



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

Ferreira de Souza, Renato; Faquin, Valdemar; Teixeira de Andrade, Alex; Ferreira Torres, Paulo  
Rogério

FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 31, núm. 6, 2007, pp. 1535-1544

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214061030>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

 redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA<sup>(1)</sup>

**Renato Ferreira de Souza<sup>(2)</sup>, Valdemar Faquin<sup>(3)</sup>, Alex Teixeira de Andrade<sup>(4)</sup> & Paulo Rogério Ferreira Torres<sup>(5)</sup>**

## RESUMO

A distribuição das formas de P nos diferentes compartimentos do solo (lábil, pouco lábil e não-lábil) é amplamente influenciada por processos geoquímicos e biológicos e, também, por ações antrópicas. Visando avaliar a influência da calagem e do esterco bovino sobre a distribuição do P nos diferentes compartimentos do solo, foram realizados em casa de vegetação quatro experimentos no delineamento inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 4 x 5, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por quatro doses de calcário (0; 0,5; 1; e 2 vezes a dose recomendada para atingir V = 60 %) e cinco doses de esterco bovino (0; 2,5; 5,0; 7,5; e 10 % do volume total de solo), aplicadas em amostras de 4 dm<sup>3</sup> de Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média (LVAd-1), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura argilosa (LVAd-2) e Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa (LVd), sendo cada solo um experimento. Foram avaliados os teores de P Mehlich-1, P lábil (P resina + Pi e Po-NaHCO<sub>3</sub>), P pouco lábil (Pi e Po-NaOH) e P não-lábil (P-HCl + P-residual). De maneira geral, a adição de calcário e esterco bovino incrementou os teores de P Mehlich-1, principalmente nos solos menos oxídicos e com textura mais arenosa. Houve aumento em todas as formas de P nos solos, sendo a contribuição das formas pouco lábeis (Po ligado a compostos húmicos e Pi ligado a Fe e Al) bastante substancial, predominando, porém, as formas não-lábeis de P.

**Termos de indexação: esterco bovino, calcário, disponibilidade de fósforo, P Mehlich-1.**

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal de Lavras – UFLA. Projeto pela FAPEMIG e CNPq. Recebido para publicação em novembro de 2005 e aprovado em julho de 2007.

<sup>(2)</sup> Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA, Cláudino 268, CEP 37200-000 Lavras (MG). Assistente de Pesquisa PRODOC-CAPES. E-mail: souzarf@ufla.br

**SUMMARY: PHOSPHORUS FORMS IN SOILS UNDER INFLUENCE OF LIMING AND ORGANIC FERTILIZATION**

*The distribution of phosphorus forms in the different soil compartments (labile, little labile and non-labile) is very influenced by geochemical and biological processes and by human activities. To evaluate the effect of liming and cattle manure on soil phosphorus forms, four experiments were carried out in an entirely randomized design, in a 4 x 5 factorial layout with four repetitions, in a greenhouse. The treatments consisted of four liming levels (0; 0.5; 1 and 2 times the recommended dose to reach V = 60 %) and five doses of cattle manure (0; 2.5; 5.0; 7.5 and 10 % of the total soil volume), applied on samples of four dm<sup>3</sup> of four soil types: sandy, orthic Quartzarenic Neosol, loamy clay dystrophic Red-Yellow Latosol, sandy clayey dystrophic Red-Yellow Latosol and a clayey dystrophic Red Latosol. Each soil represented an experiment. The concentrations of P (Mehlich-1) and the distribution of the labile (P-resin + Pi and Po-NaHCO<sub>3</sub>), little labile (Pi and Po-NaOH) and non-labile (P-HCl + P-residual) forms of phosphorus in the soil were evaluated. In general, the increment in the doses of cattle manure and lime promoted a significant increase in P (Mehlich-1) concentrations in the soil, mainly in the less oxidic, sandier. All P forms in the soils increased, but contribution of the little labile forms (Po linked to humic compounds and Pi bound to Fe and Al) was rather substantial, although the non-labile P form prevailed in these soils.*

*Index terms: cattle manure, lime, Mehlich-1 P, phosphorus availability.*

## INTRODUÇÃO

O fósforo encontra-se nos solos sob as formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi), que se diferenciam entre si pelo grau de estabilidade ou solubilidade e, portanto, com diferentes disponibilidades à absorção vegetal. O Pi pode se encontrar em solução (P-solução), precipitado com Al, Fe e Ca ou adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila, ambos em equilíbrio com a solução e compondo a fração lábil de P no solo (P-lábil). A fração não-lábil é composta pelo P sob a forma de compostos de baixa solubilidade (P mineralogicamente estável) ou adsorvido às partículas do solo, não estando, estas formas, em equilíbrio imediato com o P em solução (Novais & Smyth, 1999). Em ecossistemas naturais, os processos geoquímicos são responsáveis pela dinâmica do P em longo prazo. Contudo, pelo fato de a maior parte do P disponível às plantas ter como fonte a matéria orgânica, os processos biológicos influenciam bastante a distribuição das formas de P no solo (Walbridge, 1991). Portanto, os processos biológicos regulam a dinâmica e distribuição de formas lábeis de P no solo, e a reciclagem da forma orgânica é um importante fator na disponibilização desse nutriente às plantas (Adeputu & Corey, 1976).

