturas, no entanto foi estatisticamente significante apenas quando associado à ervilhaca e ao trevo. Onde foi cultivada aveia provavelmente ocorreu um erro na amostragem do solo, podendo ter sido coletado resíduo do fertilizante junto com a amostra que foi analisada. Nas demais camadas não foram observadas variações entre os tratamentos (Tabela 9). Apesar do teste estatístico aplicado não ter mostrado diferenças entre as fontes para todas as plantas, o que pode ser atribuído ao alto coeficiente de variação desta fração, observa-se que, no ano de 2011, na camada superior, o P extraído com HCl, apresentou valores muito maiores onde foi aplicado FN, o mesmo comportamento pode ser observado se compararmos um ano com o outro, em que, no ano de 2011, os valores obtidos de P são muito maiores que os obtidos em 2009, onde foi aplicado FN. Isso ocorreu devido às altas doses de fosfato natural aplicado no solo todo ano, fazendo com que se acumulasse muito P ligado a cálcio proveniente desse fertilizante, pois sua composição principal é a apatita.

Uma vez que o HCl extrai o P ligado a cálcio, os baixos teores obtidos nesta fração, onde não foi aplicado FN, sugerem que o solo contém baixos níveis destes compostos. Baixos teores desta fração também foram encontrados por Pavinato, Merlin e Rosolem (2009), que estudaram a influência de sistemas de cultivos, no cerrado brasileiro, sob as frações de P no solo, e por Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2003) que avaliaram o efeito de doses crescentes de fosfato solúvel em sistema de plantio direto nas frações de P no solo.

Tabela 9 - Teores de P extraído no solo com ácido clorídrico (HCl) em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mg kg ⁻¹ -----							
0-5 cm								
Pousio	1,70	2,25	6,02	3,32 a	3,30 Aa	4,24 Aa	26,54 Aa	11,24
Ervilhaca	1,85	2,39	5,66	3,48 a	3,96 Ba	10,36 Ba	60,87 Aa	20,59
Tremoço	3,28	3,76	4,23	3,76 a	*	*	*	*
Nabo	2,10	2,42	4,21	2,91 a	4,57 Aa	4,00 Aa	21,34 Aa	9,97
Azevém	2,07	2,66	9,85	4,86 a	3,48 Aa	9,09 Aa	54,95 Aa	22,51
Aveia	2,36	2,12	14,76	6,95 a	4,65 Aa	5,42 Aa	130,68 Aa	46,92
Trevo	3,25	3,43	13,19	6,14 a	3,14 Ba	4,41 Ba	26,17 Aa	11,24
MÉDIA	2,40 B	2,71 B	8,03 A		3,85	6,25	52,98	
C.V.(%)	67,04				135,05			
5-10 cm								
Pousio	2,07 Aa	3,67 Aa	2,25 Ab	2,66	8,08	2,40	3,05	4,51 a
Ervilhaca	2,37 Aa	2,86 Aa	2,36 Ab	2,53	5,53	3,05	9,00	5,86 a
Tremoço	2,51 Aa	2,03 Aa	2,69 Ab	2,41	*	*	*	*
Nabo	2,21 Aa	2,55 Aa	2,78 Ab	2,51	5,64	5,41	5,42	5,49 a
Azevém	2,36 Aa	2,51 Aa	2,47 Ab	2,44	2,52	2,64	11,06	5,41 a
Aveia	2,51 Aa	2,47 Aa	2,29 Ab	2,42	4,16	4,48	4,16	4,27 a
Trevo	2,14 Ba	2,24 Ba	6,79 Aa	3,72	6,27	3,47	6,09	5,28 a
MÉDIA	2,31	2,62	3,09		5,37 A	3,57 A	6,46 A	
C.V.(%)	31,97				85,00			
10-20 cm								
Pousio	2,03	1,99	2,48	2,17 a	3,26	2,40	2,24	2,63 a
Ervilhaca	2,13	1,85	2,93	2,30 a	2,93	3,09	7,15	4,39 a
Tremoço	2,26	1,96	2,48	2,23 a	*	*	*	*
Nabo	2,14	1,99	3,09	2,41 a	2,81	2,73	5,64	3,73 a
Azevém	2,32	2,37	2,79	2,49 a	5,06	3,16	3,43	3,88 a
Aveia	2,14	2,10	2,40	2,21 a	2,32	2,60	2,56	2,49 a
Trevo	2,07	2,33	3,68	2,69 a	3,74	3,69	2,77	3,40 a
MÉDIA	2,15 B	2,08 B	2,83 A		3,35 A	2,94 A	3,96 A	
C.V.(%)	17,65				79,77			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Os teores de P inorgânico extraídos com $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$, estão apresentados na Tabela 10. Pelos valores apresentados, é possível observar que, nos anos de 2009 e 2011, na camada de 0-5 cm, o FN proporcionou maiores teores de P inorgânico nesta fração. Porém, no ano de 2009, na camada de 5-10 cm, ocorreu o inverso, o FN resultou na menor quantidade de P quando comparado aos outros tratamentos. A maior quantidade de P inorgânico que foi observada sob aplicação de FN na camada de 0-5 cm, em ambos os anos, pode ser atribuída à baixa solubilidade desse fertilizante, fazendo com que grande parte do P proveniente desse fosfato se encontre indisponível para as plantas. Quanto às plantas de cobertura, foi observado efeito na camada de 0-5 cm, apenas no ano de 2011, onde a ervilhaca proporcionou o maior teor de P no solo, porém o valor observado na ervilhaca diferiu apenas do observado na aveia, sendo semelhante às demais espécies e também ao pousio.

O P extraído nesta fração $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ é tido, de modo geral, como não-lábil, pois ele se encontra no solo protegido no interior dos microagregados, sendo de difícil reversibilidade (CROSS; SCHLESINGER, 1995). Assim, efeitos das plantas de cobertura nesta fração não eram esperados e discordam dos resultados evidenciados por Tiecher et al. (2012) em que o cultivo de diferentes espécies de plantas não alterou o teor de P extraído com $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$. No entanto, essa alteração na fração de P inorgânico não foi tão expressiva assim que possa mostrar uma tendência clara com as espécies, pois a maioria promoveu redução nesta fração, em valores absolutos, quando comparado com o pousio.

Desdobrando a interação dos fatores estudados no ano de 2009, na camada de 10-20 cm, observa-se que houve diferença entre as plantas apenas quando sem aplicação de P, em que o nabo proporcionou os maiores teores de P inorgânico diferindo do pousio, do tremoço e da ervilhaca. A ervilhaca, o tremoço, o nabo, o azevém e a aveia proporcionaram mais P inorgânico no solo quando associadas com o FN, porém os resultados obtidos com o tremoço e o nabo não diferiram dos valores encontrados onde foi aplicado o SPS e sem P, respectivamente. Nas camadas mais profundas (5-10 e 10-20 cm), no ano de 2011, não foi observado efeito dos tratamentos sobre o $\text{Pi}_{\text{HID-0,5}}$ (Tabela 10).

Quanto ao teor de P orgânico extraído com $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (Tabela 11), os valores foram maiores em 2009 com a aplicação de FN (camada de 0-5 cm), não diferindo da média quando sem P, já na camada de 10-20 cm o FN proporcionou os menores teores de P nesta fração. No ano de 2011 o FN também proporcionou melhor resultado nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, não diferindo do SPS na camada de 5-10 cm e sendo semelhante aos demais na camada de 10-20 cm.

