

SORÇÃO DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DO TEOR INICIAL E DE SISTEMAS DE MANEJO DE SOLOS⁽¹⁾

D. S. RHEINHEIMER⁽²⁾, I. ANGHINONI⁽³⁾ & E. CONTE⁽⁴⁾

RESUMO

A relação entre o P sorvido/P solução do solo pode ser influenciada pelo teor de P previamente sorvido e pelos sistemas de manejo. Este trabalho teve o objetivo de avaliar as modificações na capacidade de sorção máxima (P_{max}) e na constante relacionada com a energia de ligação de P com os colóides (k) da isoterma de Langmuir, provocadas (a) pela inclusão do teor de P previamente sorvido (P_{pre}) e (b) por sistemas de manejo de solos. Coletaram-se, em maio de 1997, amostras de solo (Latossolo Vermelho distroférico típico, Latossolo Vermelho distrófico típico e Argissolo Vermelho distrófico típico), em três camadas (0-2,5, 2,5-7,5 e 7,5-17,5 cm), de três experimentos instalados a partir de 1979, envolvendo os sistemas plantio direto e cultivo convencional com diferentes sucessões de cultura. O solo foi equilibrado com oito concentrações de P em solução de $CaCl_2$ 0,001 mol L⁻¹. Após a agitação por 16 h, avaliou-se a concentração de P no sobrenadante. Os dados de P-sorvido e P-solução foram ajustados à equação de Langmuir, obtendo-se a P_{max} e a k , considerando ou não o P_{pre} . A inclusão do P_{pre} no modelo de Langmuir aumenta, em média, 2,9 vezes o valor da k e não afeta a P_{max} , no LVdf, e aumenta em todas as camadas, no LVd, e na camada superficial, no PVd. A P_{max} é pouco influenciada pelos métodos de preparo do solo, sucessões de culturas e camadas amostradas.

Termos para indexação: adubação fosfatada, isoterma de Langmuir, preparo do solo.

⁽¹⁾ Trabalho realizado com apoio financeiro do PRONEX-FINEP e FAPERGS. Recebido para publicação em junho de 2001 e aprovado em outubro de 2002.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Caixa Postal 221, CEP 97119-900 Santa Maria (RS). E-mail: Danilo@ccr.ufsm.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 776, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq.

⁽⁴⁾ Engenheira-Agrônoma, Mestre em Ciência do Solo, Departamento de Solos, UFRGS.

SUMMARY: *PHOSPHORUS SORPTION IN SOIL IN RELATION TO THE INITIAL CONTENT AND SOIL MANAGEMENT*

The sorbed P/P in solution relation of the soil may be affected by the previously sorbed P (P_{pre}) content and by soil management systems. The objective of this study was to evaluate modifications in the maximum P sorption capacity (P_{max}) and the constant related to the colloid linkage energy (k) of the Langmuir isotherm caused (a) by the inclusion of P_{pre} and (b) by different soil tillage methods and crop sequences. In May 1997, samples of two Oxisols (Very clayey Hapludox and Clayey Hapludox) and an Ultisol (Paleudult) were collected in three soil layers (0-2.5, 2.5-7.5 and 7.5-17.5 cm) of three field experiments, installed from 1979 on, under conventional and no tillage systems with different crop sequences. The samples were equilibrated with eight P levels in $0.001 \text{ mol L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ solution. After 16 h of shaking, the P content in the supernatant was determined. The sorbed and solution P data were adjusted to the Langmuir equation, and P_{max} and k parameters determined by considering P_{pre} or not. On average, the inclusion of P_{pre} in the Langmuir equation increased the k value 2.9 times, but did not affect P_{max} in the very clayey Hapludox, which increased in all soil layers of the clayey Hapludox and in the surface layer of the Paleudult. P_{max} was little affected by the soil tillage methods, crop sequence or soil layers.

Index terms: phosphate fertilization, Langmuir isotherm, soil tillage.

INTRODUÇÃO

A sorção é entendida como a transferência reversível de íons entre a solução e a fase sólida do solo (McBride, 1994). Compreende a adsorção por forças físicas (complexo de esfera externa) e por forças químicas ou específicas (complexo de esfera interna), a precipitação e a polimerização. A maioria dos ânions é adsorvida sobre a superfície dos minerais, podendo o íon fosfato ser adsorvido especificamente por óxidos de ferro, alumínio e manganês, nas arestas das argilas silicatadas e nos aluminossilicatos amorfos, com a participação dos grupos OH^- ou OH_2^+ monocoordenados, os quais facilitam a protonação e as reações de troca de ligantes. Nelas ocorre a liberação de OH^- para a solução do solo, com alto grau de especificidade e tendência à não-reversibilidade, o que aumenta as cargas superficiais negativas e abaixa o ponto de carga zero (McBride, 1994).

Segundo Parfitt (1989), a adsorção de fósforo ocorre na forma binucleada e em três estádios, conforme o tempo de reação: no primeiro, a reação dá-se rápida e fortemente em sítios muito reativos, onde silicatos, OH^- e OH_2^+ , são trocados por fosfato; no segundo, ele é adsorvido em sítios menos reativos e, no terceiro, a longo prazo, migra, via porosidade, para os lóbulos internos dos cristais, podendo, também, ser considerado como precipitação.

A magnitude da adsorção depende da quantidade de constituintes com capacidade de sorver moléculas neutras ou carregadas eletricamente. Nos solos de regiões tropicais e subtropicais, os óxidos de ferro mal cristalizados, a quantidade de alumínio substituindo ferro, e em menores quantidades, os

óxidos bem cristalizados e a caulinita são os principais responsáveis por esse fenômeno (Fontes & Weed, 1996).

