

EFICIÊNCIA TÉCNICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS EM LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO⁽¹⁾

Sandra Mara Vieira Fontoura⁽²⁾, Renan Costa Beber Vieira⁽³⁾, Cimélio Bayer⁽⁴⁾,
Paulo Roberto Ernani⁽⁵⁾ & Renato Paulo de Moraes⁽⁶⁾

RESUMO

Pouco se conhece sobre a eficiência relativa de fosfatos solúveis e naturais em sistemas de alta produtividade de culturas em plantio direto no centro-sul do Paraná. Este trabalho objetivou avaliar a eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos em comparação a um fosfato solúvel na produtividade de várias espécies vegetais anuais em dois ciclos de um sistema de rotação de culturas trienal. O experimento foi conduzido sobre um Latossolo Bruno, em Guarapuava, PR, de 2000 a 2006. Dois fosfatos naturais reativos (FNR: Gafsa e Arad) e um fosfato solúvel (superfosfato triplo, SFT) foram aplicados, a lanço, nas doses de 0, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅, no início do primeiro e do segundo ciclo de rotação de culturas trienal (aveia branca/milho/trigo/soja/cevada/soja). À exceção da cevada, a produtividade das culturas não foi alterada pela adição de qualquer dos fosfatos no primeiro ciclo de rotação, provavelmente, devido ao alto teor de P previamente existente no solo (8,7 mg dm⁻³ na camada de 0-10 cm). No segundo ciclo de rotação, quando o solo tinha 4,1 mg dm⁻³ de P, a aplicação de P na semeadura da aveia branca incrementou em 11 % a produtividade das culturas de verão e em 20 % a das culturas de inverno, tendo o menor incremento ocorrido no milho (8 %) e o maior na cevada (44 %). Neste ciclo, o SFT proporcionou maior produtividade do que os FNR nas culturas de inverno (aveia branca, trigo e cevada), numa média de 11 %, não tendo havido diferença de produtividade entre os FNR. O fosfato solúvel em água é mais eficiente do que os fosfatos naturais reativos em solos sob plantio direto, tanto no efeito imediato quanto na fase residual. Apesar disso, não é necessário aplicar fertilizantes fosfatados para obter alta produtividade em solos

⁽¹⁾ Recebido para publicação em janeiro de 2010 e aprovado em setembro de 2010.

⁽²⁾ Pesquisadora da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária – FAPA. Colônia Vitória-Entre Rios, CEP 85139-400 Guarapuava (PR). E-mail: sandrav@agraria.com.br

⁽³⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, CEP 91501-970 Porto Alegre (RS). Bolsista CAPES. E-mail: renancbvieira@yahoo.com.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Solos, UFRGS. Bolsista do CNPq. E-mail: cimelio.bayer@ufrgs.br

⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. CEP 88520-000 Lages (SC). Bolsista do CNPq. E-mail: a2pre@cav.udesc.br

⁽⁶⁾ Técnico Agrícola da FAPA. Colônia Vitória-Entre Rios, CEP 85139-400, Guarapuava (PR). E-mail: renatop@agraria.com.br

com altos teores de P em plantio direto, a não ser para culturas muito exigentes, a exemplo da cevada.

Termos de indexação: fosfato natural, Gafsa, Arad, superfosfato triplo.

SUMMARY: AGRONOMIC PERFORMANCE OF PHOSPHATE FERTILIZERS IN AN OXISOL UNDER NO-TILLAGE

Little is known about the agronomic effectiveness of phosphate rocks in high-yielding crop rotation systems under no-till in the Center-South of the state of Paraná, Brazil. This field study was undertaken to compare the effectiveness of rock phosphates and soluble P fertilizers to increase the yield of several annual crops grown in two consecutive triennial crop-rotation cycles under no-tillage. The experiment was carried out in an Oxisol, in Guarapuava, PR, from 2000 until 2006. Two phosphate rocks (PR - Gafsa and Arad) and a soluble P fertilizer (TSP - triple superphosphate) were broadcast over the soil surface at rates of 0, 40, 80 and 160 kg ha⁻¹ P₂O₅, at the beginning of the first and the second rotation cycle of the triennial crops (oat, maize, wheat, soybean, barley and soybean). With exception of barley, crop yields were not affected in the first rotation cycle by any phosphate fertilizer regardless of type and rate, probably due to the high P contents available in the soil (8.7 mg dm⁻³ in the 0–10 cm layer). In the second rotation cycle, when soil available P was 4.1 mg dm⁻³, P application at oat sowing increased the yield of summer crops by 11 % and of winter crops by 20 %. The yield increment was lowest for maize (8 %) and highest for barley (44 %). In this cycle, TSP resulted in higher yield than PR, though only for winter crops (oat, wheat and barley), in a mean of 11 %, with no difference between Gafsa and Arad. Water soluble fertilizer (TSP) was more efficient than phosphate rocks in soils under no-till system both in the short and long term. Nevertheless, it is not necessary to apply phosphates for high yields in soils with high available P contents under no-till, except for species with high P requirement, e.g., barley.