Tabela 10 – Teores de P inorgânico extraído com hidróxido de sódio 0,5 mol L⁻¹ (NaOH-0,5 mol L⁻¹) em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mg kg ⁻¹ -----							
0-5 cm								
Pousio	78,42	89,20	136,49	101,37 a	134,27	106,75	197,72	146,25 ab
Ervilhaca	88,83	79,02	145,90	104,58 a	132,50	135,77	179,67	149,31 a
Tremoço	77,33	103,74	128,80	103,29 a	*	*	*	*
Nabo	90,23	85,08	92,67	89,33 a	113,19	105,66	154,13	124,33 ab
Azevém	91,68	105,96	123,84	107,16 a	102,38	95,38	173,30	123,69 ab
Aveia	101,69	92,89	131,28	108,62 a	99,38	69,19	142,85	103,81 b
Trevo	95,96	60,93	93,01	82,08 a	94,66	106,75	129,54	110,32 ab
MÉDIA	89,16 B	88,16 B	123,14 A		112,73 B	103,25 B	162,87 A	
C.V.(%)	26,60				25,24			
5-10 cm								
Pousio	109,55	86,89	80,39	92,28 a	90,14	102,91	138,50	110,52 a
Ervilhaca	89,02	75,27	80,31	81,53 a	115,15	98,78	114,32	109,42 a
Tremoço	116,82	80,56	83,56	93,64 a	*	*	*	*
Nabo	107,33	88,69	73,25	91,81 a	85,01	94,84	102,95	94,27 a
Azevém	90,23	121,53	72,70	94,81 a	97,70	103,50	101,42	100,88 a
Aveia	85,35	97,75	80,39	87,83 a	86,39	96,66	102,62	95,22 a
Trevo	96,30	86,98	70,45	86,24 a	88,80	96,65	92,79	92,75 a
MÉDIA	99,22 A	91,30 A	77,86 B		93,86 A	98,89 A	108,76 A	
C.V.(%)	18,08				24,54			
10-20 cm								
Pousio	65,60 Ab	61,15 Aa	146,06 A a	90,94	80,41	106,35	106,40	97,72 a
Ervilhaca	58,37 Bb	60,02 Ba	140,17 Aa	86,19	97,51	99,97	102,48	99,98 a
Tremoço	53,55 Bb	67,73 ABa	94,36 Aa	71,88	*	*	*	*
Nabo	106,48 Aa	69,27 Ba	96,01 ABa	90,59	94,17	92,41	80,11	88,90 a
Azevém	84,84 Bab	58,35 Ba	148,77 Aa	90,89	81,16	84,18	78,14	81,16 a
Aveia	79,62 Bab	77,74 Ba	133,87 Aa	97,08	95,15	108,02	84,53	95,90 a
Trevo	79,36 Aab	85,66 Aa	71,40 Aa	78,69	119,05	82,65	84,73	95,48 a
MÉDIA	75,40	68,56	117,10		94,57 A	95,59 A	89,39 A	
C.V.(%)	27,69				24,91			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Tabela 11 – Teores de P orgânico extraído com hidróxido de sódio 0,5 mol L⁻¹ (NaOH-0,5 mol L⁻¹) em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
----- mg kg ⁻¹ -----								
0-5 cm								
Pousio	210,36	196,44	303,40	236,72 a	45,45	104,37	182,89	110,90 a
Ervilhaca	173,90	158,07	209,20	176,78 a	61,30	94,56	234,33	130,06 a
Tremoço	197,88	246,59	364,20	257,72 a	*	*	*	*
Nabo	214,26	182,81	258,80	218,64 a	92,64	101,12	158,25	117,34 a
Azevém	235,42	261,96	468,30	321,89 a	79,70	101,18	230,45	137,11 a
Aveia	200,92	160,20	295,40	218,83 a	84,68	116,66	143,08	114,81 a
Trevo	249,35	131,78	265,80	226,11 a	100,22	122,78	164,27	129,09 a
MÉDIA	211,73 AB	194,09 B	311,66 A		77,33 B	106,78 B	185,55 A	
C.V.(%)	56,72				59,03			
5-10 cm								
Pousio	172,95	187,45	197,71	186,04 a	69,03	74,64	52,05	65,24 a
Ervilhaca	134,44	208,98	225,44	187,20 a	37,77	100,42	106,55	81,58 a
Tremoço	258,63	220,78	219,67	233,03 a	*	*	*	*
Nabo	219,14	298,08	201,99	239,73 a	47,15	82,17	95,51	72,37 a
Azevém	273,30	253,30	229,91	252,17 a	95,01	76,22	114,08	95,10 a
Aveia	244,89	246,93	209,02	233,61 a	41,54	46,77	113,91	67,41 a
Trevo	245,87	122,76	199,71	188,17 a	95,79	60,93	121,57	92,76 a
MÉDIA	221,32 A	220,29 A	212,53 A		64,38 B	73,52 AB	100,91 A	
C.V.(%)	34,76				48,81			
10-20 cm								
Pousio	142,17	170,48	43,06	118,57 a	110,14	45,22	51,33	68,90 a
Ervilhaca	114,83	150,59	30,89	92,29 a	91,96	54,85	64,68	70,50 a
Tremoço	124,68	175,20	77,78	125,89 a	*	*	*	*
Nabo	133,95	196,27	80,44	143,94 a	85,55	76,55	140,75	100,95 a
Azevém	185,73	191,91	29,79	128,80 a	99,38	56,48	70,72	75,53 a
Aveia	163,94	160,17	19,34	114,48 a	48,85	61,95	65,96	58,92 a
Trevo	166,71	93,46	63,47	107,88 a	57,52	50,55	85,25	64,44 a
MÉDIA	147,43 A	161,67 A	47,69 B		82,23 A	57,60 A	79,78 A	
C.V.(%)	31,99				56,98			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Ao observar conjuntamente os resultados de P inorgânico e orgânico (Tabelas 10 e 11) extraídos com NaOH 0,5 mol L⁻¹ é possível notar que, do ano de 2009 para o ano de 2011, independente das fontes de fertilizantes fosfatadas aplicadas, o teor de P inorgânico aumentou e o de P orgânico reduziu, indicando que pode ter havido transformação de formas de P inorgânico de menor labilidade dentro desta fração, principalmente do P inorgânico proveniente do FN, onde o aumento foi mais acentuado, e mineralização do P orgânico para outros compartimentos do solo. Gatiboni et al. (2007), ao estudarem a biodisponibilidade das formas de P acumuladas em um solo cultivado sob sistema de plantio direto com diferentes quantidades de P adicionado, observaram tendência semelhante nestas frações.

Quanto ao residual de P remanescente após a extração de todas essas frações anteriores, observa-se que, tanto no ano de 2009 como no ano de 2011, as quantidades de P residual foram influenciadas significativamente pelos tratamentos na camada de 10-20 cm, assim, observa-se maiores quantidades de P residual nessa camada nos tratamentos que receberam FN (Tabela 12), não tendo diferença entre os resultados encontrados para o SPS e o controle, apenas onde foi cultivado ervilhaca e trevo, no ano de 2009. Observa-se também que em 2009 somente onde não foi aplicado fertilizante não foi observado variação entre as plantas. Já em 2011 não houve efeito das plantas de cobertura nesta camada. Provavelmente essa variação seja consequência da variabilidade na amostragem do solo que do tratamento, pois na camada de 5-10 cm não foi observado efeito em ambos os anos, nem da fonte fosfatada e nem das plantas de cobertura.

Na camada de 0-5 cm, no ano de 2009 não houve efeito dos tratamentos sobre o P residual. No entanto, no ano de 2011 os maiores teores de P na fração residual foram encontrados nos tratamentos que receberam FN (Tabela 12). Este resultado era esperado devido ao acúmulo de P proveniente dos FN aplicado ao solo superficialmente ao longo dos anos de cultivo. Observa-se também que a fração de P residual foi aumentada ao longo dos anos avaliados, tanto nos tratamentos que receberam fertilizantes quanto onde não foi aplicado P, indicando que tanto o P já presente no solo quanto o P adicionado via fertilizantes são acumulados ou transformado em formas não lábeis. Este resultado discorda dos encontrados por Gatiboni et al. (2007) onde a fração de P residual obtida por digestão sulfúrica não foi aumentada pela adição de doses crescentes de fertilizantes. Este mesmo autor ainda verificou que após doze cultivos sucessivos sem adubação houve diminuição desta fração no solo indicando que até mesmo o P residual pode se tornar fonte às plantas quando há deficiência expressiva de P.

