

Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz

Alessandra Mayumi Tokura^{1*}, Antonio Eduardo Furtini Neto², Leandro Flávio Carneiro³, Nilton Curi², José Zilton Lopes Santos² e Alves Alexandre Alovisi⁴

¹Faculdade Anhanguera de Dourados, Rua Manoel Santiago, 1155, 79825-150, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil.

²Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil. ³Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. ⁴SNP Consultoria, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil.

*Autor para correspondência. E-mail: amtokura@zipmail.com.br

RESUMO. O experimento foi conduzido com o objetivo de avaliar a influência da aplicação de silício (Si) e fósforo (P) sobre as formas orgânicas e inorgânicas do P em dois solos (Neossolo Quartzarênico órtico e Latossolo Vermelho distroférico – LVdf), com textura e mineralogia distinta, antes e após o cultivo do arroz. O experimento foi realizado utilizando-se esquema fatorial, sendo quatro doses de P e três doses de Si. A fertilização fosfatada alterou as formas lábeis de P, enquanto as formas pouco lábeis apresentaram comportamento dependentes da textura e mineralogia. A aplicação do Si apresentou-se promissora em aumentar a disponibilidade de P para as plantas de arroz.

Palavras-chave: fertilização fosfatada e silicatada, ânions, fracionamento de P.

ABSTRACT. Dynamics of phosphorus forms in soils with contrasting texture and mineralogy cultivated with rice. Two experiments were conducted with the objective of evaluating the influence of Si and P application upon organic and inorganic P forms in two soils: classificação da FAO e Soil Taxonomy (Orthic Quartzarenic Neosol – RQo- and Dystroférric Red Latosol – LVdf), having contrasting texture and mineralogy, before and after rice cultivation. The experimental was in a 4 x 3 factorial scheme, being four P doses and three Si doses. The phosphated fertilization altered the P labile forms, while in the case of low labile P forms the behaviour was dependent upon soil texture and mineralogy. The application of Si was shown to be promising to increase the availability of P for plants in rice.

Keywords: phosphated fertilization, silicon, anions, P fractionation.

Introdução

O silício (Si) é um dos elementos químicos de maior ocorrência na fase sólida e líquida do solo, mas seu papel na agricultura não é muito bem conhecido. Trabalhos têm demonstrado o efeito benéfico de sua aplicação no aumento da produção de diversas culturas como cana-de-açúcar, arroz e outras gramíneas (EPSTEIN, 1994). Um dos efeitos do Si no crescimento vegetal pode estar associado com as interações deste elemento com o fósforo no solo e na planta. Neste contexto, a retenção de Si nas superfícies adsorvedoras dos minerais, precedente à aplicação de P, parece promissora em aumentar a disponibilidade de P, como solos da região dos cerrados, que se caracterizam pelo intenso processo de remoção de sílica e bases do perfil (MARQUES et al., 2004).

O ânion silicato compete com o fosfato pelos mesmos sítios de adsorção do solo (FASSBENDER, 1987). Neste processo, na solução do solo, inicialmente ocorre um aumento

na concentração do ácido monossilícico. A próxima fase é a troca do ânion fosfato pelo ânion silicato. Estas reações são seguidas pela dessorção do ânion fosfato, tornando-o mais disponível em solução (MATICHENKOV; AMMOSSOVA, 1996). A velocidade das reações de adsorção do Si em solos oxidados é alta (McKEAQUE; CLINE, 1963), sendo, portanto, previsto que grandes quantidades de Si possam ser adsorvidas, minimizando a fixação de P e, portanto, as necessidades de adubações fosfatadas consequentes.

Vários fatores podem alterar a dinâmica do P no solo, como o próprio uso do solo, as remoções deste nutriente pelas plantas, aplicações de fertilizantes fosfatados (TIESSSEN et al., 1983) e também existem evidências do efeito do silício na dinâmica do fósforo no solo (PRADO; FERNANDES, 2001). Neste contexto, o conhecimento da natureza e distribuição das formas de P no solo pode fornecer informações importantes para o processo de avaliação da disponibilidade do fósforo.

Além da quantidade de argila, sua constituição mineralógica é de suma importância na adsorção de P pelos solos, o que se justifica pela peculiaridade da energia de ligação entre o P e cada fração adsorvente. Caulinita é o principal e possivelmente o único mineral silicatado em quantidade expressiva nos solos altamente intemperizados; goethita e hematita são os principais óxidos de ferro, e gibbsita é praticamente o único óxido de alumínio presente nesses solos (FONTES et al., 2001). Nesse aspecto, os oxi-hidróxidos de Fe e de Al são considerados os constituintes da fração argila mais efetivos na adsorção de P, sendo que a goethita é considerada o principal componente da fração argila responsável por este fenômeno em solos do Brasil Central (RESENDE et al., 2005). Contudo, todos eles apresentam grande diversidade de características como tamanho de partículas, faces expostas, grau de substituição isomórfica, grau de envelhecimento, etc., o que os induzem a comportamentos bem diferenciados quanto a importantes reações do solo.

O fracionamento do P no solo tem sido utilizado para estudar as transformações desse nutriente no solo (HEDLEY et al., 1982).

Em vista das considerações anteriores, o objetivo deste trabalho foi avaliar em solos com textura e mineralogia contrastantes, sob condições de casa de vegetação, a influência do Si e do P na dinâmica das formas de fósforo em dois solos com textura e mineralogia distintas.

Material e métodos

Foram selecionados dois solos: um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) textura muito argilosa, oxidado, de Lavras, Estado de Minas Gerais, e um Neossolo Quartzarênico órtico (RQo) textura arenosa, caulinitico, de Itutinga, Estado de Minas Gerais, ambos coletados na camada de 0 a 0,02 m de profundidade, sob vegetação nativa (floresta e cerrado, respectivamente).

Foram selecionados dois solos: um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) textura muito argilosa, oxidado, de Lavras, Estado de Minas Gerais, e um Neossolo Quartzarênico órtico (RQo) textura arenosa, caulinitico, de Itutinga, Estado de Minas Gerais, ambos coletados na camada de 0 a 0,02 m de profundidade, sob vegetação nativa (floresta e cerrado, respectivamente).

Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em peneira com malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e submetidas a análises físicas, químicas e mineralógicas (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas e mineralógicas dos solos Neossolo Quartzarênico órtico (RQo) e do Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) utilizados nos experimentos.

| Atributos dos solos | Solos | |
|---|-------|-------|
| | RQo | LVdf |
| pH em água | 5,0 | 4,8 |
| Alumínio trocável (cmol _c dm ⁻³) | 0,9 | 1,1 |
| Cálcio trocável (cmol _c dm ⁻³) | 0,4 | 0,4 |
| Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 0,1 | 0,2 |
| K ⁺ (mg dm ⁻³) | 23 | 30 |
| H ⁺ + Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 4,5 | 9,5 |
| P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³) | 6,8 | 1,1 |
| P-resina (mg dm ⁻³) | 5,4 | 12,9 |
| SB (cmol _c dm ⁻³) | 0,6 | 0,7 |
| CTC efetiva (cmol _c dm ⁻³) | 1,5 | 1,7 |
| CTC a pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³) | 5,1 | 10,2 |
| V (%) | 12 | 7 |
| m (%) | 60 | 61 |
| Matéria orgânica (dag kg ⁻¹) | 1,7 | 3,9 |
| Si (mg dm ⁻³) | 1,3 | 6,2 |
| B (mg dm ⁻³) | 0,3 | 0,4 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 1,0 | 2,1 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 60,2 | 73,1 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 6,4 | 11,4 |
| Zn (mg dm ⁻³) | 0,1 | 0,1 |
| Areia grossa (g kg ⁻¹) | 470 | 110 |
| Areia fina (g kg ⁻¹) | 460 | 60 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 10 | 110 |
| Argila (g kg ⁻¹) | 60 | 720 |
| SiO ₂ (g kg ⁻¹) | 31 | 153 |
| Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) | 36 | 262 |
| Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) | 11 | 237 |
| TiO ₂ (g kg ⁻¹) | 5 | 202 |
| P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹) | 0 | 1,4 |
| Fe _a (g kg ⁻¹) | 2,0 | 138,8 |
| Fe _c (g kg ⁻¹) | 0,1 | 2,8 |
| Ct (g kg ⁻¹) | 778 | 160 |
| Gb (g kg ⁻¹) | 59 | 310 |

A análise física envolveu a determinação da composição granulométrica da TFSA pelo método da pipeta (DAY, 1965). As análises químicas incluíram pH, complexo sortivo, C orgânico e micronutrientes. A disponibilidade de P foi avaliada utilizando extrator Mehlich-1 (EMBRAPA, 1997) e resina de troca iônica (RAIJ; FEITOSA, 1980). Os óxidos de Fe livres da fração argila foram obtidos por dissolução com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) (MEHRA; JACKSON, 1960); os óxidos de Fe menos cristalinos da fração argila por meio do oxalato ácido de amônio (Feo) conforme Schwertman et al. (1986) e os óxidos de ferro e alumínio do ataque sulfúrico da TFSA foram determinados conforme Claessen (1997). Foram quantificados na argila desferrificada, os teores de gibbsita e caulinita por meio de análise térmica diferencial. A determinação do Si solúvel nos solos foi realizada conforme método proposto por McKeague e Cline (1963).

Dois experimentos foram conduzidos em casa-de-vegetação com a cultura do arroz nos solos RQo e LVdf. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 3, com três repetições, sendo quatro doses de P (0, 80, 240 e 410; 0, 110, 330 e 560 mg dm⁻³, respectivamente para o RQo e LVdf), definidas em função do P

remanescente (ALVAREZ V. et al., 2000) e três doses de Si (0, 240 e 410; 0, 330 e 560 mg dm⁻³, respectivamente para o RQo e LVdf), totalizando 36 parcelas (vasos de 3 dm³) para cada solo.

As amostras do solo contido nos vasos foram submetidas a três incubações seqüenciais por um período de 30 dias cada uma, sob teor de água equivalente a 60% do volume total de poros (FREIRE et al., 1980), controlados por pesagem diária. A primeira foi realizada, com calcário dolomítico calcinado micropulverizado (35% CaO e 14% MgO), na quantidade indicada para elevar o valor da saturação por bases a 50%. A segunda constou da aplicação das doses de Si, na forma sólida (H₄SiO₄; 60% SiO₂), e a terceira incubação (fertilização básica), idêntica nos dois solos, correspondeu aos seguintes teores de nutrientes na forma de sais: 100 mg de N; 150 mg de K; 62 mg de S; 0,81 mg de B; 1,3 mg de Cu; 5,0 mg de Zn; 3,6 mg de Mn; 1,6 mg de Fe e 0,15 mg de Mo por dm³ de solo. Os nutrientes foram solubilizados em água e aplicados no solo via solução. Juntamente com a fertilização básica foram aplicadas as doses de P, via solução.

Após o período de incubação e do cultivo do arroz, foram coletadas amostras de cada vaso para as determinações analíticas (Tabela 2) e para a extração sequencial das formas de P dos solos (P-resina; Pi-bicarb; Po-bicarb; Pi-NaOH 0,1; Po-NaOH 0,1; Pi-NaOH 0,5; Po-NaOH 0,5; P-HCl e P-residual), conforme metodologia descrita por Hedley et al. (1982).

As frações de Pi e Po foram submetidas a análises de variância e as formas de P, matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca de grãos (MSGR), além das análises de variância, foram submetidas à

regressão, utilizando o programa de análises estatísticas SISVAR (FERREIRA, 2008). Correlações simples foram realizadas entre as formas de P com a matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de grãos (MSGR) e fósforo acumulado na MSPA (P-MSPA), utilizando o programa de análises estatísticas SAS (SAS, 1989).

Resultados e discussão

Frações inorgânicas de P (P-inorgânico)

A aplicação de P promoveu efeito isolado na fração P-resina no RQo enquanto que no LVdf verificou-se interação significativa entre doses de P e Si. Em ambos solos, para as frações Pi-bicarb e Pi-NaOH 0,5, a análise de variância mostrou interação entre os fatores em estudo. As frações Pi-NaOH 0,1 e P-HCl, no RQo, também mostraram interação entre os fatores; já no LVdf, para o Pi-NaOH 0,1 houve efeito isolado das doses de P e para o P-HCl não houve efeito e nem interação entre os fatores estudados.

Apesar da ausência de desdobramento e ajustes de modelos matemáticos às interações e efeitos dos fatores, para as frações de P, observa-se que as frações P-resina, Pi-bicarb e Pi-NaOH 0,1 aumentaram com o incremento das doses de P aplicadas nos dois solos, o que não ocorreu para as demais frações de P inorgânico (Tabela 3). O cultivo do solo reduziu os teores de P-resina e Pi-bicarb em todos os tratamentos nos dois solos (Tabela 3), confirmando a labilidade destas duas frações (HEDLEY et al., 1982). Segundo Lilienfein et al. (2000) a influência do cultivo do solo é mais evidente nas frações mais disponíveis de P.