Index terms: rock phosphates, Gafsa, Arad, triple superphosphate.

INTRODUÇÃO

A maioria dos solos brasileiros é altamente intemperizada e, de modo geral, deficiente em P, apresentando alta capacidade de retenção desse nutriente em formas pouco disponíveis às plantas (Novais et al., 2007). Estima-se que aproximadamente 75 % do P aplicado seja sorvido nas partículas de solo (Raij, 2004), resultando numa eficiência agrônômica inferior a 20 % (Araújo et al., 2003; Ramos et al., 2009). Em razão disso, há necessidade de aplicações frequentes de fertilizantes fosfatados para proporcionar e manter alta produtividade.

Na agricultura brasileira, predomina o uso dos fertilizantes fosfatados totalmente acidulados, obtidos a partir do tratamento ácido de rochas fosfáticas, a exemplo do superfosfato triplo (SFT). Entretanto, o alto custo dessas fontes de P tem despertado o interesse pelos fosfatos naturais (FN), que custam bem menos por unidade de P do que os solúveis (Resende et al., 2006). Os FN resultam simplesmente da moagem da rocha fosfática, podendo ou não passar por processos físicos de concentração. A solubilidade desses fertilizantes é variável em função da origem e do grau de substituições iônicas isomórficas. Alguns fosfatos

naturais importados de origem sedimentar são mais solúveis do que os fosfatos naturais brasileiros, por possuírem menor cristalinização e maior reatividade no solo, sendo, por isso, denominados fosfatos naturais reativos (FNR) (Kaminski & Peruzzo, 1997). Dentre eles, destacam-se o fosfato de Arad, oriundo de Israel, e o fosfato de Gafsa, oriundo da Tunísia.

Devido à alta solubilidade, os fosfatos acidulados liberam íons fosfato ao solo de forma mais rápida e intensa e apresentam maior efeito imediato na produtividade das culturas em comparação aos FN (Scholefield et al., 1999; Ramos et al., 2009). Entretanto, algumas vezes, ao longo de diversos anos o efeito dos FN pode ser similar (Resende et al., 2006) ou até mesmo superior (Braga et al., 1991; Scholefield et al., 1999) ao dos fosfatos solúveis, devido ao seu maior efeito residual. A maioria dos estudos em que se compara a eficiência de fosfatos solúveis e naturais é realizada em sistemas de manejo com intenso revolvimento do solo, feito por meio de arações e gradagens (Goedert & Lobato, 1984; Resende et al., 2006). Contudo, pouco se conhece sobre o comportamento dessas fontes de P em solos sob sistema plantio direto. Neste sistema de manejo, a ausência de revolvimento do solo pode resultar num

maior efeito residual de fosfatos solúveis e numa menor solubilização e efeito imediato dos FN. Todavia, a concentração de ácidos orgânicos na camada superficial de solos em plantio direto resultantes do acúmulo de matéria orgânica e de resíduos culturais (Pavinato & Rosolem, 2008) pode intensificar a solubilização de P dos FN e, assim, contrapor o possível efeito negativo do não revolvimento na eficiência desses fosfatos. Em adição, há poucas informações sobre a dinâmica dos fosfatos naturais em Latossolos. Neles, a fração mineral apresenta alta capacidade de reter P em formas pouco disponíveis (Rheinheimer et al., 2008), onde a interação solo-fertilizante pode ter efeitos opostos para fontes solúveis e pouco solúveis.