Tabela 12 - Estimativa dos teores de P no solo para a fração residual, obtidas através da diferença entre a somatória das frações do fracionamento e o P total em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mg kg ⁻¹ -----							
0-5 cm								
Pousio	297,40	467,08	346,90	370,46 a	537,08	699,58	950,00	701,30 a
Ervilhaca	344,55	380,65	826,90	517,36 a	405,97	608,61	641,20	531,10 a
Tremoço	295,68	533,16	346,90	391,75 a	*	*	*	*
Nabo	358,37	336,72	272,90	327,75 a	478,09	553,77	1085,00	734,10 a
Azevém	346,55	352,19	481,40	393,38 a	729,28	657,73	1222,80	920,30 a
Aveia	461,17	425,33	492,90	464,09 a	578,38	695,60	1177,10	846,80 a
Trevo	419,99	254,48	99,30	298,43 a	601,44	629,23	1100,70	736,70 a
MÉDIA	361,71 A	404,27 A	434,69 A		546,99 B	641,70 B	1055,88 A	
C.V.(%)	39,51				29,79			
5-10 cm								
Pousio	474,03	270,10	310,81	351,85 a	666,30	495,28	540,80	570,79 a
Ervilhaca	327,86	263,90	335,40	312,83 a	625,20	407,42	692,10	574,93 a
Tremoço	306,41	258,90	369,58	311,62 a	*	*	*	*
Nabo	263,42	299,00	334,77	294,59 a	631,10	527,65	518,50	554,61 a
Azevém	225,03	333,20	303,95	287,38 a	497,70	607,31	420,10	519,41 a
Aveia	322,67	398,80	428,73	383,39 a	612,20	599,89	465,40	559,16 a
Trevo	294,56	493,00	121,90	331,94 a	399,10	578,65	543,30	520,61 a
MÉDIA	315,70 A	326,08 A	335,38 A		579,04 A	536,08 A	537,43 A	
C.V.(%)	30,98				33,51			
10-20 cm								
Pousio	329,01 ABa	253,94 Bab	402,82 Ab	328,59	415,77 Ba	519,78 ABa	720,59 Aa	556,08
Ervilhaca	305,69 Aa	369,40 Aa	441,03 Ab	372,04	460,81 Aa	602,86 Aa	601,60 Aa	555,09
Tremoço	247,62 Ba	178,16 Bb	455,16 Aab	299,40	*	*	*	*
Nabo	310,83 Ba	286,34 Bab	477,14 Aab	343,23	467,93 Ba	718,27 Aa	582,70 ABa	589,63
Azevém	298,66 Ba	290,69 Bab	452,42 Aab	340,31	602,75 Aa	575,45 Aa	635,78 Aa	609,10
Aveia	372,01 Ba	215,43 Cab	501,66 Aab	363,03	581,04 Aa	534,11 Aa	581,06 Aa	565,40
Trevo	305,10 Aa	304,30 Aab	588,21 Aa	352,02	607,29 Aa	617,68 Aa	565,83 Aa	594,34
MÉDIA	313,34	262,80	463,02		525,02	590,03	617,40	
C.V.(%)	15,15				13,91			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

4.2 Teor de P total no solo

Os teores de P total obtidos nos anos de 2009 e 2011 estão apresentados na tabela 13. Não houve interações entre os fatores estudados para os resultados de P_{total} . Observa-se que tanto em 2009 quanto em 2011 o FN proporcionou maior teor de P no solo na camada de 0-5 cm. No ano de 2009, na camada de 5-10 cm, o FN e o SPS proporcionaram as maiores quantidades de P, já na camada mais profunda, o SPS resultou no menor valor de P. Em geral, o conteúdo de P total obtido é bastante elevado, isso pode ser atribuído à composição mineralógica deste solo, resultado do intemperismo do material de origem (basalto), onde, na análise mineralógica de raios-X se identificaram minerais como caulinita, gibbsita e hematita (figura 2 e 3), esses minerais são capazes de fixar o P, fazendo com que este solo consiga armazenar grandes quantidades de P em frações pouco solúveis, como mostra a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) na figura 4.

Aumentos significativos nos teores do P total no solo foram observados apenas onde foi aplicado FN, principalmente no ano de 2011, na camada superior, pois, como boa parte do P presente no FN é pouco solúvel no solo, houve efeito cumulativo deste P aplicado (Tabela 13). Os maiores valores de P são observados na camada superior, isso porque não ocorreu a incorporação dos fertilizantes aplicados na superfície do solo e também pela reciclagem proporcionada pelas plantas, que absorvem o P disponível de camadas mais profundas, deixando-o na superfície após a decomposição dos seus resíduos.

Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2003), avaliando o efeito de doses crescentes de fosfato solúvel em plantio direto em um Latossolo Vermelho, também observaram altos valores de P total, variando de 763 à 1089 mg kg⁻¹. Esses valores, de modo geral, aumentaram com o aumento da dose de P aplicada, o que evidencia as interações químicas de alta energia de ligação que ocorrem entre o fosfato e os constituintes dos argilominerais de solos altamente intemperizados.

Tabela 13 - Teores de P total no solo, obtidos por digestão com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	-----mg kg ⁻¹ -----							
0-5 cm								
Pousio	916,52	1050,60	1152,20	1039,90 a	998,60	1222,90	1885,00	1368,90 a
Ervilhaca	1099,83	1072,10	1377,60	1210,90 a	883,69	1187,40	2019,10	1363,40 a
Tremoço	1058,79	1218,10	1248,10	1189,50 a	*	*	*	*
Nabo	1006,80	1103,90	1021,90	1038,90 a	1001,33	1026,00	1657,90	1228,40 a
Azevém	1015,01	1108,00	1422,60	1181,90 a	1146,33	1294,10	1915,10	1451,80 a
Aveia	1077,93	1075,20	1283,60	1154,40 a	1045,10	1075,20	1789,30	1303,20 a
Trevo	1061,52	943,90	1876,70	1394,10 a	1023,22	1198,30	2057,40	1426,30 a
MÉDIA	1028,98 B	1098,53 B	1356,29 A		1016,38 B	1167,31 B	1887,30 A	
C.V.(%)	19,48				20,46			
5-10 cm								
Pousio	1020,48	785,20	837,18	880,95 a	984,92	911,05	1015,00	970,32 a
Ervilhaca	939,78	808,50	878,22	875,87 a	987,65	870,01	1203,80	1020,48 a
Tremoço	1015,06	850,90	916,52	927,48 a	*	*	*	*
Nabo	968,50	919,10	915,15	936,66 a	963,03	927,46	993,10	961,20 a
Azevém	967,46	971,20	861,80	933,50 a	954,82	1050,58	938,40	981,27 a
Aveia	935,67	963,00	946,62	948,44 a	932,93	927,46	935,70	932,02 a
Trevo	946,61	901,30	828,97	911,92 a	856,33	976,71	1004,10	945,70 a
MÉDIA	972,04 A	888,84 B	887,79 B		946,61 A	943,88 A	1015,01 A	
C.V.(%)	11,36				14,66			
10-20 cm								
Pousio	741,42	683,97	776,03	733,81 a	837,18	889,20	1075,20	933,85 a
Ervilhaca	730,48	771,52	820,10	780,61 a	870,01	946,60	924,70	913,78 a
Tremoço	771,52	678,50	820,10	754,85 a	*	*	*	*
Nabo	779,72	798,88	804,19	793,02 a	845,38	1135,40	1160,00	1046,93 a
Azevém	828,97	800,25	815,21	816,83 a	875,48	979,40	957,60	937,49 a
Aveia	809,82	672,34	827,44	769,87 a	886,42	886,40	927,50	900,10 a
Trevo	774,25	694,03	991,46	783,71 a	930,20	949,40	968,50	949,35 a
MÉDIA	779,29 A	724,03 B	821,25 A		874,11 A	964,40 A	1002,24 A	
C.V.(%)	7,39				18,30			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

4.3 Distribuição das frações de P de acordo com a labilidade

As frações de P no solo extraídas pela técnica de fracionamento foram agrupadas de acordo com sua labilidade e analisadas estatisticamente para verificar se houve efeito significativo dos fatores nos diferentes compartimentos do solo. Para isso, assumiu-se que o P lábil é extraído pela RTA e pelo NaHCO_3 (inorgânico e orgânico), enquanto que o NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (Pi e Po) e o HCl extraem o P moderadamente lábil e o P não-lábil é extraído pelo NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (Pi e Po) e pela digestão final com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ (Pi e Po). Esse agrupamento foi realizado baseado no trabalho de Cross e Schlesinger (1995). Segundo esses autores a resina trocadora de ânions (RTA) e o NaHCO_3 extraem as frações lábeis de P inorgânico e P inorgânico e orgânico, respectivamente. O NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ representam, em geral, o P inorgânico ligado aos óxidos e às argilas silicatadas, com energia de ligação intermediária, e o P orgânico de frações moderadamente lábeis. O HCl extrai o P inorgânico contido nos fosfatos de cálcio.

A utilização de ultrasonificação em conjunto com o NaOH extrai o fósforo inorgânico e orgânico química e fisicamente protegidos nas superfícies internas dos microagregados. E, por fim, a digestão do solo com H_2SO_4 e H_2O_2 extrai o P residual, na qual se encontra o que sobrou no solo de P inorgânico e orgânico e que, teoricamente, não contribui para a nutrição das plantas. Assim, no presente trabalho, optou-se pelo agrupamento da fração extraída por NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (Pi e Po) em não-lábil devido a modificação realizada por Condrón, Goh e Newman (1985) no método de fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), onde houve mudança na ordem de extração do procedimento e pela fração corresponder ao P protegido por intra-agregados do solo, a qual apenas seria considerada de labilidade moderada em casos de esgotamento de formas mais lábeis de P.

A análise de variância para os compartimentos de P no solo (Tabela 14) apresentou interação entre os fatores estudados no ano de 2009, na camada de 10-20 cm, para as formas lábeis, e nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, para as formas não lábeis. As plantas de cobertura influenciaram significativamente apenas o compartimento de P não lábil do solo, no ano de 2011, na camada de 0-5 cm. No ano de 2009, as fontes de fertilizantes influenciaram significativamente, as formas de P lábil, na camada de 5-10 cm, as formas de P moderadamente lábil, nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, e as formas de P não lábil, na camada de 0-5 cm. No ano de 2011 foi observado efeito de fontes nas camadas de 0-5 e 10-20 cm, para as formas de P lábil, e na camada de 0-5 cm para as formas de P não lábeis.