Tabela 2. Atributos dos solos após a correção da acidez, adubação básica e aplicação das doses de Si e de P.

| Trat. ¹ | Solo | pH | Atributos | | | | | | | | | | |
|--------------------|------|-----|------------------------------------|-----|-----|-----|------|--------------|------|---------------|----------|---------------------------------|--|
| | | | K mg dm ⁻³ | Ca | Mg | Al | H+Al | CTC a pH 7,0 | m | V | P-resina | Si | |
| | | | ----- cmol. dm ⁻³ ----- | | | | | | | ----- % ----- | | ----- mg dm ⁻³ ----- | |
| P0 Si0 | RQo | 5,1 | 119 | 1,3 | 0,7 | 0,3 | 2,9 | 5,2 | 11,0 | 44,6 | 6,1 | 2,7 | |
| P0 Si240 | RQo | 5,0 | 121 | 1,1 | 0,9 | 0,3 | 3,0 | 5,4 | 11,0 | 44,2 | 6,0 | 5,5 | |
| P0 Si410 | RQo | 5,0 | 120 | 1,2 | 1,2 | 0,3 | 3,0 | 5,7 | 9,7 | 47,7 | 6,8 | 6,7 | |
| P80 Si0 | RQo | 5,1 | 120 | 1,2 | 0,9 | 0,3 | 2,9 | 5,3 | 11,0 | 45,4 | 11,6 | 3,0 | |
| P80 Si240 | RQo | 4,9 | 117 | 1,2 | 0,8 | 0,3 | 3,1 | 5,4 | 12,7 | 42,6 | 12,5 | 5,6 | |
| P80 Si410 | RQo | 5,0 | 120 | 1,2 | 0,7 | 0,3 | 3,1 | 5,3 | 11,7 | 41,6 | 11,9 | 6,9 | |
| P240 Si0 | RQo | 5,0 | 121 | 1,2 | 0,7 | 0,3 | 3,5 | 5,8 | 12,0 | 40,0 | 47,1 | 3,2 | |
| P240 Si240 | RQo | 5,0 | 116 | 1,2 | 0,8 | 0,3 | 3,5 | 5,8 | 11,0 | 40,5 | 48,6 | 5,8 | |
| P240 Si410 | RQo | 5,0 | 114 | 1,1 | 1,0 | 0,3 | 3,5 | 5,9 | 11,0 | 40,9 | 48,2 | 5,9 | |
| P410 Si0 | RQo | 5,0 | 117 | 1,3 | 0,7 | 0,3 | 3,9 | 6,2 | 11,0 | 37,2 | 83,1 | 3,3 | |
| P410 Si240 | RQo | 5,0 | 118 | 1,4 | 0,6 | 0,2 | 4,3 | 6,7 | 8,0 | 35,1 | 84,2 | 4,8 | |
| P410 Si410 | RQo | 5,0 | 115 | 1,3 | 0,7 | 0,3 | 4,3 | 6,6 | 11,0 | 34,6 | 82,6 | 5,3 | |
| P0 Si0 | LVdf | 5,0 | 130 | 2,4 | 1,7 | 0,1 | 5,4 | 9,7 | 2,0 | 44,7 | 5,9 | 5,3 | |
| P0 Si330 | LVdf | 5,0 | 125 | 2,5 | 1,5 | 0,1 | 5,6 | 10,0 | 2,0 | 43,9 | 5,9 | 12,4 | |
| P0 Si560 | LVdf | 5,0 | 127 | 2,5 | 1,7 | 0,2 | 5,8 | 10,4 | 3,0 | 43,9 | 6,2 | 14,9 | |
| P110 Si0 | LVdf | 4,9 | 130 | 2,5 | 1,7 | 0,2 | 6,5 | 11,1 | 4,0 | 41,0 | 13,0 | 6,0 | |
| P110 Si330 | LVdf | 5,0 | 125 | 2,5 | 1,6 | 0,2 | 6,3 | 10,7 | 4,0 | 41,4 | 14,1 | 12,4 | |
| P110 Si560 | LVdf | 5,0 | 133 | 2,6 | 1,8 | 0,2 | 6,1 | 10,8 | 4,0 | 44,0 | 12,9 | 14,7 | |
| P330 Si0 | LVdf | 4,8 | 135 | 2,5 | 1,9 | 0,2 | 6,5 | 11,4 | 4,0 | 42,5 | 40,9 | 6,9 | |
| P330 Si330 | LVdf | 4,8 | 137 | 2,6 | 1,8 | 0,2 | 7,3 | 12,0 | 4,0 | 39,1 | 51,9 | 12,6 | |
| P330 Si560 | LVdf | 5,0 | 143 | 2,6 | 1,7 | 0,2 | 6,3 | 11,0 | 4,0 | 42,4 | 55,6 | 15,8 | |
| P560 Si0 | LVdf | 4,8 | 144 | 2,5 | 1,7 | 0,2 | 7,1 | 11,6 | 4,0 | 39,2 | 103,2 | 7,5 | |
| P560 Si330 | LVdf | 4,9 | 143 | 2,5 | 1,6 | 0,2 | 6,5 | 11,1 | 4,0 | 40,8 | 107,8 | 14,2 | |
| P560 Si560 | LVdf | 4,8 | 128 | 2,4 | 1,8 | 0,3 | 7,9 | 12,5 | 6,7 | 36,8 | 108,6 | 13,9 | |

¹As doses de P e Si estão em mg dm⁻³.