O manejo do solo, as remoções de P pelas culturas, as aplicações de fertilizantes fosfatados, a calagem e adição de matéria orgânica alteram bastante a dinâmica das transformações do P no solo (Tiessen et al., 1992). Em estudos realizados em cafoeiros

teores de matéria orgânica desse solo (Chaves, 1996). Estudos têm demonstrado a natureza e dinâmica da matéria orgânica e os teores de P apresentam comportamentos diferentes entre os diferentes sistemas de manejo do solo. As diferentes práticas de cultivo que alteram o comportamento da matéria orgânica exercem grande impacto na disponibilidade e distribuição das formas de P no solo (Turner, 2000). Vários trabalhos que visam entender a dinâmica do P têm demonstrado a influência das diferentes práticas – como a calagem, a adição de doses de matéria orgânica e os sistemas de irrigação – sobre as transformações das formas de P (Hedley et al., 1982; Iyamuremye et al., 1999; et al., 2002).

Devido ao comportamento do P e para melhor entendimento de sua dinâmica no solo, foram realizados diversos trabalhos de fracionamento seqüencial empregando soluções químicas com diferentes capacidades de extração de P (Silva, 1999). O método de fracionamento seqüencial, proposto por Hedley et al. (1982), tem sido amplamente empregado no estudo das transformações do P no solo, sob diferentes práticas de manejo do solo, com o objetivo de incrementar os conhecimentos sobre sua disponibilidade e predição de sua biodisponibilidade e riscos ambientais (Hedley et al., 1982; Iyamuremye et al., 1999; et al., 2002).

Objetivou-se com este estudo avaliar o efeito da calcário e do esterco bovino sobre as formas

## MATERIAL E MÉTODOS

Quatro experimentos foram realizados no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com amostras de quatro solos bem drenados, predominantes no Estado de Minas Gerais, e com ampla variação nos conteúdos de argila, na mineralogia e nos teores de matéria orgânica (MO), constituindo cada solo um experimento específico. Para abranger ampla variação nas características físicas, químicas e mineralógicas, foram utilizados os solos classificados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999) como: Neossolo Quartzarênico órtico fase cerrado (RQo), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média fase floresta tropical subperenifólia (LVAd-1), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura argilosa fase floresta tropical subperenifólia (LVAd-2) e Latossolo Vermelho distrófico textura muito argilosa fase floresta tropical subperenifólia (LVd).

As amostras dos solos foram coletadas na profundidade de 0–20 cm, sob vegetação natural, após retirar a vegetação e os restos orgânicos presentes na superfície. Após coleta, as amostras foram caracterizadas física, química e mineralógicamente (Quadro 1). A granulometria dos solos foi determinada pelo méto-

do da pipeta (Day, 1965), empregando-0,1 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico e agitada, sendo a fração areia (2 - 0,053 mm) separado de tamisagem. O pH em água, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, P, K, Cu, Fe, Mn e Zn foram determinados (Embrapa, 1997), sendo o Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, e P, K e os micronutrientes, pelo HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + 0,0125 mol L<sup>-1</sup> (Mehlich-1). Também foram feitos a acidez potencial (H + Al) e o C orgânico conforme Raij et al. (1987). O P remanescente foi minado conforme Alvarez V. et al. (2000), e a capacidade máxima de adsorção de P, segundo Watanabe (1957); os valores de P adsorvido foram feitos à isoterma de Langmuir, para estimar a CMAP. Na fração argila foram quantificadas a caulinita (Ct) e gibbsita, (Gb) por termodiferencial (ATD), sendo as amostras secas e a fração submetidas à difração de raios X (difração do pó) (Klug & Alexander, 1974); óxidos de ferro totais (Fe<sub>tot</sub>), usando o ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra & Jackson, 1960); e óxidos menores cristalinos (Fe<sub>ox</sub>), extraídos segundo Schwertmann (1964), usando-se oxalato de amônio; em ambos os casos a dosagem do Fe<sub>ox</sub> foi feita por espectrofotometria de absorção de luz.

**Quadro 1. Principais atributos químicos, físicos e mineralógicos das amostras dos solos, colecionados em condições naturais, na camada de 0 a 20 cm**