Além disso, estudos comparativos entre fosfatos solúveis e FN normalmente têm sido realizados em solos com teores baixos ou médios de P. Nessas condições normalmente há resposta à adição de fertilizantes fosfatados e a eficiência das fontes ao longo dos anos tem sido equivalente (Braga et al., 1991; Choudhary et al., 1994). Em solos com teores de P acima dos níveis críticos, apesar da possibilidade de pequena resposta, os produtores estão aplicando grande quantidade de fosfatos e, nessa situação, pouco se sabe da eficiência dos FN em comparação aos fosfatos solúveis em solos sob plantio direto, principalmente em regiões com alto potencial produtivo. O presente estudo objetivou avaliar a eficiência agrônômica da aplicação de um fosfato solúvel (SFT) e dois fosfatos naturais reativos (Arad e Gafsa) na produtividade de dois ciclos trienais de um sistema de rotação de culturas em Latossolo Bruno sob plantio direto na região centro-sul do Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em área da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, no município de Guarapuava, PR (25° 50' S e 51° 30' O), em um Latossolo Bruno aluminico (Embrapa, 2006a). O clima da região é subtropical úmido, do tipo Cfb, segundo classificação de Köppen, sem estação seca, e com geadas severas frequentes durante o outono-inverno. A precipitação pluviométrica média anual é de 1.938 mm, com frequência de chuva semanal na primavera-verão. A média de temperatura dos meses mais quentes é de 22 °C, e a dos meses mais frios, de 18 °C.

Anteriormente à instalação do experimento, a área, originalmente de alta fertilidade (20,0 e 5,7 mg dm⁻³ P-Mehlich nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, respectivamente), foi cultivada por oito anos sem a aplicação de fertilizantes fosfatados sob sistema plantio direto. Quando da implantação do experimento, em junho de 2000, o solo apresentava, nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, respectivamente, pH-H₂O = 5,2 e 5,1, C de compostos orgânicos = 31 e 28 g dm⁻³, Ca²⁺ = 7,6 e 6,1 cmol_c dm⁻³, Mg²⁺ = 2,5 e 2,6 cmol_c dm⁻³, P (Mehlich-1) = 8,7 e 5,1 mg dm⁻³, P (resina) = 47 e

31 mg dm⁻³, K = 98 e 70 mg dm⁻³ e 63 e 57 % de saturação da CTC por bases.

Os tratamentos consistiram de um fatorial envolvendo três fertilizantes fosfatados e quatro doses de P₂O₅ (0, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹). Foram utilizados um fosfato solúvel em água (superfosfato triplo, SFT) e dois fosfatos naturais reativos (FNR): Arad (FNR-Arad) e Gafsa (FNR-Gafsa). Os tratamentos foram arrançados, em parcelas de 3,2 x 5 m, no delineamento experimental de blocos ao acaso com seis repetições. Foram realizados dois ciclos do seguinte sistema de rotação de culturas trienal: aveia branca (*Avena sativa*) / milho (*Zea mays*) / trigo (*Triticum aestivum*) / soja (*Glycine max*) / cevada (*Hordeum vulgare*) / soja. As doses dos fosfatos foram aplicadas somente no início de cada ciclo de rotação de culturas. A adubação com N e K foi feita conforme a recomendação para as culturas utilizadas na rotação (CFCRS/SC, 1995).

A produtividade das culturas, num total de seis safras de inverno e seis de verão, foi determinada a partir da coleta de uma área útil de 10 m² em cada unidade experimental. Após pesagem e determinação da umidade dos grãos, os resultados foram expressos considerando 13 % de umidade. A produtividade das culturas em resposta à adição dos fosfatos naturais foi também expressa em equivalente de superfosfato triplo (EqSFT, %), obtido pelo quociente entre a produtividade de grãos em cada tratamento de fosfato reativo e a produtividade de grãos no tratamento com SFT, multiplicado por 100.

Ao término de cada um dos ciclos de rotação de culturas (em março de 2003 e em março de 2006), foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, as quais foram secas em estufa, a 50°C, moídas e passadas em peneiras com malha de 2 mm. Foram determinados os teores de P disponível pelo extrator de Mehlich-1 (Tedesco et al., 1995) e pela resina trocadora de ânions (Raj et al., 2001).