Tabela 14 - Análise da variância para os compartimentos de P no solo de acordo com a labilidade em função de fontes de fertilizantes fosfatados e plantas de cobertura

Causa de Variação	2009			2011		
	P lábil	P moderadamente lábil	P não lábil	P lábil	P moderadamente lábil	P não lábil
0-5 cm						
FFF	*	ns	*	*	ns	*
PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FFF*PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns
5-10 cm						
FFF	*	*	ns	ns	ns	ns
PC	*	ns	ns	ns	ns	ns
FFF*PC	ns	ns	*	ns	ns	ns
10-20 cm						
FFF	*	*	*	*	ns	ns
PC	*	ns	*	ns	ns	ns
FFF*PC	*	ns	*	ns	ns	ns

* - significativo a 5% pelo Teste F; ns - não significativo

FFF= fonte de fertilizantes fosfatados; PC= plantas de cobertura

Os resultados para os compartimentos de P lábil, moderadamente lábil e não lábil estão apresentados nas Tabelas 15, 16 e 17, respectivamente. Observa-se, então, que o fósforo considerado disponível para as plantas (P lábil) teve pouca participação no P total presente no solo. A pequena quantidade de P lábil evidencia que existe competição entre as plantas, os organismos do solo e o próprio solo pelo P proveniente dos fertilizantes.

As plantas de cobertura não influenciaram os teores de P lábil, à exceção do trevo que, na camada de 10-20 cm, no ano de 2009, proporcionou maiores teores de P comparado às outras plantas, quando associado ao SPS. Ao comparar os dois anos avaliados, nota-se que houve acumulação do P aplicado via fertilizante no ano de 2011 neste compartimento. Onde não foi aplicado P também foi observada essa tendência, em menor intensidade, o que comprova a provável contribuição das plantas de cobertura em solubilizar o P de formas de menor labilidade (Tabela 15).

Quando agrupadas, observa-se que as formas de P moderadamente lábeis não foram influenciadas pelos tratamentos, uma vez que não foram observadas diferenças significativas para as plantas de cobertura nem para as fontes de fertilizantes fosfatadas, à exceção dos resultados obtidos nas camadas 5-10 e 10-20 cm, no ano de 2009, onde o FN proporcionou menores teores de P (Tabela 16).

Tabela 15 - Teores de P lábil no solo em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mg kg ⁻¹ -----							
	0-5 cm							
Pousio	42,69	34,70	47,06	41,48 a	57,82	61,33	127,14	76,47 a
Ervilhaca	50,44	48,45	58,97	53,52 a	41,30	71,10	85,87	65,47 a
Tremoço	40,76	64,16	56,33	54,11 a	*	*	*	*
Nabo	45,35	54,05	40,56	46,46 a	45,50	48,72	79,01	59,28 a
Azevém	41,93	61,52	54,53	52,66 a	55,02	73,52	69,00	66,30 a
Aveia	39,03	44,78	52,89	45,66 a	39,48	40,52	53,39	45,09 a
Trevo	45,18	44,83	69,79	51,24 a	37,07	67,50	128,36	71,31 a
MÉDIA	43,32 A	50,42 A	53,34 A		45,91 B	58,97 B	85,80 A	
C.V.(%)	24,17				46,35			
	5-10 cm							
Pousio	33,94	26,99	31,25	30,73 a	44,92	56,11	51,51	50,85 a
Ervilhaca	36,36	28,37	31,81	32,13 a	73,51	51,65	84,09	69,75 a
Tremoço	40,78	38,24	33,29	37,43 a	*	*	*	*
Nabo	50,01	38,07	29,23	40,33 a	64,21	53,70	51,12	55,36 a
Azevém	45,33	39,39	37,58	40,76 a	73,19	69,20	116,14	82,43 a
Aveia	35,61	26,71	31,19	31,17 a	50,76	44,50	87,86	61,04 a
Trevo	36,74	27,11	42,46	34,48 a	65,49	61,82	55,59	60,40 a
MÉDIA	40,00 A	32,58 B	33,12 B		61,66 A	56,16 A	71,93 A	
C.V.(%)	19,98				48,54			
	10-20 cm							
Pousio	20,81 Aa	20,76 Ab	26,90 Aa	22,82	70,88	22,12	44,30	45,77 a
Ervilhaca	22,93 ABa	19,19 Bb	49,18 Aa	30,43	51,11	23,90	47,30	42,88 a
Tremoço	27,98 Aa	23,99 Ab	42,60 Aa	31,96	*	*	*	*
Nabo	25,63 Aa	23,20 Ab	25,53 Aa	24,69	43,08	45,68	35,39	42,13 a
Azevém	33,87 Aa	21,84 Ab	34,90 Aa	30,72	18,78	34,91	44,31	34,33 a
Aveia	22,17 Ba	18,83 Bb	52,97 Aa	31,32	23,35	25,02	55,63	34,67 a
Trevo	24,27 Ba	55,47 Aa	64,76 Aa	41,42	23,02	34,24	70,21	43,52 a
MÉDIA	25,37	25,18	40,71		39,52 AB	30,96 B	50,35 A	
C.V.(%)	28,59				51,18			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Tabela 16 - Teores de P moderadamente lábil no solo em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mg kg ⁻¹ -----							
0-5 cm								
Pousio	287,64	263,15	318,33	289,71 a	223,98	250,91	241,40	238,77 a
Ervilhaca	350,42	245,27	329,84	303,27 a	242,62	226,97	398,50	275,72 a
Tremoço	269,07	336,73	305,56	303,79 a	*	*	*	*
Nabo	298,60	262,68	186,90	249,39 a	186,69	216,68	181,50	194,97 a
Azevém	299,44	326,40	294,48	306,77 a	202,60	252,91	219,60	225,04 a
Aveia	275,13	274,23	311,26	288,45 a	225,33	153,23	272,90	217,15 a
Trevo	265,90	201,27	216,49	233,32 a	189,83	272,06	213,10	225,01 a
MÉDIA	289,41 A	276,51 A	283,61 A		211,84 A	228,79 A	246,04 A	
C.V.(%)	30,14				41,77			
5-10 cm								
Pousio	230,01	213,16	217,01	220,06 a	114,52	182,09	203,74	166,79 a
Ervilhaca	274,84	184,49	205,26	214,86 a	135,99	211,74	206,69	184,81 a
Tremoço	292,41	252,38	210,42	251,74 a	*	*	*	*
Nabo	328,59	195,33	151,08	225,00 a	129,11	169,10	198,49	165,57 a
Azevém	333,57	223,86	217,67	258,37 a	191,22	194,34	135,66	173,74 a
Aveia	247,15	192,86	197,27	212,43 a	142,06	139,64	165,87	149,19 a
Trevo	273,15	109,45	150,85	181,19 a	167,25	178,38	190,78	178,81 a
MÉDIA	283,22 A	195,93 B	194,89 B		146,69 A	179,22 A	183,54 A	
C.V.(%)	25,46				33,99			
10-20 cm								
Pousio	183,83	177,64	157,19	172,89 a	159,97	142,12	152,59	151,56 a
Ervilhaca	151,18	136,00	149,65	145,61 a	154,65	143,82	113,88	137,45 a
Tremoço	249,84	233,41	150,20	206,31 a	*	*	*	*
Nabo	202,84	223,79	100,34	175,65 a	149,53	190,24	168,35	169,37 a
Azevém	225,88	175,23	120,75	173,95 a	134,23	137,33	128,60	133,39 a
Aveia	172,08	200,16	126,13	166,12 a	138,04	157,32	140,28	145,21 a
Trevo	198,81	107,77	140,46	149,01 a	123,33	116,24	162,48	134,02 a
MÉDIA	195,18 A	179,14 A	134,96 B		143,29 A	147,85 A	144,36 A	
C.V.(%)	27,28				38,29			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Tabela 17 - Teores de P não lábil no solo em função das fontes fosfatadas e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mg kg ⁻¹ -----							
	0-5 cm							
Pousio	586,18	752,72	786,80	708,56 a	716,80	910,70	1372,30	953,40 ab
Ervilhaca	698,97	698,33	1185,90	861,06 a	599,76	874,94	1123,50	828,00 b
Tremoço	667,05	938,45	818,60	808,04 a	*	*	*	*
Nabo	662,85	699,62	733,70	693,61 a	713,56	760,56	1397,40	987,60 ab
Azevém	673,64	720,11	1073,50	822,43 a	916,04	875,34	1626,50	1208,90 a
Aveia	763,77	756,19	919,50	820,27 a	763,51	881,45	1463,00	1070,00 ab
Trevo	785,71	594,77	910,60	769,19 a	796,31	858,76	1500,20	995,70 ab
MÉDIA	686,82 B	746,56 A	920,40 A		741,65 B	858,44 B	1430,17 A	
C.V.(%)	20,46				22,21			
	5-10 cm							
Pousio	756,53 Aa	545,04 Aa	588,92 Aa	630,16	825,50	672,84	753,50	750,25 a
Ervilhaca	628,58 Aa	553,36 Aa	641,14 Aa	612,47	778,20	606,63	913,00	765,93 a
Tremoço	681,86 Aa	560,23 Aa	672,81 Aa	638,30	*	*	*	*
Nabo	589,90 Aa	685,74 Aa	690,13 Aa	650,90	764,00	704,66	713,40	724,10 a
Azevém	588,56 Aa	707,98 Aa	606,55 Aa	634,36	690,40	787,04	692,90	727,28 a
Aveia	652,90 Aa	743,46 Aa	718,14 Aa	704,83	740,10	743,32	681,90	721,79 a
Trevo	636,72 Aa	743,82 Aa	554,51 Aa	658,72	621,50	736,50	757,70	715,71 a
MÉDIA	648,83	648,51	645,41		742,09 A	708,50 A	758,51 A	
C.V.(%)	12,94				22,56			
	10-20 cm							
Pousio	536,78 ABa	485,57 Babc	591,94 Ab	538,10	606,32	688,67	878,32	728,91 a
Ervilhaca	524,45 Aa	584,39 Aa	608,30 Ab	572,38	649,19	755,51	775,36	726,69 a
Tremoço	493,70 ABa	421,10 Bc	627,30 Ab	516,58	*	*	*	*
Nabo	551,26 Ba	551,89 Bab	655,78 Aab	577,62	659,56	935,88	720,74	772,06 a
Azevém	569,23 Aa	547,13 Aabc	626,19 Ab	579,19	771,64	745,97	784,65	769,88 a
Aveia	615,57 Aa	453,34 Bbc	654,87 Aab	574,60	725,03	704,08	731,55	720,22 a
Trevo	551,18 Ba	526,23 Babc	757,10 Aa	577,18	783,85	793,07	735,81	768,14 a
MÉDIA	553,07	502,84	635,00		700,43 A	765,42 A	773,95 A	
C.V.(%)	7,25				12,51			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

*Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

O P não lábil representou a maior parte do P total do solo em ambos os anos (Tabela 17), estes resultados estão de acordo com a CMAP obtida para este solo (Figura 4) e comprovam sua alta capacidade de fixar P. Esses resultados podem ser atribuídos ao alto teor de argila deste solo, mais de 70% (Tabela 1), à sua mineralogia (Figura 2 e 3) e aos altos teores de óxidos de Fe (Tabela 2).

De maneira geral, observa-se que, ao longo do tempo, ocorreu aumento dos teores de P no solo em formas lábeis e não lábeis, e diminuição das formas moderadamente lábeis, em todas as camadas (Tabela 18). A partir disso, pode-se dizer que as formas moderadamente lábeis podem ter contribuído com o fornecimento de P para as plantas e, ainda, que ocorreu transformação de parte do P desse compartimento para formas não lábeis. É possível observar também, que o P aplicado via fertilizante se acumula no solo, principalmente, em formas de menor labilidade.

Tabela 18 – Porcentagens médias dos compartimentos de P no solo, por camada, em função das fontes de fertilizantes fosfatados e plantas de cobertura do solo

P lábil		P moderadamente lábil		P não lábil	
2009	2011	2009	2011	2009	2011
----- % -----					
0-5 cm					
4,31	4,89	27,00	18,13	68,40	75,69
5-10 cm					
3,86	6,53	25,56	17,70	70,58	75,21
10-20 cm					
3,83	4,32	23,64	15,27	72,44	79,51

4.4 Atributos químicos do solo

A análise de variância para os atributos químicos do solo (pH, H+Al, Ca, Mg e K) mostrou que não houve interação entre os fatores estudados, exceto para o pH, na camada de 0-5 cm, no ano de 2011 (Tabela 19). As fontes de fertilizantes fosfatados proporcionaram diferenças significativas para as seguintes variáveis analisadas: K, na camada de 0-5 cm, Mg, na camada de 5-10 cm e Ca, na camada de 10-20 cm, no ano de 2009; e Ca, Mg, pH e H+Al, na camada de 0-5 cm, no ano de 2011. Houve efeito de plantas de cobertura somente para os teores de Ca na camada de 0-5 cm, no ano de 2011.

Tabela 19 - Análise da variância para os atributos químicos do solo, pH, acidez potencial (H+Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) em função de fontes de fertilizantes fosfatados e plantas de cobertura

Causa de Variação	2009					2011				
	pH	H ⁺ +Al	Ca	Mg	K	pH	H ⁺ +Al	Ca	Mg	K
0-5 cm										
FFF	ns	ns	ns	ns	*	*	*	*	*	ns
PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
FFF*PC	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
5-10 cm										
FFF	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FFF*PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
10-20 cm										
FFF	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
FFF*PC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

* - significativo a 5% pelo Teste F; ns - não significativo

FFF= fonte de fertilizantes fosfatados; PC= plantas de cobertura

No ano de 2009 não houve efeito dos tratamentos sobre o pH do solo em nenhuma das camadas avaliadas, porém, é possível observar pequena tendência de acidificação em profundidade, o que pode ser atribuído ao sistema de plantio direto, no qual não há incorporação dos corretivos no solo, promovendo, assim, esse gradiente (Tabela 20). Em 2011, este comportamento não foi observado. Neste ano, o desdobramento dos fatores, na camada de 0-5 cm, mostrou que as plantas de cobertura proporcionaram variação no pH apenas onde não foi aplicado fertilizante fosfatado, o maior valor de pH foi observado onde foi cultivado trevo, porém este valor diferiu apenas do valor encontrado para o nabo. Ao compararmos o efeito das fontes de fertilizantes associado a cada planta de cobertura sobre o pH, observa-se que o nabo e a aveia preta foram superiores quando associadas ao FN, sendo que os valores obtidos com o nabo não diferiram entre o FN e o SPS.

Avaliando o efeito do tempo de cultivo no pH do solo, é possível constatar que houve diminuição do pH, independente do tratamento, nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm), do ano de 2009 para o ano de 2011 (Tabela 20). Porém, onde não recebeu fertilizante fosfatado esta acidificação foi mais pronunciada. A acidificação do solo é uma causa natural ao longo do tempo, mas isso pode ter sido intensificado pela exportação de cátions básicos pelas culturas (ex. Ca), nutriente presente nos fertilizantes fosfatados estudados, ou ainda devido ao acúmulo de matéria orgânica no solo, uma vez que a matéria orgânica é considerada uma fonte de acidificação do solo, por liberar íons H⁺ associados aos ânions orgânicos (LOSS; RITCHIE; ROBSON, 1993).

Tabela 20 - Valores de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ do solo em função de fontes de fertilizantes fosfatado e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
0-5 cm								
Pousio	5,48	5,52	5,43	5,47 a	4,59 Aab	5,07 Aa	5,30 Aa	4,98
Ervilhaca	5,32	5,31	5,37	5,34 a	4,71 Aab	4,77 Aa	4,98 Aa	4,82
Tremoço	5,47	5,22	5,40	5,35 a	*	*	*	*
Nabo	5,14	5,38	5,40	5,28 a	4,41 Bb	4,93 ABa	5,17 Aa	4,84
Azevém	5,26	5,37	5,46	5,36 a	4,56 Aab	4,90 Aa	5,67 Aa	5,04
Aveia	5,58	5,80	5,65	5,66 a	4,70 Cab	4,99 Ba	5,31 Aa	5,00
Trevo	5,55	5,45	5,36	5,49 a	5,04 Aa	4,85 Aa	5,05 Aa	4,98
MÉDIA	5,40 A	5,42 A	5,45 A		4,67	4,92	5,24	
C.V.(%)	5,86				4,96			
5-10 cm								
Pousio	5,12	5,33	5,35	5,26 a	5,04	5,16	4,98	5,06 a
Ervilhaca	5,42	5,17	5,17	5,24 a	4,94	4,96	4,98	4,96 a
Tremoço	5,36	5,05	5,36	5,26 a	*	*	*	*
Nabo	4,97	5,57	5,45	5,25 a	4,68	5,25	5,04	4,99 a
Azevém	5,09	5,42	5,28	5,26 a	4,97	4,93	5,73	5,21 a
Aveia	5,51	5,51	5,42	5,48 a	4,94	5,32	5,29	5,18 a
Trevo	5,47	4,97	5,28	5,27 a	5,29	5,02	5,12	5,14 a
MÉDIA	5,24 A	5,31 A	5,33 A		4,98 A	5,10 A	5,19 A	
C.V.(%)	7,33				7,19			
10-20 cm								
Pousio	4,98	5,13	4,83	4,98 a	5,05	5,10	4,88	5,01 a
Ervilhaca	5,13	4,98	5,09	5,07 a	4,84	4,85	4,88	4,86 a
Tremoço	5,30	4,98	5,08	5,10 a	*	*	*	*
Nabo	4,68	5,23	5,02	4,97 a	4,72	5,09	5,07	4,96 a
Azevém	4,87	4,93	4,93	4,90 a	5,01	4,97	5,55	5,17 a
Aveia	5,09	5,22	5,20	5,17 a	4,77	5,27	5,10	5,04 a
Trevo	5,02	4,94	4,98	4,99 a	5,23	4,97	5,09	5,09 a
MÉDIA	4,99 A	5,08 A	5,03 A		4,93 A	5,04 A	5,09 A	
C.V.(%)	5,58				6,34			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. *Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Diferente dos resultados obtidos nesse trabalho, Nascimento et al. (2003), avaliando os efeitos de leguminosas nas propriedades químicas de um solo degradado, observaram que as plantas foram capazes de aumentar os valores de pH do solo, diminuindo assim sua acidez, além de também proporcionarem aumentos nos teores de K e Mg no solo.