A capacidade máxima de sorção de fósforo, P_{max} , correlaciona-se com os teores de $\text{Fe}_0 + \text{Al}_0$ (Freese et al., 1992; Scheinost & Schwertmann, 1995). No entanto, no valor de P_{max} , não está incluída a quantidade de fósforo previamente sorvida pelo solo, P_{pre} , que pode variar de 17 a 66 % do P_{max} (Freese et al., 1992). Adições de fertilizantes fosfatados (maior P_{pre}) proporcionam maior cobertura dos sítios de sorção, saturando-os e diminuindo a variação da energia livre proporcionalmente ao recobrimento da superfície (Fox & Kamprath, 1970; Ryden et al., 1977; Barrow, 1978). Isso aumenta a dessortividade e diminui a relação sorvido/solução (Hartikainen, 1991; Raven & Hossner, 1993; Tolner & Füleky, 1995), o que pode causar erros de interpretação nas isotermas de adsorção.

Dados de Oloya & Logan (1980) e Guertal et al. (1991) mostram que, em solos sob sistema plantio direto, ocorre menor adsorção na camada de 0-2 cm, independentemente da dose total de fosfato aplicada, demonstrando um decréscimo na retenção. A quantidade de fósforo removida pela extração sequencial com resina foi mais rápida e em maior quantidade na camada superficial, em relação às demais camadas. Após a extração sequencial, a capacidade de sorção de fósforo foi maior para todas as profundidades, sobretudo para a camada superficial. Então, a menor sorção do fosfato adicionado deve-se à maior quantidade de fósforo que já estava adsorvido aos colóides (saturação dos sítios). O maior teor de matéria orgânica da camada superficial no sistema plantio direto pode diminuir a capacidade de adsorção máxima de fosfato e a

energia de ligação do fosfato aos grupos funcionais dos colóides inorgânicos do solo. Os ânions de ácidos orgânicos podem complexar Fe e Al e, ou, se adsorver à superfície de óxidos, bloqueando os sítios de adsorção de fósforo (Sibanda & Young, 1986; Mesquita & Torrent, 1993).

Este trabalho teve o objetivo de estimar o efeito do fósforo previamente sorvido na determinação da capacidade de sorção máxima e na energia de sorção de fósforo influenciado por sistemas de manejo do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solo utilizadas neste trabalho foram coletadas de três experimentos de longa duração, instalados sobre três tipos de solos. Foram utilizados experimentos em que se estudaram os efeitos de métodos de preparo do solo e de sistemas de sucessão de culturas na recuperação da qualidade do solo.

O primeiro experimento foi instalado em 1979 num Latossolo Vermelho distroférico típico muito argiloso, substrato basalto (LVdf – Rhodic Hapludox), no Centro de Atividades Agrícolas e Florestais da Cooperativa Triticola de Santo Ângelo (RS). A área tinha sido anteriormente cultivada por 15 anos em cultivo convencional e apresentava avançado estado de degradação física.

Na instalação do experimento, em 1985, e, posteriormente, em 1992 aplicou-se calcário para elevar o pH até 6,0 (método SMP). A adubação usada a partir da instalação do experimento seguiu a recomendação técnica específica a cada cultura.

As amostras de solo foram coletadas nas parcelas do sistema plantio direto (SPD) e nas do cultivo convencional (SCC), com as sucessões de culturas aveia (*Avena strigosa* Scrb)/milho (*Zea mays* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* (L.) Merrill). No SPD, coletaram-se amostras, também, das parcelas com a rotação envolvendo as culturas: trigo, soja, tremoço (*Lupinus angustifolium* L.), milho, sorgo (*Sorghum bicolor* L.) e aveia preta+trevo (*Trifolium repens* L.). As amostras de solo foram coletadas nas parcelas que nunca receberam adubação nitrogenada, na expectativa de que maior quantidade de fósforo acumular-se-ia no solo, uma vez que a exportação pelas colheitas era menor. Maiores detalhes podem ser obtidos em Dalla Rosa et al. (1991).

O segundo experimento foi instalado em 1983 num Latossolo Vermelho distrófico típico argiloso, substrato basalto (LVd - Rhodic Hapludox), no Centro Nacional de Pesquisa do Trigo - EMBRAPA, em Passo Fundo (RS). As amostras foram coletadas nos tratamentos SPD e SCC e nos blocos cultivados com sorgo e soja, de uma seqüência de culturas alternadas no tempo, envolvendo vica (*Vicia sativa* L.), milho,

sorgo, aveia preta, soja e cevada (*Hordeum vulgare* L.). O calcário foi aplicado no experimento e reaplicado em 1989, sendo incorporado ao solo na dose recomendada para elevação do pH até 6,0. A adubação usada seguiu as recomendações técnicas. Maiores detalhes podem ser obtidos em Selles et al. (1997).

O terceiro experimento foi instalado em 1985 num Argissolo Vermelho distrófico franco-argiloso-arenoso (Pvd – Rhodic Paleudult) degradado fisicamente, em Eldorado do Sul (RS), pelo Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Na época, o calcário foi incorporado ao solo e as demais aplicações foram feitas na superfície. O solo foi amostrado nos tratamentos SPD e SCC nas sucessões de culturas aveia/milho e aveia + vica/milho + caupi (*Vigna unguiculata* subs *unguiculata* (L.) Walp). Maiores detalhes podem ser obtidos em Amado et al. (1999).

Em maio de 1997, logo após o preparo, coletaram-se amostras de solo nos três experimentos, em duas repetições de cada tratamento, nas profundidades de 0-2,5; 2,5-7,5 e 7,5-17,5 cm. Cada amostra foi composta pela homogeneização de duas subamostras oriundas de trincheiras de 50 x 10 x 17,5 cm, coletadas perpendicularmente às linhas de semeadura. O solo foi seco ao ar e peneirado em malha de 1 mm.