Tabela 3. Frações de fósforo inorgânico nos solos RQo e LVdf após cultivo do arroz.

| Trat ¹ | Solo | Frações de P (mg dm ⁻³) | | | | |
|-------------------|------|-------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| | | P-resina ² | Pi-bicarb ² | Pi-NaOH 0,1 ² | Pi-NaOH 0,5 ² | Pi-HCl ² |
| P0 Si0 | RQo | 4,3 (-42%) | 0,9 (-89%) | 12,6 (+6%) | 4,4 (+64%) | 0,7 (-52%) |
| P0 Si240 | | 4,9 (-47%) | 0,6 (-88%) | 11,4 (+8%) | 4,6 (+68%) | 1,0 (-46%) |
| P0 Si410 | | 5,1 (-42%) | 0,9 (-86%) | 11,6 (-4%) | 5,5 (+71%) | 1,2 (-25%) |
| P80 Si0 | | 8,1 (-55%) | 5,9 (-47%) | 18,3 (-5%) | 3,9 (+44%) | 1,8 (+15%) |
| P80 Si240 | | 9,3 (-51%) | 5,5 (-62%) | 14,3 (-10%) | 2,0 (+30%) | 1,1 (-47%) |
| P80 Si410 | | 8,6 (-58%) | 4,6 (-60%) | 17,4 (-8%) | 2,9 (+38%) | 1,0 (-46%) |
| P240 Si0 | | 42,0 (-23%) | 25,8 (-32%) | 37,1 (-1%) | 3,2 (+52%) | 1,3 (-38%) |
| P240 Si240 | | 43,1 (-20%) | 21,8 (-35%) | 36,6 (-1%) | 3,4 (+53%) | 2,0 (-20%) |
| P240 Si410 | | 41,0 (-29%) | 20,2 (-46%) | 33,1 (-3%) | 1,4 (-17%) | 1,7 (-25%) |
| P410 Si0 | | 66,6 (-25%) | 36,2 (-47%) | 45,9 (-32%) | 3,6 (+25%) | 1,9 (-47%) |
| P410 Si240 | | 70,2 (-22%) | 43,2 (-41%) | 57,8 (-21%) | 4,2 (+64%) | 2,0 (-50%) |
| P410 Si410 | | 68,2 (-22%) | 43,8 (-46%) | 46,9 (-32%) | 3,6 (-5%) | 1,7 (-57%) |
| CV(%) | | 7,00 | 15,16 | 7,13 | 16,75 | 18,72 |
| P0 Si0 | LVdf | 1,1 (-58%) | 3,1 (-21%) | 57,2 (+4%) | 69,4 (-1%) | 1,3 (-52%) |
| P0 Si330 | | 1,0 (-61%) | 3,3 (-12%) | 59,9 (+10%) | 69,8 (-2%) | 1,4 (-51%) |
| P0 Si560 | | 1,1 (-53%) | 4,0 (-31%) | 55,6 (+4%) | 68,4 (-3%) | 1,4 (-52%) |
| P110 Si0 | | 2,7 (-74%) | 5,8 (-48%) | 100,2 (-14%) | 78,6 (-1%) | 1,4 (-54%) |
| P110 Si330 | | 5,5 (-33%) | 7,3 (-36%) | 95,7 (-6%) | 82,2 (-1%) | 1,4 (-55%) |
| P110 Si560 | | 4,4 (-65%) | 4,6 (-58%) | 99,6 (+1%) | 81,0 (-1%) | 1,3 (-54%) |
| P330 Si0 | | 17,9 (-57%) | 16,6 (-51%) | 212,4 (+7%) | 99,0 (-2%) | 1,9 (-51%) |
| P330 Si330 | | 34,4 (-28%) | 8,5 (-79%) | 206,4 (+2%) | 85,1 (-18%) | 1,3 (-64%) |
| P330 Si560 | | 18,9 (-57%) | 12,1 (-67%) | 217,5 (+8%) | 92,8 (-6%) | 1,4 (-62%) |
| P560 Si0 | | 67,4 (-27%) | 30,8 (-41%) | 269,4 (+22%) | 98,8 (-15%) | 1,5 (-69%) |
| P560 Si330 | | 67,4 (-17%) | 37,6 (-47%) | 282,8 (+28%) | 98,2 (-11%) | 1,7 (-62%) |
| P560 Si560 | | 70,4 (-6%) | 37,3 (-47%) | 260,5 (+4%) | 95,8 (-11%) | 1,7 (-64%) |
| CV(%) | | 8,82 | 16,61 | 6,01 | 3,44 | 21,15 |

Valores entre parênteses indicam as porcentagens de redução (-) ou aumento (+) das frações de P, após o cultivo do arroz. ¹As doses de P e Si estão em mg dm⁻³; ²P-resina (forma extraída pela resina); Pi-bicarb (forma extraída pelo bicarbonato de sódio); Pi-NaOH 0,1 e 0,5 (formas extraídas por NaOH 0,1 e 0,5 mol L⁻¹); Pi-HCl (forma extraída por HCl).

Com relação aos teores de Pi-NaOH, que compreende o P ligado a óxidos de ferro e alumínio, observa-se na Tabela 3, que no LVdf, independente da dose, os teores dessa fração são superiores que os obtidos no RQo. Esse efeito pode ser atribuído aos maiores teores de óxidos de Fe e Al no LVdf (Tabela 1) que apresentam alta capacidade de imobilização de P.

As frações de Pi-NaOH 0,1 e 0,5, consideradas pouco lábeis, apresentaram comportamento oposto nos dois solos. A fração Pi-NaOH 0,1 no RQo diminuiu após o cultivo do arroz, diferentemente do observado no LVdf. (Tabela 3). Convém ressaltar que a maior parte do P do compartimento considerado pouco lábil, em ambos os solos, encontra-se na fração Pi-NaOH 0,1, a qual é considerada a mais dinâmica no solo dentre as frações pouco lábeis (RHEINHEIMER et al., 2000; SANTOS et al., 2008). A redução da fração Pi-NaOH 0,1 no RQo após o cultivo sugere ser esta fração a principal tamponante das frações mais lábeis e os baixos teores de argila no RQo (Tabela 1), ajudam a explicar a redução generalizada (maior labilidade) da fração Pi-NaOH 0,1 observada neste sistema.

É interessante observar que houve uma maior redução para o Pi-NaOH 0,1 no RQo, na maior dose de P, combinado com as doses de Si (Tabela 3), sugerindo que nas condições deste experimento, o Si proporcionou maior disponibilidade de P para as plantas de arroz. Essa observação é reforçada pelos coeficientes de correlação do Pi-NaOH 0,1 com as

produções de MSPA, MSGR e acúmulo de P na MSPA, os quais foram altamente significativos e positivos (Tabela 4). Segundo Prado e Fernandes (2001), o silicato é capaz de dessorver o fósforo que se encontra retido na superfície sólida do solo.