Os fatores estudados não causaram efeitos significativos sobre a acidez potencial do solo (Tabela 21), exceto em 2011 na camada de 0-5 cm, onde foi obtido maior valor médio de H^+Al quando sem a aplicação de fertilizante fosfatado. Isso provavelmente ocorreu pela alta presença de cálcio nos fertilizantes fosfatados, que possivelmente competiu com o alumínio e o hidrogênio no complexo de troca, fazendo com que a acidez potencial, onde foram aplicados esses fertilizantes, fosse menor em relação à sem P.

Tabela 21 - Teores de H+Al no solo em função de fontes de fertilizantes fosfatados e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	mmol _c dm ⁻³							
0-5 cm								
Pousio	32,91	29,00	32,44	31,45 a	65,83	45,17	37,70	49,56 a
Ervilhaca	31,76	34,22	33,80	33,33 a	58,14	59,61	47,99	55,24 a
Tremoço	28,31	36,43	32,79	33,03 a	*	*	*	*
Nabo	38,20	34,01	33,70	35,71 a	75,94	44,82	41,92	54,23 a
Azevém	34,08	33,63	32,46	33,39 a	64,63	47,71	28,14	46,83 a
Aveia	29,49	24,29	26,97	27,24 a	55,40	47,18	35,59	46,05 a
Trevo	28,60	32,10	32,44	30,07 a	46,45	49,41	43,53	46,46 a
MÉDIA	32,10 A	32,14 A	31,95 A		61,06 A	48,98 B	39,14 C	
C.V.(%)	23,45				21,94			
5-10 cm								
Pousio	40,47	35,69	39,25	38,47 a	41,12	42,02	43,29	42,14 a
Ervilhaca	34,43	38,17	41,46	38,51 a	46,09	49,50	44,80	46,80 a
Tremoço	35,54	43,50	35,85	38,29 a	*	*	*	*
Nabo	49,87	33,46	35,16	40,03 a	57,17	38,18	44,42	46,59 a
Azevém	44,96	34,84	38,32	39,37 a	46,64	46,34	29,02	40,67 a
Aveia	36,59	34,81	35,37	35,59 a	44,46	34,07	39,08	39,20 a
Trevo	33,94	46,60	37,59	38,76 a	37,68	43,33	41,02	40,68 a
MÉDIA	39,64 A	37,71 A	37,70 A		45,53 A	42,24 A	40,27 A	
C.V.(%)	27,72				26,14			
10-20 cm								
Pousio	45,83	41,85	53,66	47,11 a	40,98	44,08	48,35	44,47 a
Ervilhaca	42,61	46,37	48,03	46,00 a	50,06	50,76	48,93	49,91 a
Tremoço	40,69	48,52	47,38	46,13 a	*	*	*	*
Nabo	55,71	39,99	46,67	47,55 a	53,07	44,84	42,95	46,95 a
Azevém	43,39	48,92	49,32	50,09 a	42,15	49,16	31,16	40,82 a
Aveia	46,20	38,89	43,32	41,86 a	54,56	36,76	43,12	44,81 a
Trevo	46,20	50,14	52,67	48,59 a	36,69	46,27	41,27	41,41 a
MÉDIA	47,06 A	44,37 A	48,34 A		46,25 A	45,31 A	42,63 A	
C.V.(%)	21,69				23,71			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. *Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

De acordo com Anghinoni e Nicolodi (2004), os efeitos proporcionados pelos compostos orgânicos dos resíduos vegetais de plantas de cobertura são temporários. No entanto, podem contribuir para amenizar os efeitos acidificantes ocasionados pela decomposição de resíduos vegetais e pela adição de adubos nitrogenados amídicos e amoniacais (processo de nitrificação). Tal contribuição não foi observada no presente estudo, uma vez que nenhuma planta de cobertura diferiu do pousio nas frações dos componentes da acidez do solo. Almeida et al. (2008) também não verificaram efeitos significativos das plantas de cobertura sobre o pH e acidez potencial do solo (H+Al), quando avaliaram o efeito de mucuna preta, milho, crotalária e guandu, rotacionados com milho, soja e feijão, em plantio direto e convencional.

Franchini et al. (2000), ao avaliarem alterações em algumas características químicas do solo, após sete anos sob sistemas de rotação de culturas, utilizando trigo, aveia e tremoço, como culturas intercalares às culturas principais, milho e soja, observaram que a acidificação do solo, a diminuição do teor de Ca trocável, o aumento da acidez trocável e potencial e o aumento do teor de N-total, na sucessão tremoço-milho-trigo-soja, foram as principais alterações observadas.

Quanto aos teores de Ca no solo, é possível observar que, para o ano de 2009, não houve efeito dos fatores estudados, a exceção da camada 10-20 cm, em que foi observado os maiores valores de Ca no tratamento sem P (controle). No ano de 2011, as fontes de fertilizantes fosfatados e as plantas de cobertura influenciaram significativamente nos teores de Ca no solo, onde o FN entre as fontes, e a aveia entre as plantas, proporcionaram os maiores teores deste nutriente na camada de 0-5 cm. Porém, os resultados da aveia diferiram significativamente apenas dos obtidos com nabo. Na camada de 5-10 cm o trevo resultou em mais Ca no solo, porém diferiu estatisticamente apenas da aveia (Tabela 22).

O maior teor de Ca encontrado sob fertilização com FN já era de se esperar, pois os FNs são basicamente constituídos por apatitas (fosfatos de cálcio) e, devido a sua aplicação superficial e lenta dissolução no solo, acabam promovendo o acúmulo de Ca e P nas camadas superficiais. A variação nos teores de Ca no solo encontrada entre as plantas de cobertura nas camadas superficiais, provavelmente se deve às diferentes capacidades de retornar esse nutriente ao solo, através da decomposição dos seus resíduos ou, ainda, às diferenças de plantas na capacidade de absorvê-lo do solo (Tabela 22). Nesta mesma linha, avaliando a influência de plantas de cobertura de verão na fertilidade do solo, Correia e Durigan (2008), observaram que não houve efeito significativo das plantas sobre os teores de Ca e Mg nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm) do solo.