Para avaliar a sorção de fósforo, 3,00 g de solo foram equilibrados com 30 mL de solução de CaCl_2 0,001 mol L⁻¹, com oito concentrações de fósforo (0, 20, 40, 80, 160, 320, 640 e 1.280 mg L⁻³), para os Latossolos, e as sete primeiras, para o Argissolo. Após a agitação por 16 h no “end – over – end”, centrifugou-se (8.000 rpm por 10 min) e avaliou-se, no sobrenadante, a concentração de fósforo de acordo com o método Murphy & Riley (1962). O fósforo sorvido foi obtido pela diferença entre a quantidade adicionada e a recuperada na solução de equilíbrio. Os dados de P-sorvido e P-solução foram ajustados à equação de Langmuir, $P_{\text{sorvido}} = k \cdot P_{\text{max}} \cdot P_{\text{solução}} / (1 + k \cdot P_{\text{solução}})$, em que k = constante relacionada com a energia de sorção, P_{max} = capacidade de sorção máxima e $P_{\text{solução}}$ = concentração na solução, considerando ou não a quantidade de fósforo previamente sorvida pelo solo (P_{pre}) (Tolner & Füleky, 1995). Considerou-se como P_{pre} a quantidade máxima de fósforo dessorvido com extrações sucessivas com resina em membrana (Rheinheimer et al., 2000), o qual foi somado ao fósforo sorvido. Calculou-se a contribuição percentual do P_{pre} no P_{max} . O teor de carbono orgânico foi determinado por digestão úmida.

Os valores de P_{max} e de k foram submetidos à análise de variância a 5 % de significância, enquanto as médias dos tratamentos de preparo do solo, sucessão de culturas e profundidade de amostragem foram comparadas pelo teste Tukey (p < 0,05). Efetuaram-se correlações a P_{max} e a k com o teor de carbono orgânico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alterações na relação fósforo sorvido/fósforo solução com a inclusão do P_{pre}

No LVdf, sem considerar o P_{pre} , o solo sob SPD manteve maiores teores de P na solução do que no solo sob SCC, enquanto, com a inclusão do P_{pre} , os teores de P solução foram semelhantes entre os métodos de preparo do solo. No LVd, para todos os valores de P sorvido, o solo sob SPD manteve mais altos os teores de P na solução de equilíbrio. Isso poderia ser interpretado como sendo um efeito da competição exercida pela matéria orgânica, uma vez que as maiores diferenças ocorreram na camada superficial, justamente onde os seus teores são mais elevados. No entanto, a inclusão dos valores de P_{pre} na isoterma de Langmuir resultou em teores sorvidos maiores no solo sob SPD do que sob SCC, especialmente para doses baixas de P aplicado. No PVD, a quantidade de P sorvido foi levemente menor no solo sob SPD do que sob SCC até 7,5 cm. Com a inclusão do P_{pre} , esse comportamento inverteu-se somente para a camada superficial, onde se acumulou o P adicionado como fertilizante (Rheinheimer & Anghinoni, 2001). Na camada de 2,5-7,5 cm, com a sucessão aveia/milho, e na camada de 7,5-17,5 cm, com ambas as sucessões de culturas, observou-se maior sorção de P no solo sob SCC do

que sob SPD, pelo menos em doses mais baixas, o que está de acordo com os maiores teores de P_{pre} (Figuras 1, 2 e 3).

A capacidade máxima de sorção de fósforo (P_{max}) do LVdf não foi alterada com a inclusão do P_{pre} no ajuste da isoterma de Langmuir (Quadro 1). Para o LVd, a inclusão do P_{pre} aumentou a P_{max} no SPD de 937 para 1.021 $mg\ dm^{-3}$. Isso se deve aos maiores teores de P_{pre} no solo, uma vez que se adicionaram fertilizantes na superfície sem posterior revolvimento do solo, saturando os sítios de maior sorção. As isotermas de sorção de P no solo sob SPD mostraram-se menos inclinadas do que as sob SCC em baixas doses de P, cuja aplicação de uma mesma dose proporcionou maior aumento no P-solução no solo sob o primeiro sistema.

A disponibilidade de P mostrou-se muito superior no solo sob SPD do que sob SCC, mesmo em camadas mais profundas, pois o solo foi revolvido em 1989 para a incorporação do calcário, o que pode ter aumentado os teores de P nessas camadas. Essa maior disponibilidade, ou maior P_{pre} , alterou o traçado das isotermas. No PVD, a P_{max} , sem considerar o P_{pre} , aumentou em camadas mais profundas. Com a inclusão do P_{pre} , houve um incremento de P_{max} no solo sob SPD, na sucessão A/M e nas duas camadas mais superficiais do solo (Quadro 1), refletindo os maiores teores de P disponível.