Tabela 4. Coeficiente de correlação entre as frações e formas de P, com a produção de matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca da parte aérea (MSPA) e fósforo acumulado na MSPA (P-MSPA), nos solos RQo e LVdf, cultivados com arroz, em função das doses de P e Si aplicadas.

| Frações e formas de P | Solo | MSPA | MSGR | P-MSPA |
|-----------------------|------|---------|---------|---------|
| P-resina | RQo | 0,80** | 0,75** | 0,80** |
| Pi-bicarb | | 0,78** | 0,72** | 0,78** |
| Po-bicarb | | 0,25ns | 0,16ns | 0,25ns |
| Pi-NaOH 0,1 | | 0,80** | 0,77** | 0,80** |
| Po-NaOH 0,1 | | -0,65** | -0,74** | -0,65** |
| Pi-NaOH 0,5 | | -0,49** | -0,44** | -0,49** |
| Po-NaOH 0,5 | | -0,15ns | -0,10ns | -0,15ns |
| P-HCl | | 0,61** | 0,49** | 0,61** |
| P-residual | | -0,23ns | -0,06ns | -0,23ns |
| P-lábil | | 0,78** | 0,71** | 0,78** |
| P-pouco lábil | | 0,21ns | 0,11ns | 0,21ns |
| P-não lábil | | -0,18ns | -0,02ns | -0,19ns |
| P-resina | LVdf | 0,58** | 0,77** | 0,58** |
| Pi-bicarb | | 0,54** | 0,74** | 0,55** |
| Po-bicarb | | 0,54** | 0,29+ | 0,55** |
| Pi-NaOH 0,1 | | 0,78** | 0,86** | 0,78** |
| Po-NaOH 0,1 | | 0,30+ | 0,43** | 0,30+ |
| Pi-NaOH 0,5 | | 0,83** | 0,86** | 0,83** |
| Po-NaOH 0,5 | | -0,00ns | -0,22ns | -0,00ns |
| P-HCl | | 0,23ns | 0,16ns | 0,23ns |
| P-residual | | 0,66** | 0,41* | 0,60** |
| P-lábil | | 0,68** | 0,80** | 0,68** |
| P-pouco lábil | | 0,75** | 0,83** | 0,76** |
| P-não lábil | | 0,61** | 0,41* | 0,61** |

***, **, ns: significativo a 1%, 10% e não significativo pelo teste t, respectivamente.

A aplicação do Si pode ter aumentado a disponibilidade do P por diminuir a “energia de

ligação” do fosfato com os colóides inorgânicos. Tal fato explica a redução das frações extraídas com NaOH (Tabela 3), o que aumenta a eficiência dos fertilizantes fosfatados. De acordo com Lopes (1984), a eficiência do Si em aumentar o P disponível do solo não está na capacidade de troca dos ânions silicato pelo fosfato no solo e sim pela saturação ou bloqueio destes sítios de adsorção de P pelo ânion silicato.

Já a fração Pi-NaOH 0,5 no RQo aumentou para a maioria dos tratamentos, com destaque para aqueles que não receberam adubação fosfatada (Tabela 3). Esse resultado pode ser atribuído à menor absorção de P pelo arroz, visto que, nos tratamentos que não receberam adubação fosfatada as plantas não se desenvolveram, favorecendo a precipitação e fixação do P disponível com os óxidos de Fe e Al. Outra explicação pode ter sido que no RQo, o NaOH 0,5 pode ter dissolvido formas inorgânicas recém-precipitadas de P, tendo em vista tratar-se de um solo com menor superfície de adsorção, favorecendo o aumento da proporção das frações mais lábeis de P inorgânico à medida que foi adicionando P ao solo, possivelmente devido à saturação dos sítios de adsorção.

No LVdf, houve redução da fração Pi-NaOH 0,5 para todos os tratamentos, principalmente nas maiores doses de P. Vários autores relatam que a fração Pi-NaOH atua como dreno do P do solo, principalmente em solos com altos teores de Fe e Al e baixo pH (TOKURA et al., 2002), entretanto, essa fração pode apresentar certa labilidade (ARAÚJO et al., 1993; TOKURA et al., 2002), funcionando como tampão do fator quantidade do P do solo (RHEINHEIMER et al., 2000), ou seja, o P adsorvido aos colóides (óxidos de Fe e Al) do LVdf pode estar contribuindo para o P em solução, concordando ao observado por esses autores e reforçada pelos coeficientes de correlação do Pi-NaOH 0,5 com as produções de MSPA, MSGR e acúmulo de P na MSPA, os quais foram altamente significativos e positivos (Tabela 4).

A forma de P-HCl, que compreende as formas de P ligadas ao cálcio, beneficiou-se muito pouco com a aplicação de fósforo. Os baixos valores detectados (sempre inferior a $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$) refletem a participação pouco expressiva dessa fração no compartimento de P inorgânico dos solos em estudo (Tabela 3). Em parte, isso pode ser atribuído aos baixos conteúdos de Ca dos solos tropicais mais intemperizados, que favorecem a formação de compostos de P ligado a Fe e Al (RAIJ, 1991).

No geral, observa-se que houve uma redução dessa fração nos solos após o cultivo do arroz

(Tabela 3). Embora considerada de baixa solubilidade, em solos tropicais, não apresenta estabilidade irreversível, podendo ficar disponível à absorção vegetal em médio prazo (ARAÚJO et al., 1993), o que pode ter ocorrido no presente trabalho, explicando a redução desta fração após o cultivo. Outro aspecto a considerar é a realização de calagem. Para os solos em estudo houve a correção da acidez, de modo que é possível que parte do P-Ca teve influência da adição de calcário, em função do acréscimo da atividade de Ca^{+2} e possibilidade de precipitação com o fosfato. No entanto, deve-se considerar que a recuperação de parte do P não lábil deu-se com um tempo de equilíbrio de 150 dias, insuficiente para a transformação do P não-lábil (NOVAIS; SMYTH, 1999).

É importante ressaltar que a fração P-HCl apresentou correlação significativa e positiva com as variáveis MSPA, MSGR e P-MSPA no RQo (Tabela 4), sugerindo que o tempo de contato do P com o Ca nesse solo não foi suficiente para tornar indisponível o fósforo às plantas, entretanto, no LVdf não houve correlação com as variáveis MSPA, MSGR e P-MSPA, evidenciando que neste solo existem formas de fosfato de cálcio relativamente insolúveis, provavelmente associadas às diferenças nos teores de óxidos de Fe e na mineralogia do solo.