Tabela 22 - Teores de Ca no solo em função de fontes de fertilizantes fosfatados e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mmol _c dm ⁻³ -----							
0-5 cm								
Pousio	58,49	63,67	67,01	63,06 a	31,10	44,43	81,30	52,27 ab
Ervilhaca	60,10	64,82	93,96	75,96 a	42,53	40,50	91,50	58,17 ab
Tremoço	114,98	59,31	75,79	79,41 a	*	*	*	*
Nabo	52,82	78,10	81,99	68,38 a	27,70	48,20	69,17	48,35 b
Azevém	52,65	62,71	71,82	62,39 a	28,83	48,26	88,83	55,31 ab
Aveia	76,34	69,50	45,24	62,97 a	37,50	55,20	99,57	64,08 a
Trevo	71,81	59,69	76,54	70,33 a	56,00	44,73	86,00	62,24 ab
MÉDIA	67,70 A	65,10 A	72,33 A		37,27 C	46,88 B	86,06 A	
C.V.(%)	36,64				19,06			
5-10 cm								
Pousio	45,48	40,20	37,79	41,15 a	35,70	36,80	29,67	33,72 ab
Ervilhaca	53,05	24,84	42,30	40,38 a	31,96	19,65	36,17	30,46 ab
Tremoço	53,73	37,13	51,82	48,89 a	*	*	*	*
Nabo	32,99	48,41	44,92	41,75 a	20,66	44,40	26,73	30,60 ab
Azevém	39,25	58,48	42,31	46,68 a	34,50	35,67	31,20	33,78 ab
Aveia	52,84	49,95	49,66	50,81 a	27,23	34,90	15,93	26,02 b
Trevo	51,09	31,72	79,90	49,43 a	42,10	41,67	74,87	52,87 a
MÉDIA	47,06 A	43,08 A	46,74 A		32,02 A	36,44 A	35,59 A	
C.V.(%)	28,59				51,75			
10-20 cm								
Pousio	46,77	40,13	30,67	39,18 a	42,20	36,03	30,40	36,21 a
Ervilhaca	51,25	32,25	31,53	37,37 a	32,16	29,03	34,23	31,81 a
Tremoço	53,90	28,96	27,90	34,80 a	*	*	*	*
Nabo	29,23	31,73	19,90	27,83 a	27,43	45,46	42,23	38,37 a
Azevém	35,00	23,90	21,80	28,05 a	40,26	32,06	48,47	40,26 a
Aveia	47,07	33,53	36,47	39,02 a	28,26	31,16	31,03	30,15a
Trevo	55,70	23,10	41,10	42,40 a	43,80	28,36	34,67	35,61 a
MÉDIA	44,82 A	31,20 B	29,65 B		35,68 A	33,68 A	36,83 A	
C.V.(%)	35,31				28,25			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. *Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Neste estudo, os teores de Mg no solo foram pouco influenciados pelas plantas de cobertura, não sendo significativas as diferenças (Tabela 23). Quanto às fontes de P, para o ano de 2009 o SPS proporcionou maior teor de Mg no solo na camada de 5-10 cm, diferindo apenas do valor observado no controle sem P. Já para o ano de 2011, na camada de 0-5 cm, o FN proporcionou a maior quantidade de Mg, sendo que nas demais camadas não foram observadas diferenças entre as fontes. Ao estudarem a influência de cobertura vegetal de inverno associadas à adubação orgânica e mineral, Andreola, Costa e Olszewski (2000) constataram que não há efeito das plantas sobre os valores de pH, nem sobre os teores de Ca e Mg no solo. Já para os teores de K no solo foi observada influência das plantas. Assim, segundo os autores, fica evidente a importância da cobertura do solo para a manutenção desse

nutriente nas camadas superficiais, por meio da reciclagem, considerando ser o K um elemento bastante móvel e que se perde muito facilmente do solo por lixiviação (ROWELL, 1994).

Tabela 23 - Teores de Mg no solo em função de fontes de fertilizantes fosfatados e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	mmol _c dm ⁻³							
0-5 cm								
Pousio	19,67	26,50	25,43	23,86 a	11,73	15,36	20,93	16,01 a
Ervilhaca	21,25	23,75	26,33	24,14 a	12,93	15,03	18,56	15,51 a
Tremoço	26,50	29,67	27,16	27,93 a	*	*	*	*
Nabo	19,47	29,50	23,30	23,42 a	11,13	16,50	14,83	14,15 a
Azevém	39,17	23,50	24,30	28,98 a	11,03	16,86	36,66	21,52 a
Aveia	31,50	29,50	30,33	30,56 a	13,93	19,06	31,50	21,50 a
Trevo	28,67	26,00	23,00	27,00 a	21,06	15,03	17,90	18,00 a
MÉDIA	26,88 A	26,90 A	26,12 A		13,63 B	16,31 B	23,40 A	
C.V.(%)	40,07				38,16			
5-10 cm								
Pousio	18.80	45.17	19.77	27,91 a	16.83	20.00	16.77	17,86 a
Ervilhaca	22.50	55.00	21.47	31,34 a	14.43	17.63	15.63	15,90 a
Tremoço	19.50	19.57	27.83	22,30 a	*	*	*	*
Nabo	11.73	26.17	24.05	20,22 a	11.27	22.50	18.80	17,52 a
Azevém	17.10	27.93	23.30	22,77 a	16.17	17.50	17.57	17,07 a
Aveia	25.10	26.93	28.50	26,84 a	15.87	22.20	15.07	17,71 a
Trevo	23.67	18.35	31.00	23,11 a	24.00	16.30	19.93	20,07 a
MÉDIA	19,63 B	30,73 A	24,53 AB		16,42 A	19,35 A	17,29 A	
C.V.(%)	51,46				29,56			
10-20 cm								
Pousio	17,93	18,60	14,66	17,06 a	16,63	18,53	14,46	16,54 a
Ervilhaca	20,95	16,50	17,00	17,98 a	14,70	13,16	11,86	13,24 a
Tremoço	21,60	15,33	16,96	17,51 a	*	*	*	*
Nabo	09,63	17,23	15,45	13,93 a	11,76	19,73	16,46	15,98 a
Azevém	13,13	14,30	13,20	13,48 a	16,23	15,73	24,13	18,70 a
Aveia	19,96	19,16	30,06	23,06 a	12,36	17,10	18,96	16,14 a
Trevo	23,33	12,90	17,10	18,81 a	21,53	12,10	21,16	18,26 a
MÉDIA	17,74 A	16,57 A	18,26 A		15,53 A	16,06 A	17,84 A	
C.V.(%)	35,63				33,12			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. *Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

Os resultados obtidos para K trocável no solo mostram que, em 2009 a ausência de fosfato proporcionou os maiores teores deste nutriente, na camada de 0-5 cm (Tabela 24). Nas demais camadas deste mesmo ano, e em todas as camadas avaliadas no ano de 2011, não foram observadas diferenças entre os tratamentos. Por outro lado, Juo e Lal (1979) obtiveram incremento de duas vezes no teor de K trocável com o cultivo de azevém durante três anos, quando comparado à condição original, indicando a capacidade dessa

espécie em absorver potássio em formas menos trocáveis, depositando-o na superfície da área cultivada. O que poderia explicar a falta de resposta das plantas no presente estudo seria a época de amostragem do solo, em que grande parte do K poderia ainda estar imobilizada no tecido das plantas, em função da coleta ser realizada antes do fechamento do ciclo das culturas.

Tabela 24 - Teores de K trocável no solo em função de fontes de fertilizantes fosfatados e plantas de cobertura

Plantas de cobertura	2009				2011			
	SEM P	SPS	FN	MÉDIA	SEM P	SPS	FN	MÉDIA
	----- mmol _c dm ⁻³ -----							
0-5 cm								
Pousio	3,47	2,20	2,31	2,66 a	3,41	2,56	3,75	3,24 a
Ervilhaca	2,69	1,55	2,30	2,20 a	4,83	2,02	1,89	2,91 a
Tremoço	5,01	1,62	1,51	2,43 a	*	*	*	*
Nabo	2,32	1,44	2,06	2,00 a	2,82	2,93	7,91	4,55 a
Azevém	3,24	1,51	1,49	2,15 a	2,95	2,27	4,68	3,13 a
Aveia	5,70	2,41	2,91	3,83 a	4,95	2,20	2,42	3,19 a
Trevo	3,02	1,03	3,00	2,61 a	3,53	2,52	1,96	2,67 a
MÉDIA	3,61 A	1,74 B	2,18 B		3,75 A	2,41 A	3,71 A	
C.V.(%)	61,18				82,76			
5-10 cm								
Pousio	1,50	1,36	1,51	1,46 a	1,95	1,74	2,24	1,98 a
Ervilhaca	0,97	2,47	0,95	1,39 a	2,99	1,49	1,34	1,94 a
Tremoço	2,65	1,30	0,88	1,61 a	*	*	*	*
Nabo	1,55	1,14	1,03	1,26 a	1,81	1,66	1,48	1,65 a
Azevém	1,73	0,84	1,28	1,28 a	2,00	1,37	2,06	1,81 a
Aveia	2,37	1,24	0,98	1,53 a	1,61	1,21	1,32	1,38 a
Trevo	2,20	1,03	4,18	2,14 a	2,25	1,77	1,64	1,88 a
MÉDIA	1,89 A	1,30 A	1,28 A		2,10 A	1,54 A	1,68 A	
C.V.(%)	62,40				40,96			
10-20 cm								
Pousio	1,33	1,50	1,93	1,59 a	1,96	1,14	1,36	1,48 a
Ervilhaca	1,10	1,26	1,20	1,19 a	1,73	1,18	1,10	1,33 a
Tremoço	5,17	1,29	1,09	2,19 a	*	*	*	*
Nabo	1,38	1,55	1,13	1,35 a	1,36	2,19	7,38	3,64 a
Azevém	1,63	1,14	1,27	1,41 a	1,34	1,09	1,37	1,25 a
Aveia	2,46	1,28	1,20	1,64 a	1,55	1,20	1,03	1,26 a
Trevo	2,50	1,27	3,13	2,19 a	1,47	1,47	1,27	1,40 a
MÉDIA	2,13 A	1,34 A	1,41 A		1,57 A	1,38 A	2,29 A	
C.V.(%)	69,25				142,03			

Dentro de cada ano, médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. *Não houve estabelecimento do Tremoço no ano de 2011. SEM P = sem aplicação de fosfato; SPS = superfosfato simples; FN = Fosfato natural

5 CONCLUSÕES

As plantas de cobertura tiveram pouca ou nenhuma influência sobre as frações de P do solo, tanto nas consideradas lábeis como nas moderadamente ou não lábeis, e sobre os atributos químicos do solo.