Solo	Químico											
	pH <sup>(1)</sup>	P	K	P-rem	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	T	m	V	CMAP
— mg dm <sup>-3</sup> —												
RQo	5,2	7,5	25	26,8	0,4	0,1	0,8	4,0	4,6	58	12,7	306,3
LVAd-1	5,2	2,0	74	24,4	0,5	0,2	0,6	4,0	4,9	40	18,4	395,4
LVAd-2	4,9	2,3	52	17,4	0,8	0,2	0,8	6,3	7,4	41	15,3	776,0
LVd	4,7	1,4	31	8,3	0,4	0,1	1,0	11,0	11,6	62	5,3	1.274,9
Físico												
Areia				Silte				Argila				MO <sup>(3)</sup>
g kg <sup>-1</sup>				g kg <sup>-1</sup>				g kg <sup>-1</sup>				dag kg <sup>-1</sup>
RQo	920,0			20,0			60,0			1,4		
LVAd-1	690,0			80,0			230,0			1,9		
LVAd-2	520,0			80,0			400,0			2,6		
LVd	250,0			60,0			690,0			4,1		
Mineralógico												
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>ed</sub> <sup>(4)</sup>	Fe <sub>ox</sub> <sup>(5)</sup>	Ct <sup>(6)</sup>	Gb <sup>(7)</sup>	Ki <sup>(8)</sup>	Kr <sup>(9)</sup>		
g kg <sup>-1</sup>												
RQo	30,6	35,8	11,0	4,7	0,0	2,0	0,1	778,0	59,0	0,85		
LVAd-1	95,1	97,4	36,2	6,2	0,0	10,8	0,1	752,0	63,0	0,98		
LVAd-2	137,6	203,9	53,9	11,2	0,4	44,5	5,8	535,6	202,3	0,67		

(Krishna Murty et al., 1966). Os óxidos foram determinados por ataque sulfúrico ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), segundo Embrapa (1997), e determinadas as relações moleculares  $K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $K_r = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Os experimentos foram realizados em casa de vegetação, utilizando-se o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial  $4 \times 5$ , com quatro repetições, sendo cada unidade experimental constituída por um vaso com capacidade de  $4 \text{ dm}^3$  de solo. Os tratamentos foram constituídos de quatro doses de calcário, equivalentes a 0,0; 0,5; 1,0; e 2,0 vezes as doses recomendadas para elevar a saturação por bases em cada solo a 60 %, e cinco doses de esterco bovino decomposto (0, 100, 200, 300 e  $400 \text{ cm}^3/\text{vaso}$ ), correspondendo a 0,0; 2,5; 5,0; 7,5; e 10 % do volume de solo de cada parcela experimental.

Para sua incorporação aos solos, o esterco bovino foi seco a  $60^\circ\text{C}$  e moído em moinho com malha de 1 mm, apresentando densidade de  $0,462 \text{ kg dm}^{-3}$ ; a análise química do esterco apresentou os seguintes teores de nutrientes: 18,0; 3,4; 14,2; 12,1; 6,0; e  $2,6 \text{ g kg}^{-1}$  de N, P, K, Ca, Mg e S e 21,9; 1.112,8; 449,4; e  $78,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu, Fe, Mn e Zn, respectivamente, e 52 dag  $\text{kg}^{-1}$  de matéria orgânica.

Utilizou-se calcário dolomítico calcarenizado micropulverizado, com 35 % de CaO, 14 % PRNT e 97 %.

Após o período de 30 dias de incubação do esterco bovino e calagem, cada unidade recebeu as doses de 400, 320, 250 e 200 mg na forma de  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , de acordo com V. & Fonseca (1990), em função dos teores apresentados pelos solos LVd, LVAd-2, LVA, respectivamente, e uma adubação básica com micronutrientes, utilizando-se como fontes p.a. Após mais 30 dias de incubação, com a próxima à capacidade de campo, subamostras coletadas para as determinações analíticas. P Mehlich-1 foi extraído pelo  $\text{HCl} 0,05 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ , conforme Embrapa (1997). O fracionamento sequencial das formas de P foi realizado de acordo com o método modificado Hedley et al. (1982) (Figura 1).

Por esse procedimento de fracionamento sequencial das formas lábeis de P foram extraídas pela troca aniónica (P resina) saturada com bicarbonato de P inorgânico ( $\text{Pi-NaHCO}_3$ ) e orgânico ( $\text{Po-NaHCO}_3$ ) adsorvidos nas superfícies dos coloides formados com  $\text{NaHCO}_3$  ( $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , a pH 8,5). As for-

PROCEDIMENTO	FORMA DE P
1,5 g de solo + 50 mL água + resina. Agitar 16 h. Resina + $\text{HCl} 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ . Agitar.	P-resina
↓	
Após centrifugar e descartar o sobrenadante, adicionar 30 mL $\text{NaHCO}_3 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , agitar 16 h e centrifugar. Numa alíquota: acidificar com $\text{H}_2\text{SO}_4$ e resfriar. Noutra: autoclavagem com persulfato de amônio + $\text{H}_2\text{SO}_4$ . $\text{Pt-NaHCO}_3 - \text{Pi-NaHCO}_3$	$\text{Pi-NaHCO}_3$ $\text{Pt-NaHCO}_3$ $\text{Po-NaHCO}_3$
↓	
Após centrifugar e descartar o sobrenadante, adicionar 30 mL $\text{NaOH} 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , agitar 16 h e centrifugar. Numa alíquota: acidificar com $\text{H}_2\text{SO}_4$ e resfriar. Noutra: autoclavagem com persulfato de amônio + $\text{H}_2\text{SO}_4$ . $\text{Pt-NaOH} - \text{Pi-NaOH}$	$\text{Pi-NaOH}$ $\text{Pt-NaOH}$ $\text{Po-NaOH}$
↓	
Após centrifugar e descartar o sobrenadante, adicionar 30 mL $\text{NaOH} 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , agitar 16 h e centrifugar. Numa alíquota: acidificar com $\text{H}_2\text{SO}_4$ e resfriar. Noutra: autoclavagem com persulfato de amônio + $\text{H}_2\text{SO}_4$ . $\text{Pt-NaOH} - \text{Pi-NaOH}$	$\text{Pi-NaOH}$ $\text{Pt-NaOH}$ $\text{Po-NaOH}$
↓	
Após centrifugar e descartar o sobrenadante, adicionar 30 mL $\text{HCl} 1 \text{ mol L}^{-1}$ , agitar 16 h e centrifugar.	P-HCl
↓	
0,5 g resíduo do solo após a secagem;	Formas não identificadas