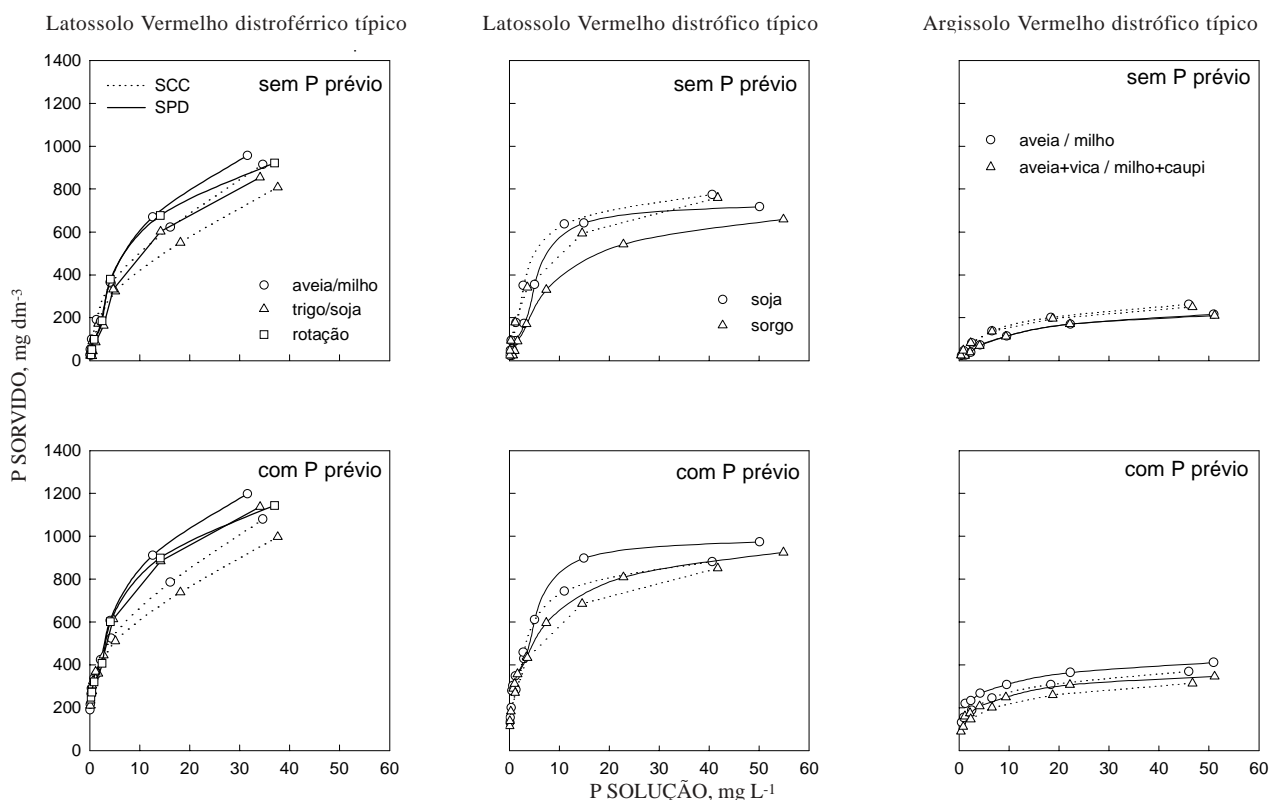


Figura 1. Relação entre o fósforo sorvido e o fósforo da solução da camada de 0-2,5 cm, sem e com a inclusão do fósforo previamente sorvido em diferentes solos, métodos de preparo e sucessões de culturas.

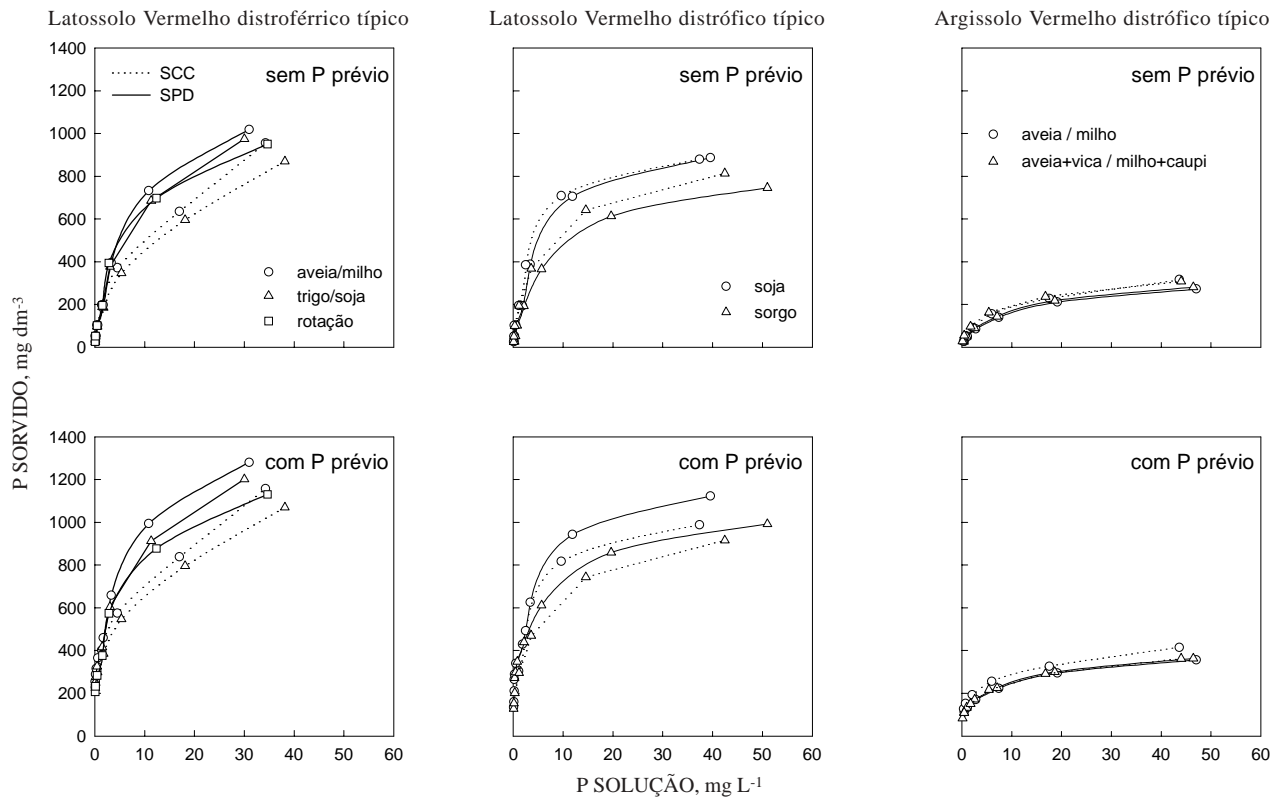


Figura 2. Relação entre o fósforo sorvido e o fósforo da solução da camada de 2,5-7,5 cm, sem e com a inclusão do fósforo previamente sorvido em diferentes solos, métodos de preparo e sucessões de culturas.