A aplicação de fertilizantes fosfatados promoveu aumento do teor de P no solo nas frações de menor labilidade, principalmente quando utilizado fosfato natural.

Independente do tratamento ocorreu aumento dos teores de P no solo nas formas lábeis e não-lábeis e diminuição das formas moderadamente lábeis, em todas as camadas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, V.P.; ALVES, M.C.; SILVA, E.C.; OLIVEIRA, S.A. Rotação de culturas e propriedades físicas e químicas em Latossolo Vermelho de cerrado sob preparo convencional e semeadura direta em adoção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1227-1237, 2008.
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 115-123, 2004.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L.M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e ou mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p. 857-865, 2000.
- ANGHINONI, I. & NICOLODI, M. Estratégias de calagem no sistema plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS - FERTBIO, 26., 2004, Lages. **Anais**. Lages: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2004. CD-ROM.
- BAIS, H.P.; WEIR, T.L.; PERRY, L.G.; GILROY, S.; VIVANCO, J.M. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 57, p. 233-266, 2006.
- BARROW, N. J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, p. 183-230, 1985.
- BRASIL. Decreto n. 4954, de 14 de janeiro de 2004, anexo II. Aprova o Regulamento da Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 15 de jan. 2004, Seção 1.
- BOTREL, M.A. **Algumas considerações sobre gramíneas e leguminosas forrageiras**. Coronel Pacheco-MG: EMBRAPA - CNPGL, 1983. 59 p.
- BOUYOUCOS, G.J. Estimation of the colloidal material in soils. **Soil Science**, Baltimore, v 64, p. 362-364, 1926.
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v 84, p. 133-144, 1957.
- CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **European Journal of Soil Science**, New Jersey, v. 36, p. 199-207, 1985.
- 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, N. M.; DURIGAN, J. C. Culturas de cobertura e sua influência na fertilidade do solo sob sistema de plantio direto. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 4, p. 20-31, 2008.

COSTA, M.D.; LOVATO, P.E. Fosfatases na dinâmica do fósforo do solo sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não-micorrízicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 603-605, 2004.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 3/4, p. 197-214, 1995.

DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v 29, p. 83-117, 1977.

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.

DIOP, T.A.; WADE, T.K.; DIALLO, A.; DIOUF, M.; GUÈYE, M. *Solanum* cultivar responses to arbuscular mycorrhizal fungi: growth and mineral status. **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v. 11, p. 429-443, 2003.

EMBRAPA – CNPS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª. Edição. Brasília: EMBRAPA. Rio de Janeiro, 2006. 412p.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing soils for phosphorus. In: WESTERMAN, R. L. (Ed) **Soil Testing and Plant Analysis**, 3 ed. Madison. p. 141-180, 1990.

FOX, T.R.; COMERFORD, N.B.; MCFEE, W.W. Phosphorus and aluminum release from a Spodic horizon mediated by organic acids. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 1763-1767, 1990.

FRANCHINI, J.C.; BORKERT, C.M.; FERREIRA, M.M. & GAUDÊNCIO, C.A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p. 459-467, 2000.

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.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, A.F.C.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J.; LIMA, M.A.S. Phosphorus forms and availability assessed by ³¹P-NMR in successive cropped soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 36, p. 2625-2640, 2005.

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.

GERKE, J. Kinetics of soil phosphate desorption as affected by citric acid. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 157, p. 17-22, 1994.

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.

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

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. 7th ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2005. 515p.

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.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, London, v. 23, p. 177-191, 1972

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, POTAFOS, p.665-682. 2004.

HORST, W. J., M. KAMH, J. M. JIBRIN AND V. O. CHUDE. Agronomic measures for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, p. 211–223, 2001.

JACKON, M.L. **Soil chemical analysis**: advanced course. Modison: by author, 1979. 895 p.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, p. 25–44, 1998.

JUO, A.S.R.; LAL, B. Nutrient profile in atropical alfisol underconventional and no-till systems. **Soil Science**, Baltimore, v.127, p.168-173, 1979.

KIRK, G.J.D.; SANTOS, E.E.; SANTOS, M.B. Phosphate solubilization by organic anion excretion from rice growing in aerobic soil: Rates of excretion and decomposition, effects on rhizosphere pH and effects on phosphate solubility and uptake. **New Phytologist**, Hoboken, v. 142, p. 185-200, 2000.

LAJTHA, K.; HARRISON, A. F. Strategies of phosphorus acquisition and conservation by plants species and communities. In: TIESSSEN, H. (Ed.). **Phosphorus in the global environment: transfers, cycles and management**. Ed. 1. Chichester, UK: Wiley, 1995. p. 139-146.

LE BAYON, R.C.; WEISSKOPF, L.; MARTINOIA, E.; JANSÁ, J.; FROSSARD, E.; KELLER, F.; FOLLMÍ, K.B.; GOBAT, J.-M. Soil phosphorus uptake by continuously

cropped *Lupinus albus*: A new microcosm design. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 283, p. 309-321, 2006.

LOSS, S.P.; RITCHIE, G.S.P.; ROBSON, A.D. The effect of lupins on soil acidification and fertility in Western Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**. v. 33, p. 457-464, 1993.

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

MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Adubação fosfatada em sistemas de produção com semeadura direta. In: FONSECA, A.F.; CAIRES, E.F.; BARTH, G. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema plantio direto**. Ponta Grossa, PR: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais. 2011. p.105-130.

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.

NAGARAJAH, S.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Competitive adsorption of phosphate with poly-galacturonate and organic anions on kaolinite and oxides surfaces. **Nature**, London, v. 228, p.83-85, 1970.

NASCIMENTO, J.T.; SILVA, I.F.; SANTIAGO, R.D.; SILVA NETO, L.F. Efeito de leguminosas nas características químicas e matéria orgânica de um solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.3, p.457-462, 2003.

NISHA, M.C.; RAJESHKUMA, S. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrition of *Wedelia chinensis* (Osbeck) Merril. **Indian Journal of Science and Technology**, Chennai, v. 3, p. 676-678, 2010.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Atividade e especiação química na solução afetadas pela adição de fósforo em Latossolo sob plantio direto em diferentes condições de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.6, p. 955-963, 2006.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

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

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.

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Organic compounds from plant extracts and their effect on soil phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n. 10, p. 1379-1388, 2008.

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

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; Potafos, 1991. 343p.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 57, p. 77-159, 1996.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1996. 728p.

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.

ROWELL, D.L. **Soil Science - methods and applications**. England, Longman Group IK, 1994. 350p.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT software version 9.2**. Cary, 2008.

SMITH, S.E.; JAKOBSEN, I.; GRONLUND, M.; ANDREW SMITH, F. Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition1. **Plant Physiology**, Rockville, v. 156, p.1050-1057, 2011.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraction mit ammoniumoxalat-losung. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v.105, p.194-202, 1964.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1989. 345p.

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

SOUZA, J. A.; CURI, N.; GUEDES, G. A. A. Relação entre mineralogia e adsorção de fósforo em alguns latossolos sob cerrado do planalto central. **Ciência e Prática**, Brasília, DF, v. 15, p. 103-111, 1991.

SOUZA, V.C.; SILVA, R.A.; CARDOSO, G.D.; BARRETO, A.F. Estudos sobre fungos micorrízicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, João Pessoa, v.10, n.3, p. 612-618, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

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

TURNER, B.L; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Eds). **Organic Phosphorus in the Environment**. Ed. 1. CAB International, Wallingford, UK, 2005. 399p.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. **European Journal of Soil Science**, Hoboken, v. 61, p. 48–57, 2010.

ZHANG, H.; KOVAR, J. L. Fractionation of soil phosphorus. In.: KOVAR, J.L.; PIERZYNSKI, G.M. (Ed.). **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals and waters**. 2nd ed. Raleigh: North Carolina State University, 2009. p. 50-60.