pouco lábil, correspondentes às formas inorgânicas ligadas a Fe e Al (Pi-NaOH) e orgânicas associadas com compostos húmicos (Po-NaOH), foram extraídas com NaOH (0,1 e 0,5 mol L<sup>-1</sup>). As formas de P relativamente insolúveis (P não-lábil), associadas com cálcio, foram extraídas com HCl (1,0 mol L<sup>-1</sup>) (Pi-HCl), e o P residual, contendo as formas mais estáveis de Po e insolúveis de Pi, foi extraído por digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (P-residual). Em todos os extratos de solo, o P foi determinado por colorimetria, segundo Murphy & Riley (1962).

Os valores de P Mehlich-1 e teores de matéria orgânica após aplicação dos tratamentos foram submetidos ao ajuste de modelos de regressão múltipla (superfícies de resposta), considerando as doses de calcário e de resíduo aplicadas (Alvarez V., 1994). Os modelos ajustados foram selecionados conforme o procedimento *stepwise*, isto é, considerando um modelo geral completo, selecionou-se um modelo menor (submodelo), no qual todos os coeficientes foram significativos (Khuri & Cornell, 1996). A adoção do sistema linear formado pelas derivadas parciais das equações da superfície de resposta igualada a zero forneceu os valores críticos, que corresponderam aos valores máximos, de acordo com o comportamento específico da variável P Mehlich-1. Foi utilizado o programa de análises estatísticas R (R Development Core Team, 2004). As formas de P lábeis, pouco lábeis e não-lábeis foram submetidas à análise de variância e ao estudo de regressão simples, ajustando-se modelos em função dos tratamentos aplicados, empregando o programa de análises estatísticas SISVAR (Ferreira, 2000).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como esperado, a figura 2 mostra que, independentemente da aplicação de calcário, a adição de esterco bovino proporcionou incrementos nos teores de matéria orgânica dos solos, os quais apresentaram ajuste quadrático; por outro lado, as doses de calcário não afetaram de modo significativo os teores de MO dos solos.

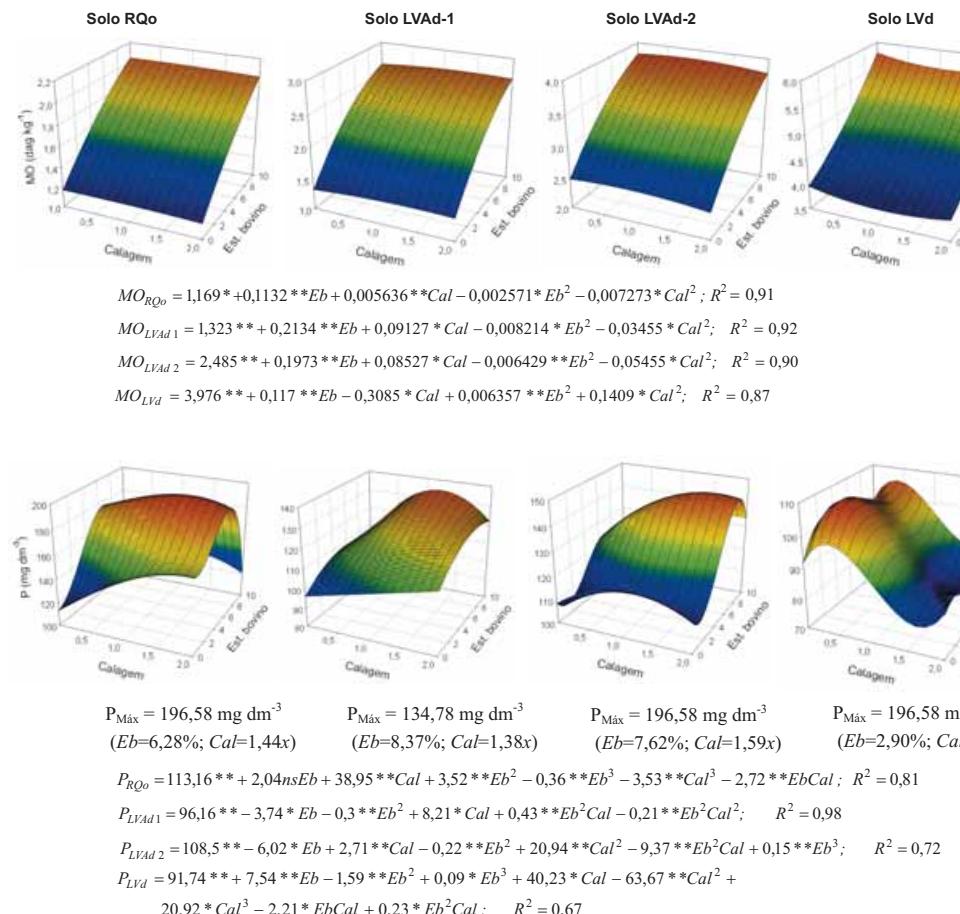
Em geral, para os solos RQo, LVAd-1 e LVAd-2, os valores mais altos do P Mehlich-1 foram obtidos para doses entre 6 e 8 % de esterco bovino e doses em torno de 1,4 vez a dose calculada de calcário, após as quais observou-se tendência de redução nos teores de P. Para o solo LVd, a aplicação de esterco bovino não influenciou de maneira nítida os valores de P Mehlich-1 e a elevação das doses de calcário proporcionou incrementos nos teores de P até o nível 0,22 de calagem e 2,90 % de esterco bovino, a partir das quais ocorreram respostas negativas (Figura 2).