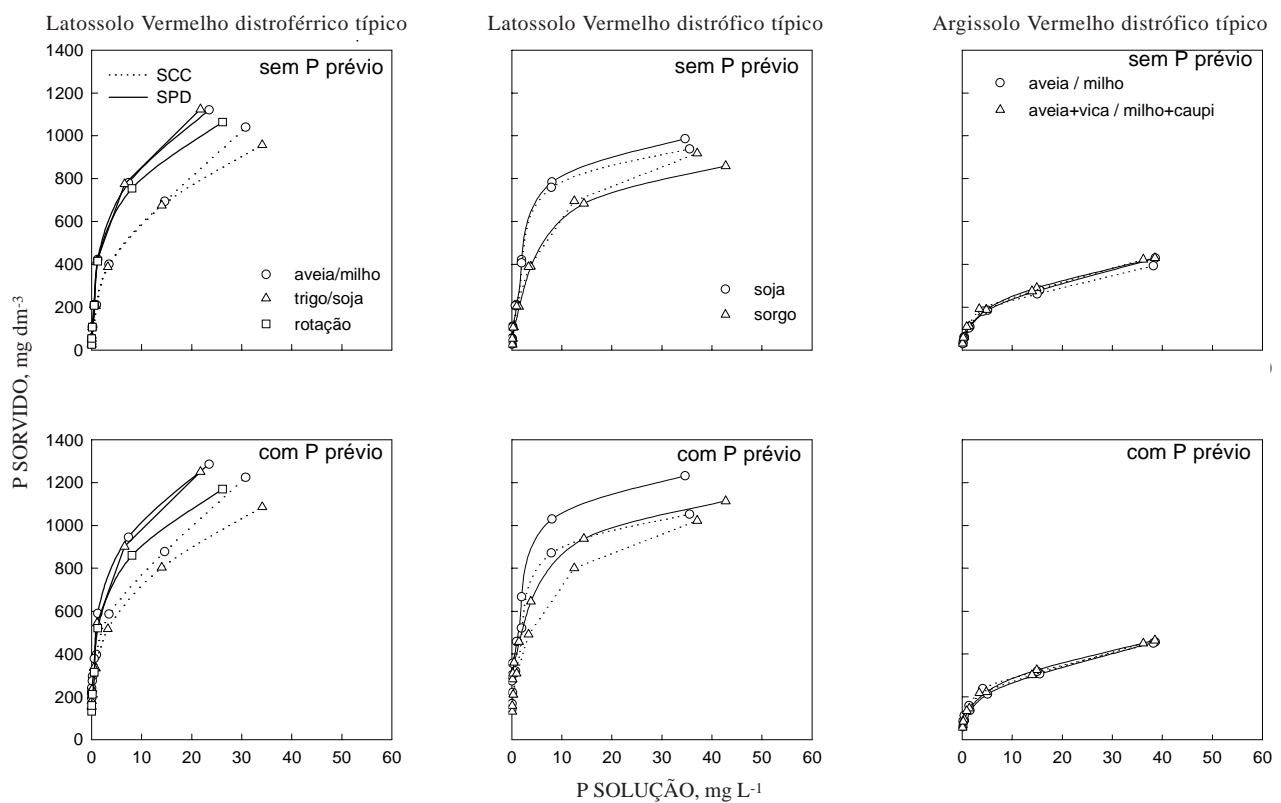


Figura 3. Relação entre o fósforo sorvido e o fósforo da solução da camada de 7,5-17,5 cm, sem e com a inclusão do fósforo previamente sorvido em diferentes solos, métodos de preparo e sucessões de culturas.

Quadro 1. Coeficientes da equação de Langmuir para a sorção de fósforo em diferentes tipos de solo, métodos de preparo, sucessões de culturas e camadas amostradas, sem e com a inclusão do fósforo previamente adsorvido