Frações orgânicas de P

A análise de variância das frações de P orgânico (Po) mostrou interação significativa entre as doses de P e Si no RQo e LVdf. Observa-se uma redução das frações orgânicas após o cultivo, principalmente no LVdf (Tabela 5). Essa redução, provavelmente se deve a uma maior mineralização do Po provocada pela adição de fosfato e absorção de P pelas plantas (ARAÚJO et al., 1993). Segundo Kämpf e Curi (2000) os compostos orgânicos apresentam um efeito inibidor no processo de cristalização dos óxidos de Fe e de Al, favorecendo a formação de formas microcristalinas de elevada superfície específica. Tais superfícies têm uma elevada capacidade de retenção de P, mas ao mesmo tempo, vários compostos orgânicos competem com o ânion ortofosfato pelos sítios de adsorção (LÓPEZ-HERNÁNDEZ et al., 1986). Esse processo ajuda a explicar a maior labilidade das frações de P-orgânico no LVdf, principalmente no tocante ao Po-NaOH 0,1, o qual apresentou correlação significativa com MSPA, MSGR e P-MSPA (Tabela 4).

Formas de P

O solo de textura arenosa (RQo) apresentou maiores teores de P nas formas lábil e pouco lábil, comparativamente ao solo argiloso (LVdf) que apresentou maiores teores nas formas pouco lábil e não lábil (Tabela 6), sugerindo que estes resultados são condizentes com o maior teor de argila e presença de óxidos de Fe e Al no LVdf em relação ao RQo (Tabela 1), em acordo com Novais e Smyth (1999), os quais indicam que, entre outros, estes são fatores do solo que podem influenciar a adsorção de fósforo no solo.

Quando se comparam as formas de P antes e após o cultivo do arroz no RQo, verificam-se as maiores reduções das formas lábil e não lábil para todos os tratamentos (Tabela 6). A análise de correlação indicou que o P lábil foi a única forma que se correlacionou com as variáveis MSPA, MSGR e P-MSPA no RQo (Tabela 4), o que está de acordo com a hipótese de que esta forma é potencialmente disponível às plantas, entretanto, a contribuição do P não lábil às plantas para o RQo foi representado pelo P ligado ao cálcio (P-HCl), conforme constatado através da correlação significativa e positiva com as variáveis analisadas (Tabela 4).

Tabela 5. Frações de fósforo orgânico nos solos RQo e LVdf, obtidas por fracionamento.

| Tratamentos ¹ | Solo | Frações de P | | |
|--------------------------|------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | Po-bicarb ² | Po-NaOH 0,1 ² | Po-NaOH 0,5 ² |
| | | mg dm ⁻³ | | |
| P0 Si0 | RQo | 16,4 (+10%) | 69,0 (+46%) | 55,2 (+20%) |
| P0 Si240 | | 9,8 (-44%) | 52,8 (+36%) | 44,5 (-5%) |
| P0 Si410 | | 21,2 (+45%) | 53,5 (+26%) | 42,8 (+2%) |
| P80 Si0 | | 16,4 (+34%) | 51,5 (+7%) | 42,8 (-11%) |
| P80 Si240 | | 17,5 (-14%) | 51,8 (+6%) | 43,1 (+44%) |
| P80 Si410 | | 22,4 (+23%) | 41,4 (-22%) | 39,4 (+27%) |
| P240 Si0 | | 9,9 (-38%) | 51,1 (+47%) | 47,7 (+47%) |
| P240 Si240 | | 16,2 (-15%) | 39,3 (+26%) | 39,8 (-7%) |
| P240 Si410 | | 14,7 (+8%) | 33,7 (-29%) | 51,8 (+15%) |
| P410 Si0 | | 30,1 (+23%) | 43,5 (-65%) | 45,4 (-24%) |
| P410 Si240 | | 20,6 (-37%) | 24,6 (-74%) | 45,0 (-27%) |
| P410 Si410 | | 27,2 (-9%) | 24,0 (-65%) | 40,5 (-32%) |
| C.V. (%) | | 16,48 | 8,29 | 9,05 |
| P0 Si0 | LVdf | 9,6 (-79%) | 64,2 (-56%) | 55,6 (-75%) |
| P0 Si330 | | 7,0 (-85%) | 64,9 (-59%) | 45,5 (-79%) |
| P0 Si560 | | 9,0 (-85%) | 58,7 (-61%) | 39,5 (-82%) |
| P110 Si0 | | 10,2 (-78%) | 55,7 (-66%) | 49,5 (-77%) |
| P110 Si330 | | 9,4 (-80%) | 51,6 (-69%) | 53,6 (-75%) |
| P110 Si560 | | 21,9 (-56%) | 70,1 (-67%) | 25,0 (-88%) |
| P330 Si0 | | 19,9 (-42%) | 26,6 (-86%) | 35,7 (-82%) |
| P330 Si330 | | 18,5 (-43%) | 75,9 (-61%) | 50,3 (-74%) |
| P330 Si560 | | 42,2 (+32%) | 80,7 (-52%) | 56,5 (-72%) |
| P560 Si0 | | 17,4 (-71%) | 85,6 (-70%) | 35,3 (-80%) |
| P560 Si330 | | 13,2 (-66%) | 102 (-65%) | 47,9 (-74%) |
| P560 Si560 | | 10,1 (-53%) | 126,7 (-46%) | 43,0 (-77%) |
| C.V. (%) | | 14,60 | 8,02 | 3,44 |

Valores entre parênteses indicam as porcentagens de redução (-) ou aumento (+) das frações de P após o cultivo do arroz. ¹As doses de P e Si estão em mg dm⁻³; ²Po-bicarb (forma extraída pelo bicarbonato de sódio); Po-NaOH 0,1 e 0,5 (formas extraídas por NaOH 0,1 e 0,5 mol L⁻¹).

No LVdf observa-se uma maior contribuição do P não-lábil (PHCl + P-residual), em relação ao RQo. Segundo Fernandes et al. (2002) e Araújo et al. (1993) este resultado é esperado em solos ácidos e ricos em óxidos de Fe e Al. O P residual representa o P ocluso, retido pela hematita, goethita e gibbsita, o que explica os maiores teores dessa forma de P no LVdf. No LVdf observa-se que as três formas de P diminuíram após o cultivo, sugerindo que essas formas contribuíram para a nutrição das plantas de arroz durante o período de cultivo (Tabela 6), conforme indicado pelas correlações significativas e positivas das formas lábil, pouco lábil e não lábil com as variáveis MSPA, MSGR e P-MSPA (Tabela 4). Apesar das análises de correlação simples ter limitações para afirmar relações de causa e efeito, observa-se que na Tabela 4, que praticamente todas as formas de P, com exceção das formas Po-NaOH 0,5 e P-HCl, apresentaram correlação significativa e positiva com as variáveis estudadas.