solo, onde os grupos funcionais carboxílicos da matéria orgânica se ligam às hidroxilas de Fe e Al e complexam o Al em solução (H). Segundo Haynes (1984), o solo pode adsorver orgânicos com grande energia, competindo de adsorção de P e aumentando a disponibilidade nutritiva para as plantas. A matéria orgânica originar, também, ligantes orgânicos durante o processo de mineralização, que formar complexos com o Al ou complexos solvatos de P da solução do solo, evitando que este seja liberado (Iyamuremye et al., 1996). Todavia, com maiores de esterco bovino, verificou-se tendência de redução nos valores de P Mehlich-1. Isto provavelmente, à adsorção de P aos compostos húmicos, dado o caráter aniónico da matéria orgânica que, por via de pontes de cátions (Al, Fe e Ca), reter o P (Novais & Smyth, 1999).

O Al e, ou, Fe em solução podem precipitar fosfatos adicionados ao solo. A elevação do pH do solo pela produção de hidróxidos promove a precipitação de Fe e de Al e, consequentemente, reduzindo a precipitação de P com esses elementos. Entretanto, a retenção de P pelo solo mantém valores estequiométricos semelhantes que substitui a precipitação do P pelo Al<sup>3+</sup> do solo pela sua adsorção pelo hidróxido de Al recém-formado pela calagem (Haynes, 1984). A elevação do pH promove, também, a desprotonação de hidroxilos radicais orgânicos e daquelas expostas na superfície das argilas, aumentando a repulsão (menor atracção) entre o fosfato e a superfície adsorvente e diminuindo o potencial eletrostático (Novais & Smyth, 1999). Por outro lado, com o aumento do pH, ocorre diminuição da forma H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, em relação a HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, esta última preferencialmente adsorvida, contrabalanceando o decréscimo do potencial eletrostático (Novais & Smyth, 1999). Também, segundo esses autores, com doses de calcário e maior teor de Ca trocável, pode ocorrer a precipitação de P, formando fosfato tricálcico de baixa solubilidade, explicando os valores de P Mehlich-1 com as doses maiores de calcário.

A calagem de solos ricos em Al<sup>3+</sup> tende a diminuir a adsorção de P, diminuindo-a em solos pobres em Al<sup>3+</sup>, pois polímeros de hidróxidos de Al recém-formados com a calagem apresentam alta afinidade por P (Haynes, 1984). De acordo com esse autor, os polímeros catiônicos de Al formados com a calagem podem, também, capear coloides do solo, resultando em uma menor afinidade de P por esses coloides. A ligações de P com o Al resulta em complexos de P-Al, P-Fe e P-Ca, o P-Al é a que melhor retenção de P no solo, essa retenção não deve ser opção quanto à disponibilidade de P às plantas.