Solo ⁽¹⁾	Fator	P _{max} ⁽⁴⁾		κ ⁽⁵⁾	
		Sem ⁽⁶⁾	Com	Sem	Com
		mg dm ⁻³		L mg ⁻¹	
LVdf	Preparo do solo ⁽²⁾				
	SPD	1.191 Aa	1.195 Aa	0,214 Ab	0,783 Aa
	SCC	1.094 Ba	1.031 Ba	0,118 Ab	0,454 Ba
	Sucessão ⁽³⁾				
	A/M	1.203 Aa	1.165 Aa	0,160 Ab	0,481 Aa
	T/S	1.119 Ba	1.082 Ba	0,166 Ab	0,487 Aa
	Rotação	1.118 Ba	1.154 Aa	0,234 Ab	0,467 Aa
	Profundidade, cm				
	0-2,5	1.159 Aa	1.098 Aa	0,091 Bb	0,321 Ba
	2,5-7,5	1.158 Aa	1.132 Aa	0,124 Bb	0,425 Ba
7,5-17,5	1.141 Aa	1.159 Aa	0,312 Ab	0,783 Aa	
LVd	Preparo do solo				
	SPD	937 Ab	1.021 Aa	0,167 Bb	0,700 Aa
	SCC	931 Aa	965 Ba	0,248 Ab	0,441 Ba
	Sucessão				
	Sorgo	976 Aa	1.001 Aa	0,246 Ab	0,567 Aa
	Soja	891 Bb	985 Aa	0,169 Bb	0,544 Aa
	Profundidade, cm				
	0-2,5	846 Cb	915 Ca	0,161 Bb	0,405 Ba
2,5-7,5	937 Ba	989 Ba	0,191 Bb	0,527 ABa	
7,5-17,5	1.018 Aa	1.075 Aa	0,271 Ab	0,735 Aa	
PVd	Preparo do solo				
	SPD	354 Ab	390 Aa	0,114 Ab	0,444 Ba
	SCC	346 Aa	365 Ba	0,184 Ab	0,580 Aa
	Sucessão				
	A/M	353 Ab	388 Aa	0,133 Ab	0,552 Aa
	A + V/M + C	346 Aa	367 Aa	0,165 Ab	0,472 Aa
	Profundidade, cm				
	0-2,5	272 Cb	338 Ba	0,120 Ab	0,625 Aa
2,5-7,5	324 Ba	347 Ba	0,154 Ab	0,570 Aa	
7,5-17,5	452 Aa	448 Aa	0,173 Ab	0,341 Ba	

¹⁾ LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico típico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico típico; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico. ²⁾ SPD = sistema plantio direto e SCC = sistema de cultivo convencional. ³⁾ A/M = aveia preta/milho; T/S = trigo/soja; Rotação = inverno (trigo, tremoço, colza e aveia preta + trevo) e verão (milho e soja); Sorgo e Soja = sorgo e soja antecedendo a coleta do solo; A + V/M + C = aveia preta + vica/milho + caupi. ⁴⁾ P_{max} = capacidade de sorção máxima. ⁵⁾ k = energia de sorção. ⁶⁾ Sem e com a inclusão do fósforo previamente adsorvido.

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 5 %.

O valor da constante relacionada com a energia de ligação (k) aumentou com a inclusão do P_{pre} no ajuste da isoterma de Langmuir. O valor médio de todos os tratamentos, no LVdf, passou de 0,166 para 0,618 L mg⁻¹; no LVd, de 0,207 para 0,570 L mg⁻¹, e no PVd, de 0,149 para 0,512 L mg⁻¹, para o ajuste sem ou com a inclusão do P_{pre}, respectivamente (Quadro 1). Os valores de k foram subestimados, uma vez que para a quantidade de P na solução de equilíbrio havia uma porção de P sorvido no solo que não foi computada no ajuste. Isso está de acordo com o modelo proposto por Parfitt et al. (1975), Parfitt (1978) e Ryden et al. (1977; 1987) em que a adsorção ocorre em estádios. No estádio I, predomina a

neutralização das cargas positivas, saturando-as quando todos os grupos OH₂⁺ forem compartilhados pelos íons fosfatos. No estádio II, ocorrem as trocas de ligantes e, no III, ocorrem interações de caráter mais físico com os íons Fe já octacoordenados, caracterizado pela baixa energia da interação. Então, adições subsequentes de fosfatos tendem a diminuir a curvatura das isotermas de sorção (Barrow et al., 1998).

O P_{pre} no solo LVdf per fez 21, 18 e 11 % da P_{max}, no SPD, e 18, 20 e 14 %, para as camadas de 0-2,5; 2,5-7,5 e 7,5-17,5 cm, respectivamente, não tendo diferenças quanto aos métodos de preparo e sucessões de culturas. No LVd, a contribuição do P_{pre} foi de 29 e 12 % da P_{max}, para o SPD e SCC,

respectivamente, sendo levemente inferior nas camadas mais profundas. No solo PVd, o P_{pre} perfez 39, 18 e 5 % da P_{max} , sob SPD, e 27, 21 e 8 % da P_{max} , sob SCC, para as camadas 0-2,5, 2,5-7,5 e 7,5-17,5 cm, respectivamente (Quadro 2). Esses valores estão de acordo com aqueles mencionados na literatura, variando de 17 a 66 % da P_{max} (Freese et al., 1992).

A contribuição percentual do P_{pre} da camada superficial dos solos sob SPD foi inversamente proporcional ao seu teor de argila e óxidos de ferro. Isso está de acordo com o fato de que a magnitude da adsorção depende da quantidade de constituintes com capacidade de sorver moléculas neutras ou carregadas eletricamente. Nos solos de regiões tropicais e subtropicais, os óxidos de ferro mal cristalizados, a quantidade de alumínio substituindo ferro, os óxidos bem cristalizados e a caulinita são os responsáveis por esse fenômeno (Freese et al., 1992; Scheinost & Schwertmann, 1995; Fontes & Weed, 1996).

Deste modo, recomenda-se que o P_{pre} seja obtido diretamente com a dessorção por resina em membrana (Rheinheimer, 2000) e seja incluído no ajuste da isoterma de sorção.

Sistemas de manejo de solos e os valores de P_{max} e k

Nos três solos estudados, a adoção do SPD aumentou a P_{max} em relação ao solo cultivado sob

SCC. Também a P_{max} aumentou nas camadas mais profundas dos três solos, sendo significativa para o LVd e PVd, cuja P_{max} passou de 915 e 338 mg dm⁻³, na camada de 0-2,5 cm, para 1.075 e 448 mg dm⁻³, na camada de 7,5-17,5 cm, respectivamente. As diferentes sucessões de culturas não afetaram a P_{max} e a k (Quadro 1).