Tabela 6. Formas de fósforo nos solos RQo e LVdf após o cultivo do arroz.

| Tratamentos ¹ | Solos | Formas de P | | |
|--------------------------|-------|----------------------|----------------------------|--------------------------|
| | | P lábil ² | P pouco lábil ³ | P não lábil ⁴ |
| | | mg dm ⁻³ | | |
| P0 Si0 | RQo | 21,68 (-29%) | 141,38 (+33%) | 19,08 (-68%) |
| P0 Si240 | | 15,36 (-53%) | 113,43 (+18%) | 29,76 (-86%) |
| P0 Si410 | | 27,25 (+57%) | 113,49 (+16%) | 27,61 (-69%) |
| P80 Si0 | | 30,45 (-24%) | 116,65 (+0,5%) | 21,17 (-76%) |
| P80 Si240 | | 32,36 (-40%) | 111,36 (+19%) | 14,07 (-82%) |
| P80 Si410 | | 35,67 (-28%) | 101,24 (-2%) | 18,49 (-77%) |
| P240 Si0 | | 77,7 (-29%) | 139,12 (+34%) | 29,27 (-55%) |
| P240 Si240 | | 81,17 (-24%) | 119,32 (+11%) | 18,30 (-74%) |
| P240 Si410 | | 75,97 (-30%) | 120,09 (-6%) | 26,37 (-64%) |
| P410 Si0 | | 133,06 (-27%) | 138,42 (-46%) | 15,35 (-81%) |
| P410 Si240 | | 134,03 (-32%) | 131,50 (-43%) | 24,88 (-79%) |
| P410 Si410 | | 139,26 (-30%) | 115,20 (-43%) | 21,24 (-72%) |
| C.V. (%) | | 7,5 | 5,5 | 13,8 |
| P0 Si0 | LVdf | 13,9 (-73%) | 246,41 (-51%) | 164,65 (-60%) |
| P0 Si330 | | 11,37 (-78%) | 240,28 (-53%) | 173,42 (-64%) |
| P0 Si560 | | 14,24 (-79%) | 222,28 (-56%) | 146,29 (-66%) |
| P110 Si0 | | 18,79 (-53%) | 284,15 (-41%) | 198,15 (-59%) |
| P110 Si330 | | 22,27 (-66%) | 283,17 (-50%) | 199,85 (-62%) |
| P110 Si560 | | 31,04 (-68%) | 275,86 (-55%) | 179,38 (-60%) |
| P330 Si0 | | 54,47 (-51%) | 373,83 (-45%) | 217,90 (-47%) |
| P330 Si330 | | 61,47 (-50%) | 417,73 (-40%) | 286,71 (-45%) |
| P330 Si560 | | 73,27 (-33%) | 447,53 (-33%) | 230,06 (-53%) |
| P560 Si0 | | 115,70 (-47%) | 489,14 (-39%) | 173,58 (-63%) |
| P560 Si330 | | 118,41 (-38%) | 530,96 (-33%) | 197,57 (-60%) |
| P560 Si560 | | 117,84 (-29%) | 525,16 (-33%) | 179,38 (-61%) |
| C.V. (%) | | 7,1 | 3,1 | 7,2 |

Valores entre parênteses indicam as porcentagens de redução (-) ou aumento (+) das formas de P. ¹As doses de P e Si estão em mg dm⁻³; ²Σ das formas P-resina e Pi e Po-bicarb; ³Σ das formas Pi e Po-NaOH 0,1 e 0,5 mol L⁻¹; ⁴Σ das formas P-HCl e P-residual.

Desdobrando-se as doses de Si para cada dose de P, observa-se que no LVdf as formas de P-lábil, principalmente nas doses P110 e P330 e P pouco lábil, na aplicação de 330 e 560 mg dm⁻³ de P, aumentaram de forma linear com o aumento das doses de Si (Figura 1a e b). Entretanto, com o aumento da doses de silício tem-se que os

coeficientes angulares foram maiores para P pouco lábil (Figura 1b) que para P-lábil (Figura 1a), ou seja, a velocidade das reações de adsorção do silício foi maior na presença de minerais com superfícies altamente adsorvedoras, como no caso de solos tipicamente oxidados, a exemplo do LVdf deste estudo, o qual apresenta mais de 700 g kg^{-1} de argila, com ocorrência expressiva de gibbsita e óxidos de ferro (Tabela 1), em concordância com McKeaque e Cline (1963). Portanto, a magnitude dos efeitos foi diferente para as duas formas de P na disponibilidade Do nutriente para o arroz.

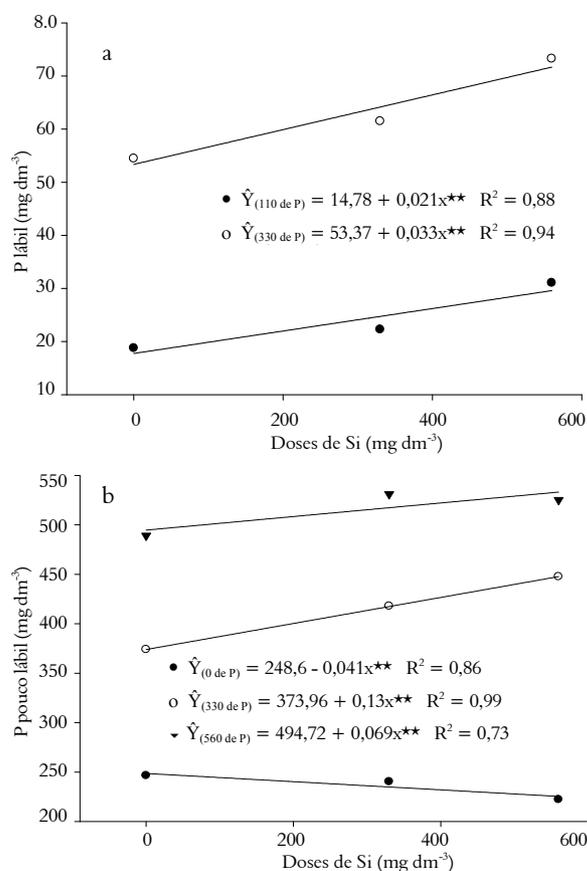


Figura 1. Formas de P após o cultivo de arroz em função das doses de Si aplicadas no Latossolo Vermelho distroférrico.

**significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Já para o solo RQo (Figura 2), o mesmo não foi observado para o P pouco lábil, visto que, houve uma redução desta forma de P quando houve aumento nas doses de Si. Provavelmente, em razão do baixo teor de argila e de matéria orgânica (Tabela 1) a interação do Si com a fase sólida foi menor, explicando, em parte, a menor reatividade do elemento neste solo, conforme observado por Tokura et al. (2007).

Com base nestes resultados, pode-se inferir que a aplicação de Si ocasionou modificações nas formas P

lábil e pouco lábil, principalmente no LVdf (Figura 1), as quais se correlacionaram de forma direta e significativa com as variáveis de produção (Tabela 4).

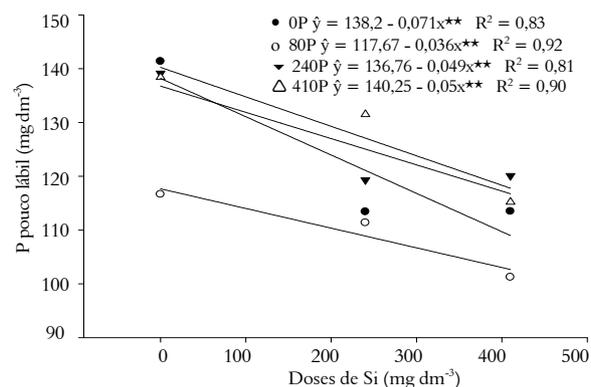


Figura 2. Fósforo pouco lábil em função das doses de Si em Neossolo Quartzarênico órtico.

**significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Em concordância Koski-Vahala et al. (2001), a adsorção de Si nas superfícies adsorvedoras dos minerais, parece promissora em aumentar a disponibilidade de P em solo altamente fixador de fosfato, fato verificado no solo LVdf, visto que os ânions silicato são reconhecidamente competidores com os fosfatos pelos mesmos sítios de adsorção nos minerais da fração argila.

Conclusão

A fertilização fosfatada promoveu aumento das frações P-resina e Pi-bicarb, nos solos estudados, as quais apresentaram correlação significativa e positiva com as variáveis de produção. As formas pouco lábeis de P-inorgânico apresentaram comportamento oposto nos solos em estudo, em consonância com a textura e mineralogia dos mesmos. A fração Pi-HCl, após o cultivo do arroz, foi reduzida em todos os tratamentos, mas somente no solo muito arenoso e caulínico (RQo) houve correlação significativa e positiva com as variáveis de produção da cultura do arroz. Entre as frações orgânicas de P, apenas Po-NaOH 0,1 no solo muito argiloso e oxidado (LVdf), contribuiu para a nutrição das plantas de arroz. A aplicação de Si no LVdf apresentou-se promissora em aumentar a disponibilidade de P.

Referências

- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação de fósforo remanescente. **Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 27-33, 2000.
- ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar, intensidade e formas de

- acumulação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, n. 3, p. 389-396, 1993.
- CLAESSEN, M. E. C. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPq, 1997. (Documentos, 1).
- DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. v. 1. p. 545-556.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 91, n. 1, p. 11-17, 1994.
- FASSBENDER, H. W. **Química de suelos com ênfasis em suelos de América Latina**. 2 ed. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para Agricultura, 1987.
- FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; FURTINI, A. E.; CURTI, N. Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 3, p. 373-383, 2002.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, v. 6, n. 2, p. 36-41, 2008.
- FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Science Agriculture**, v. 58, n. 3, p. 627-646, 2001.
- FREIRE, J. C.; RIBEIRO, M. A. V.; BAHIA, V. G.; LOPES, A. S.; AQUINO, L. H. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 4, n. 1, p. 5-8, 1980.
- HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 4, p. 970-976, 1982.
- KÄMPF, N.; CURTI, N. Óxidos de Ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. n. 1. p. 107-138.
- KOSKI-VAHALA, J.; HARTIKAINEN, H.; TALLBERG, P. Phosphorus mobilization from various sediment pool in response to increase pH and silicate concentration. **Journal of Environmental Quality**, v. 30, n. 2, p. 546-552, 2001.
- LILIENFEIN, J.; WILCKE, W.; AYARZA, M. A.; VILELA, L.; LIMA, S. C.; ZECH, W. Chemical fractionation of phosphorus, sulphur, and molybdenum in Brazilian savannah Oxisols under different land use. **Geoderma**, v. 96, n. 1-2, p. 31-46, 2000.
- LOPES, A. S. **Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984.
- LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D.; SIEGERT, G.; RODRIGUEZ, J. V. Competitive adsorption of phosphate with malate and oxalate by tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 6, p. 1460-1462, 1986.
- MARQUES, J. J.; SCHULZE, D. G.; CURTI, N.; MERTZMAN, S. A. A. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 121, n. 1-2, p. 31-43, 2004.
- MATICHENKOV, R. V.; AMMOSOVA, Y. M. Effect of amorphous silica on soil properties of a sod-podzolic soil. **Eurasian Soil Science**, v. 28, n. 10, p. 87-99, 1996.
- McKEAQUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. II. The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 43, n. 1, p. 83-95, 1963.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soil and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v. 7, n. 5, p. 317-327, 1960.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1199-1204, 2001.
- RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres/Potafós, 1991.
- RAIJ, B. Van; FEITOSA, C. T. Correlação entre o P extraído de solo por diversos extratores químicos extratores químicos e o absorvido pelo milho. **Bragantia**, v. 39, n. 1, p. 51-57, 1980.
- RESENDE, M.; CURTI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B. **Mineralogia dos Solos Brasileiros: interpretação e aplicações**. Lavras: UFLA, 2005.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocadas pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 345-354, 2000.
- SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; CURTI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfato em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 705-714, 2008.
- SAS-Statistical Analysis System. **SAS/STAT users' guide**. Version 6. 4th ed. Cary: Statistical Analysis System Institute, 1989. v. 2.
- SCHWERTMAN, U.; KODAMA, H.; FISHER, W. R. Mutual interactions between organics and iron oxides. In: HUANG, P. M.; SCHNITZER, M. (Ed.). **Interaction of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: SSSA, 1986. p. 223-247. (SSSA Spec. Publ. 17).
- TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; MOIR, J. O. Changes in organic and inorganic phosphorus

composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60–90 years of cultivation. **Journal of Soil Science**, v. 34, n. 4, p. 815-823, 1983.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; ALOVISI, A. A. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 1, p. 9-16, 2007.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C. H.; ALOVISI, A. A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da

profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 10, p. 1467-1476, 2002.

Received on March 23, 2008.

Accepted on March 30, 2009.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.