Embora os solos não topinhos não tenham sido compara-



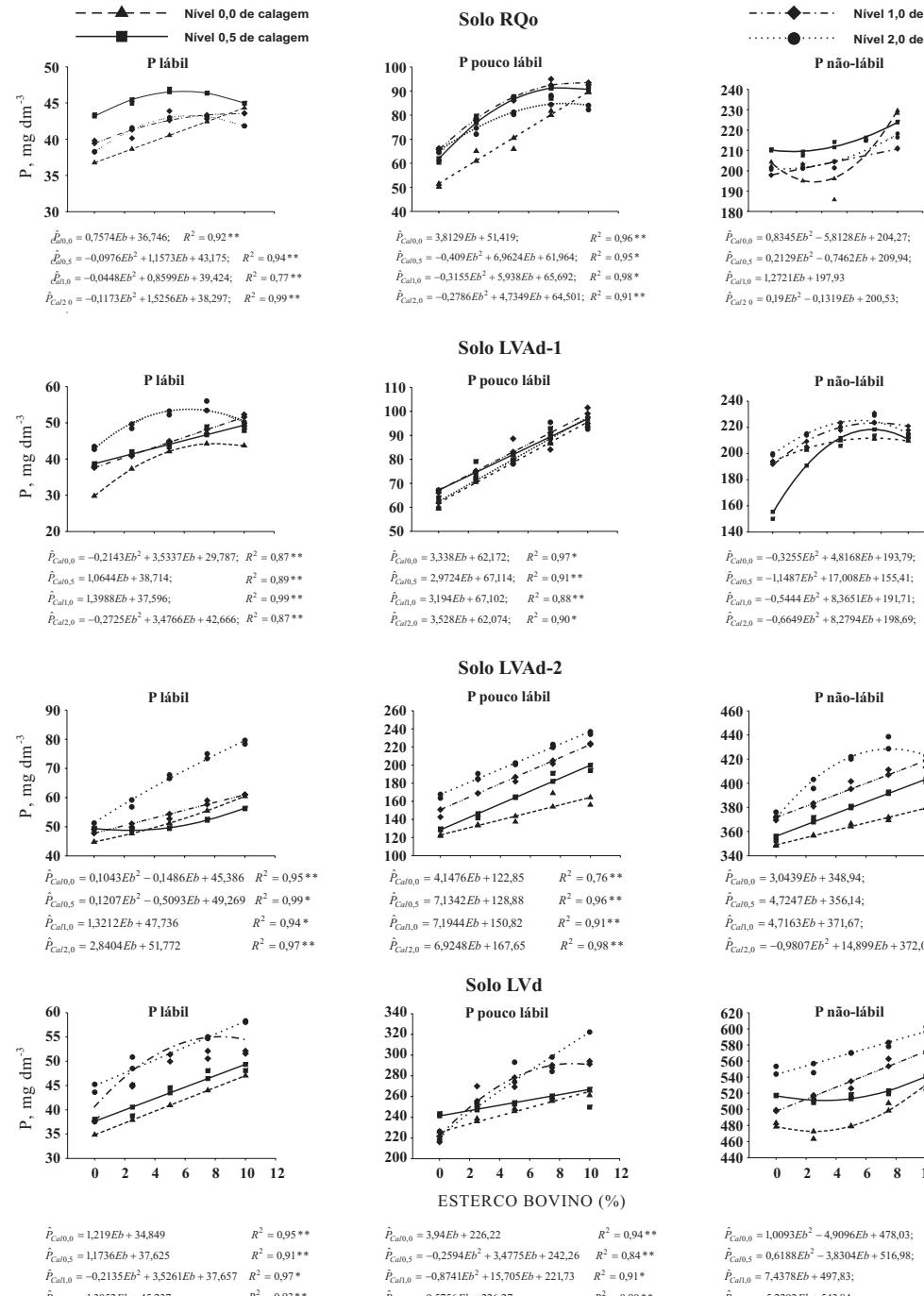
**Figura 2. Teores de matéria orgânica (MO) e P Mehlich-1 em função da aplicação de esterco bovino (do volume de solo) e calagem (Cal - vezes a dose para elevar V = 60 %) nos solos RQo, LVAd-1, LVd. \*\*; \* e ns: significativo a 1 e 5 % e não-significativo, respectivamente.**

pela maior capacidade de adsorção de P dos solos mais argilosos, que apresentam a seguinte ordem decrescente: LVd > LVAd-2 > LVAd-1 > RQo (Souza et al., 2006). Nesta ordem, os solos apresentam teores decrescentes de MO, Fe<sub>d</sub>, Fe<sub>o</sub>, gibbsita e argila e crescentes de Ki e Kr (Quadro 1). À medida que os solos apresentam maior teor de óxidos, aumenta a adsorção de P e seu teor nas formas ligadas a Al e Fe. Os solos que apresentaram maiores valores de P Mehlich-1 corresponderam àqueles com maiores valores de Ki (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Kr (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Quadro 1).

A calagem e adubação orgânica, bem como a interação entre os dois fatores, influenciaram significativamente as formas de P em todos os solos

independentemente das doses de calcário. Os resultados corroboram os dados de Tiessen et al. (1994), os quais demonstram que a calagem e a adubação orgânica alteram a dinâmica das transformações do P no solo submetido a diferentes sistemas de manejo. Em estudos realizados em cafeeiros cultivados em Latossolo Roxo da Bahia, observado que as principais transformações do P no solo eram devidas às alterações nos valores de pH e na forma de matéria orgânica do solo (Pavan & Chaves, 1998). Resultados semelhantes foram obtidos por Souza et al. (2004), estudando o efeito da aplicação de fertilizantes minerais e chorume sobre a disponibilidade das formas de P no solo. Vários outros

## FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA...



Quanto à contribuição das formas lábil, pouco lábil e não-lábil, independentemente dos tratamentos, verificou-se pequena participação da fração de P lábil no *pool* total de P, predominando nesses solos as formas de P não-lábeis. Fernandes et al. (2002), trabalhando com solos de várzea do sul de Minas Gerais, e Ivanoff et al. (1998), com Histosols de Everglades, do sul da Flórida (EUA), também verificaram pequena participação do P lábil no P total dos solos. Segundo Walker & Syers (1976), em solos altamente intemperizados, predominantes em regiões tropicais, a maior parte do P se encontra sob as formas não-lábil, oclusa ou, ainda, sob formas orgânicas estáveis. As formas não-lábeis de P, compostas por frações relativamente insolúveis ligadas ao Ca e estáveis de Po e insolúveis de Pi e, portanto, não disponíveis em curto prazo, foram as responsáveis pela maior parte do P total nos solos.

As formas pouco lábeis de P (Pi e Po-NaOH), com disponibilidade restrita à absorção vegetal, foram as que apresentaram o maior crescimento relativo, sendo essa fração uma importante fonte de P para a absorção vegetal. O hidróxido de sódio extrai formas de P consideradas de baixa disponibilidade para as plantas, associadas a fosfatos amorfos e cristalinos de Fe e Al (William et al., 1980); contudo, em solos de regiões tropicais, essas formas são relativamente dinâmicas (Tiessen et al., 1992), corroborando os dados de Araújo & Salcedo (1997). Convém salientar que, em estudo de Araújo et al. (1993), realizado na zona canavieira do Nordeste, constatou-se que o Pi e Po-NaOH contribuem bastante para o crescimento vegetal, indicando caráter lábil dessa forma de P.

O aumento observado na fração de Po-NaOH indica efeito de grande importância da aplicação de resíduo orgânico, pois esse reservatório representa um compartimento importante na ciclagem de P no solo (Tate & Salcedo, 1988). Por processos de mineralização/imobilização o P orgânico pode se comportar como fator quantidade, tamponando as formas mais lábeis de P por meio do controle da mineralização (Tiessen et al., 1984). Essas formas são consideradas frações com disponibilidade restrita e se comportam como um reservatório (fator quantidade), representando um compartimento apreciável do nutriente no solo, sendo considerada como fonte e dreno (Hedley et al., 1982; Tiessen et al., 1984; Novais & Smyth, 1999). Como a maior parte do P disponível às plantas é proveniente da matéria orgânica, os processos biológicos influenciam bastante a distribuição das formas de P no solo (Walbridge, 1991). Os processos biológicos regulam a dinâmica e distribuição de formas lábeis de P, e a reciclagem da forma orgânica é um importante fator na disponibilização desse nutriente às plantas (Adepetu & Corey, 1976).

LVAd-1 > RQo. Essa seqüência é inversa à para o P Mehlich-1, indicando que, dependendo desse extrator pode não extrair todas as formas de P. Para os valores de P pouco lábil (Pi + 0,1 e 0,5 mol L<sup>-1</sup>) e não-lábil (P-HCl + P-ri) a ordem decrescente foi: LVd > LVAd-2 > RQo.

O aumento das formas de P pouco lábil após aplicação de calcário pode ser devido à oxidação da matéria orgânica e aumento dos valores das amorfos nesses solos durante o período de cultivo (Fernandes et al., 2002). Ainda, segundo Smyth (1999), com a aplicação de calcário, a dispersão dos vários compostos presentes no solo eleva o pH, expõe cargas elétricas positivas que adsorvem P, e, também, a formação de precipitados de Al, que podem adsorver o P. Os polianions hidroxídios de Al recém-formados apresentam maior afinidade por P (Haynes, 1984). A forma de P que compreende as formas de P ligadas a minerais, embora considerada de baixa solubilidade em solos tropicais, não apresenta estabilidade irreversível, podendo ficar disponível à absorção vegetal (Araújo et al., 1993).

Nos quatro solos estudados, o P residual (RQo) que mais contribuiu para o *pool* de P não-lábil (P-HCl + P-residual), independentemente da aplicação de resíduo orgânico e, ou, calcário. Segundo Fernandes et al. (2002), Araújo et al. (1993) e Pavan et al. (1996), esse resultado é esperado em solos tropicais, pois o P residual representa o P ocluso, retido pela goethita e gibbsita, o que explica os maiores teores dessa forma de P nos solos mais intemperizados, com teores mais elevados de óxidos de Al e Fe. As formas de P lábil, pouco lábil e não-lábil têm influência da textura, mineralogia e teor de matéria orgânica do solo nessas frações de P, indicando que é necessário considerar a adequada manejo da adubação fosfatada, para se considerar os atributos do solo ligados à capacidade, independentemente da aplicação de resíduos orgânicos e, ou, calcário.

## CONCLUSÕES

1. A adição de esterco bovino e de resíduos orgânicos incrementou os valores de P Mehlich-1, sem alterações condicionadas à mineralogia e textura dos solos mais argilosos, intemperizados e com teores de óxidos, menores são os valores de P disponível.