Verificou-se que o teor de carbono orgânico foi mais elevado quando se utilizou o SPD até os 2,5 cm no LVdf; até os 7,5 cm, no LVd, e até os 2,5 cm, no PVd, com aveia/milho, e até os 7,5 cm, com aveia + vica/milho + caupi (Quadro 3). Deste modo, não há relação entre o teor de carbono orgânico e a P_{max} . Oloya & Logan (1980) e Guertal et al. (1991) mostraram, que, em solo sob SPD, ocorre menor adsorção de fósforo na camada de 0-2 cm em relação às camadas mais profundas e ao SCC, determinado sem a inclusão do P_{pre} . A quantidade de fósforo removida pela extração seqüencial com resina foi mais rápida e em maior quantidade na camada de 0-2 cm em relação às camadas de 2-6 e 6-8 cm. No entanto, após a extração, a capacidade de sorção de fósforo foi maior no SPD para todas as profundidades, especialmente para a camada superficial. Então, a menor sorção se deve ao maior teor de P_{pre} , saturando os sítios.

Os solos que atualmente são manejados sob o SPD foram cultivados por vários anos sob o SCC. A adição

Quadro 2. Capacidade de sorção máxima (P_{max}) e fósforo previamente sorvido (P_{pre}) em diferentes solos, métodos de preparos e profundidade de amostragem

Solo ⁽¹⁾	Preparo	Profundidade cm	P_{max} ⁽³⁾		P_{pre} ⁽⁴⁾ % do P_{max}
			mg dm ⁻³		
LVdf	SPD ⁽²⁾	0-2,5	1.182	248	21
		2,5-7,5	1.204	223	18
		7,5-17,5	1.200	133	11
	SCC	0-2,5	972	176	18
		2,5-7,5	1.024	202	20
		7,5-17,5	1.099	158	14
LVd	SPD	0-2,5	880	261	30
		2,5-7,5	851	241	28
		7,5-17,5	878	250	28
	SCC	0-2,5	777	99	13
		2,5-7,5	842	105	12
		7,5-17,5	890	109	12
PVd	SPD	0-2,5	427	165	39
		2,5-7,5	454	83	18
		7,5-17,5	703	32	5
	SCC	0-2,5	316	86	27
		2,5-7,5	362	77	21
		7,5-17,5	500	42	8

⁽¹⁾ LVdf = Latossolo Vermelho distroférico típico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico típico; PVd = Argissolo Vermelho distrófico típico. ⁽²⁾ SPD = sistema plantio direto e SCC = sistema de cultivo convencional. ⁽³⁾ P_{max} = capacidade de sorção máxima. ⁽⁴⁾ P_{pre} = fósforo previamente sorvido.

Quadro 3. Teores de carbono orgânico em diferentes tipos de solos, métodos de preparo do solo, sucessões de culturas e camadas amostradas

Profundidade cm	SCC ⁽¹⁾		SPD		
	g dm ⁻³				
Latossolo Vermelho distroférico típico					
	A/M ⁽²⁾	T/S	A/M	T/S	Rotação
0,0- 2,5	20,8	22,2	25,8	27,4	26,6
2,5- 7,5	24,6	25,8	22,6	23,2	23,0
7,5-17,5	23,9	23,5	21,2	20,5	20,9
Latossolo Vermelho distrófico típico					
	Sorgo	Soja	Sorgo	Soja	
0,0- 2,5	18,7	19,7	33,1	32,9	
2,5- 7,5	19,0	21,1	27,3	27,7	
7,5-17,5	21,1	21,2	21,7	22,7	
Argissolo Vermelho distrófico típico					
	A/M	A + V/M + C	A/M	A + V/M + C	
0,0- 2,5	15,6	17,5	24,2	32,1	
2,5- 7,5	16,4	18,6	16,7	20,0	
7,5-17,5	17,1	17,7	16,7	17,6	

⁽¹⁾ SCC = sistema de cultivo convencional e SPD = sistema plantio direto. ⁽²⁾ A/M = aveia preta/milho; T/S = trigo/soja; Rotação = inverno (trigo, tremoço, colza e aveia preta + trevo) e verão (milho e soja); Sorgo e Soja = sorgo e soja antecedendo a coleta do solo; A + V/M + C = aveia preta + vica/milho + caupi.

de fertilizantes fosfatados nesse sistema tinha e tem de atender às exigências nutricionais das culturas e compensar os fenômenos de sorção e erosão. Deste modo, os sítios de maior sorção de fosfato são saturados pela elevação do pH do solo e pelo próprio fosfato. A adsorção do fósforo aumenta as cargas negativas semipermanentes e diminui o potencial elétrico das partículas coloidais, onde o fósforo migra lentamente para o interior dos óxidos (Barrow et al., 1998), o que justifica a menor adsorção do fosfato adicionado posteriormente (Raven & Hossner, 1993), como observado neste trabalho.

A *k* foi maior no SPD do que no SCC nos Latossolos e menor no Argissolo. Também nos Latossolos, os valores da *k* das duas primeiras camadas foram menores do que os da de camada 7,5-17,5 cm, enquanto, no Argissolo, a *k* foi maior na camada de 0-2,5 cm (Quadro 1).

Nos Latossolos, houve correlação negativa entre os valores de *k* e os teores de carbono orgânico do solo para o SPD. Vários autores têm evidenciado que a matéria orgânica diminui a área superficial dos colóides inorgânicos e a adsorção de fósforo (Haynes, 1984; Sibanda & Young, 1986). O incremento no teor de matéria orgânica pode aumentar a disponibilidade deste nutriente por diminuir a “energia de ligação” do fosfato com os colóides inorgânicos sem alterar a P_{\max} (Quadro 1). Isso explicaria o porquê do aumento no potencial de

desorção do fósforo nativo quando da aplicação de resíduos vegetais em solo com baixa disponibilidade de fósforo e alta capacidade de adsorção (Haynes, 1984; Hagggar et al., 1991) e da melhoria na eficiência dos fertilizantes fosfatados (Hue, 1991).

No entanto, no caso do Argissolo, à medida que aumentou o teor de carbono orgânico, também aumentou a “energia de ligação” do fosfato com o solo cultivado sob SPD. Considerando que esses solos apresentam baixos teores de argila e óxidos de ferro, que foram adicionadas grandes quantidades de fosfatos na camada superficial, que foi adicionado calcário na superfície do solo e que as isotermas não permitem separar os fenômenos responsáveis pelo desaparecimento do fósforo da solução, acredita-se que tenha ocorrido a formação de precipitados de fosfatos de cálcio.

CONCLUSÕES

1. O ajuste de isotermas sem considerar a quantidade de fósforo sorvida pelo solo leva a interpretações errôneas. A sua inclusão no modelo de Langmuir aumentou, em média, 2,9 vezes o valor da constante relacionada com a energia de ligação, não alterou a capacidade de sorção máxima de fósforo no Latossolo Vermelho distroférico típico e

umentou na camada superficial do Latossolo Vermelho distrófico típico e do Argissolo Vermelho distrófico típico.

2. O fósforo previamente sorvido pela camada de 0-2,5 cm sob sistema plantio direto representa 21, 30 e 39 % da capacidade de sorção máxima do solo, LVdf, LVd e PVd, respectivamente.

3. A capacidade de sorção máxima de fósforo, determinada com a inclusão do fósforo previamente sorvido pelo solo, é pouco influenciada pelos métodos de preparo do solo, sucessões de culturas e camadas amostradas.

LITERATURA CITADA

- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B. & BAYER, C. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:679-686, 1999.
- BARROW, N.J. The description of phosphate adsorption curves. *J. Soil Sci.*, 29:447-462, 1978.
- BARROW, N.J.; BOLLAND, M.D.A. & ALLEN, D.G. Effect of additions of superphosphate on sorption of phosphate. *Aust. J. Soil Res.*, 36:359-372, 1998.
- DALLA ROSA, A.; MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Produtividade do trigo e da soja em sistemas de culturas e preparos de solo. *Trigo Soja*, 113:14-18, 1991.
- FONTES, M.P.F. & WEED, S.B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. *Geoderma*, 72:37-51, 1996.
- FOX, R.L. & KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:902-906, 1970.
- FREESE, D.; van der ZEE, S.E.A.T.M. & van RIEMSDIJK, W.H. Comparison of different models for phosphate sorption as a function of the iron and aluminium oxides of soils. *J. Soil Sci.*, 43:729-738, 1992.
- GUERTAL, E.A.; ECKERT, D.J.; TRAINA, S.J. & LOGAN, T.J. Differential phosphorus retention in soil profiles under no-till crop production. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:410-413, 1991.
- HAGGAR, J.P.; WARREN, G.P.; BEER, J.W. & KASS, D. Phosphorus availability under alley cropping and mulched and unmulched sole cropping systems in Costa Rica. *Plant Soil*, 137:275-283, 1991.
- HARTIKAINEN, H. Potencial mobility of accumulated phosphorus in soil as estimated by the indices of Q/I plots and by extractant. *Soil Sci.*, 152:204-209, 1991.
- HAYNES, R.J. Lime and phosphate in the soil-plant systems. *Adv. Agron.*, 37:249-315, 1984.
- HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soil with different mineralogies. *Soil Sci.*, 152:463-471, 1991.
- McBRIDE, M.B. *Environmental chemistry of soils*. New York, Oxford University Press, 1994. 406p.
- MESQUITA, M.V. & TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). *Geoderma*, 58:107-123, 1993.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, 27:31-36, 1962.
- OLOYA, T.O. & LOGAN, T.J. Phosphate desorption from soils and sediments with varying levels of extractable phosphate. *J. Environ. Qual.*, 9:526-531, 1980.
- PARFITT, R.L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *J. Soil Sci.*, 40:359-369, 1989.
- PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. *Adv. Agron.*, 30:1-50, 1978.
- PARFITT, R.L.; ATKINSON, R.J. & SMART, R.C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 39:837-841, 1975.
- RAVEN, K.P. & HOSSNER, L.R. Phosphorus desorption quantity-intensity relationships in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:1501-1508, 1993.
- RHEINHEIMER, D.S. Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 210p. (Tese de Doutorado)
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. & KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:345-354, 2000.
- RHEINHEIMER, D.S. & ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 36:151-160, 2001.
- RYDEN, C.J.; McLAUGHLIN, J.R. & SYERS, J.K. Mechanisms of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.*, 28:72-92, 1977.
- RYDEN, C.J.; SYERS, J.K. & TILLMAN, R.W. Inorganic anion sorption and interactions with phosphate sorption by hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.*, 38:211-217, 1987.
- SCHEINOST, A.C. & SCHWERTMANN, U. Predicting phosphate adsorption-desorption in a soilscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:1575-1580, 1995.
- SELLES, F.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P. & FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Till. Res.*, 44:23-34, 1997.
- SIBANDA, H.M. & YOUNG, S.D. Competitive adsorption of humic acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. *J. Soil Sci.*, 37:197-204, 1986.
- TOLNER, L. & FÜLEKY, G.Y. Determination of the originally adsorbed soil phosphorus by modified Freundlich isotherm. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 26:1213-1231, 1995.