2. Em geral, a adição de esterco bovino e resíduos orgânicos incrementa os valores de P no solo.

3. Independentemente da aplicação de esterco bovino, as formas de P pouco lábil (Pi + 0,1 e 0,5 mol L<sup>-1</sup>) e não-lábil (P-HCl + P-ri) apresentaram maior disponibilidade de P.

## FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS SOB INFLUÊNCIA DA CALAGEM E ADUBAÇÃO ORGÂNICA...

4. Predominaram as formas de P não-lábeis, sendo as alterações nos solos decrescentes na seguinte ordem de intensidade: LVd > LVAd-2 > LVAd-1 > RQo.

### LITERATURA CITADA

- ADEPETU, J.A. & COREY, R.B. Organic phosphorus as a predictor of plant available phosphorus in soils of Southern Nigeria. *Soil Sci.*, 122:159-164, 1976.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. B. Inf. SBCS, 25:27-32, 2000.
- ALVAREZ V., V.H. Avaliação da fertilidade do solo (Superfícies de resposta – Modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta). Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 75p.
- ALVAREZ V., V.H. & FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios de casa de vegetação. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:48-55, 1990.
- ARAÚJO, M.S.B. & SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região Nordeste. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:643-650, 1997.
- ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. II. Formas disponíveis e efeito residual do P acumulado. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:397-403, 1993.
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, America Society of Agronomy, 1965. v.1. p.545-566.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1997. 212p.
- FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V.; FURTINI, A.E. & CURI, N. Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:373-383, 2002.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) para Windows versão 4. 0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., São Carlos, 2000. Anais. São Carlos, Universidade Federal de Carlos, 2000. p.255-258.
- HAYNES, R.J. Lime and phosphate in the soil-plant system. *Adv. Agron.*, 37:249-315, 1984.
- HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on soil phosphorus availability in soils with different mineralogies. *Soil Sci.*, 152:463-471, 1991.
- IVANOFF, D.B.; REDDY, K.R. & ROBINSON, S. Fractionation of organic phosphorus in selected soils. *Soil Sci.*, 163:36-45, 1998.
- IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P. & BAHAN, J. Soil amendments and phosphorus dynamics: II. Influence of soil phosphorus fractions. *Soil Sci.*, 161:43-50, 1996.
- KHURI, A.I. & CORNELL, J.A. Response surface methodology and analyses. 2.ed. New York, Marcel Dekker, 1996.
- KLUG, H.P. & ALEXANDER, L.E. *X-ray diffraction for polycrystalline and amorphous materials*. John Wiley, 1974. 716p.
- KRISHNA MURTI, G.S.R.; VOLK, V.V. & JACKSON, M. Calorimetric determination of iron of mixed orthophenantroline. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30:1966.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, N.L. Iron oxide reactions in soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clays Miner.*, 3:31-37, 1953.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphorus in natural waters. *Chim. Acta*, 26:31-36, 1962.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e plantas sob condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S. A method to determine phosphorus adsorption maximum of soils and its relation to the Langmuir Isotherm. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 149, 1957.
- PAVAN, M.A. & CHAVES, J.C.D. Alterações nas formas de fósforo no solo associadas com a densidade de feijoeiros. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:251-256, 1996.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical computing, Vienna, Austria. 2004. [em: <http://www.R-project.org>](http://www.R-project.org). acesso em: 2004.
- RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARINI, M.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. & BATAILLE, J. Análise química do solo para fins de fertilidade. Fundação Cargil, 1987. 170p.
- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenhaltigen bondes durch extraktion mit ammonium-oxalat. *Zeitschrift Pflanz.*, 105:194-202, 1964.
- SILVA, F.C. & RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:267-288, 1999.
- SOUZA, R.F.; FAQUIN, V.; TORRES, P.R.F. & BAGET, B. Calagem e adubação orgânica: influência na disponibilidade de fósforo em solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:975-982, 2006.

- TIESSEN, H.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrients and soil organic matter dynamic under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 39:139-159, 1992.
- TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. & COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:853-858, 1984.
- TOKURA, A.M.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C.H. & ALOVISI, A.A. Formas de fósforo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:1467-1476, 2002.
- TURRIÓN, M.B.; GLASER, B. & SOLOMON, D. Effects of deforestation on phosphorus pools in mountain soils of the Alay Range, Kyrgyzia. *Biol. Fert. Soils*, 31:134-142, 2000.
- WALBRIDGE, M.R. Phosphorus availability in acid soils of the lower North Carolina coastal plain. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72:2083-2100, 1991.
- WALKER, T.W. & SYERS, J.K. The fate of phosphorus in pedogenesis. *Geoderma*, 15:1-19, 1976.
- WILLIAM, J.D.H.; MAYER, T. & NRIAGU, J.O. Effects of phosphorus minerals common in soils and sediments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:462-465, 1980.
- ZHENG, Z.; MCLEOD, J.A.; SANDERSON, J.B. & HARRIS, J. Soil phosphorus dynamics after annual application of mineral fertilizers and liquid dairy manure: Fertilizer placement and path analyses. *Soil Sci.*, 169:449-456, 2004.