O efeito dos fertilizantes fosfatados na produtividade das culturas foi avaliado por contrastes ortogonais (fosfatos *vs* testemunha, SFT *vs* FNR e FNR-Gafsa *vs* FNR-Arad); e o efeito das doses de P na produtividade das culturas, pela significância dos coeficientes de determinação (R²) de regressões. Os teores de P no solo foram avaliados pela significância do teste de F na análise da variância, seguido do complemento com regressão para os incrementos significativos (p < 0,05).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro ciclo de rotação de culturas, a resposta das espécies à adição dos fertilizantes fosfatados ao solo foi quase inexistente (Quadro 1). Dos seis cultivos envolvendo cinco espécies, de 2000 a 2003, a adição de P ao solo por ocasião da semeadura da primeira cultura, em doses de até 160 kg ha⁻¹ P₂O₅, somente

Quadro 1. Produtividade de grãos das culturas (1-12ª safra), produtividade acumulada das culturas de inverno, de verão e geral do primeiro ciclo (1-6ª safra) e do segundo ciclo de rotação de culturas (6-12ª safra) e resumo da significância dos contrastes ortogonais do efeito das fontes de fósforo na produtividade das culturas (fertilizante fosfatado *vs* testemunha, superfosfato triplo (SFT) *vs* fosfatos naturais reativos (FNR) e FNR-Gafsa *vs* FNR-Arad), na média de três doses de fósforo (40, 80 e 160 kg ha⁻¹ P₂O₅)

Cultura/safra	Testemunha	SFT	FNR-Gafsa	FNR-Arad	Contraste ortogonal		
					Fert. fosfatado <i>vs</i> testemunha	SFT <i>vs</i> FNR	FNR-Gafsa <i>vs</i> FNR-Arad
1-6ª safra							
	kg ha ⁻¹						
Aveia 2000	2559	2547	2546	2472	ns	ns	ns
Milho 2000/01	8526	8439	8532	8466	ns	ns	ns
Trigo 2001	2526	2667	2581	2502	ns	ns	ns
Soja 2001/02	2919	2974	2881	2980	ns	ns	ns
Cevada 2002	2324	2538	2454	2545	*	ns	ns
Soja 2002/03	3204	3416	3240	3285	ns	**	ns
	Produtividade acumulada (1º ciclo)						
- Inverno	7408	7752	7581	7519	ns	ns	ns
- Verão	14649	14829	14653	14731	ns	ns	ns
- Geral	22057	22581	22234	22250	ns	ns	ns
7-12ª safra							
Aveia 2003	3460	4466	3942	3862	*	*	ns
Milho 2003/04	8575	9447	9145	9247	*	ns	ns
Trigo 2004	3119	3699	3395	3437	*	**	ns
Soja 2004/05	1636	1919	1836	1724	**	ns	ns
Cevada 2005	1248	1916	1744	1727	*	**	ns
Soja 2005/06	2076	2491	2534	2433	*	ns	ns
	Produtividade acumulada (2º ciclo)						
- Inverno	7827	10082	9081	9026	**	**	ns
- Verão	12287	13857	13515	13404	*	ns	ns
- Geral	20114	23938	22596	22430	*	**	ns

* e **: indicam que os contrastes ortogonais foram significativos pelo teste F a 5 e 1 %, respectivamente.

incrementou a produtividade da cevada – a quinta cultivada na sequência trienal. Dessa forma, a produtividade média de cevada nos tratamentos que receberam os fertilizantes fosfatados foi apenas 7 % superior à do tratamento em que não foi adicionado P (Quadro 1). As produtividades de todas as culturas foram altas, tendo sido maiores do que 8,4 t ha⁻¹ para milho e do que 2,8 t ha⁻¹ para a soja, e próximo de 2,5 t ha⁻¹ para trigo, aveia e cevada.

Pequena diferença de efeitos entre os fertilizantes fosfatados foi observada na produtividade das espécies no primeiro ciclo de rotação de culturas (Quadro 1). Na média das doses, o fosfato solúvel (SFT) foi superior aos fosfatos naturais somente para a soja, quando cultivada pela segunda vez dentro do ciclo de rotação, tendo apresentado uma diferença de apenas 5 %. A semelhança entre a produtividade das culturas com o SFT e os FNR é também verificada por meio do EqSFT (%), que, na média das doses, variou de 96 a 101 (Quadro 2). Não houve diferença entre os fosfatos naturais de Gafsa e Arad para nenhuma das seis culturas. A ausência de resposta da maioria das espécies às doses dos fertilizantes fosfatados, aplicados ao solo no início do primeiro ciclo de rotação, em doses de até 160 kg ha⁻¹ P₂O₅, provavelmente ocorreu em

razão do alto teor de P no solo no início do experimento (CQFS-RS/SC, 2004; Embrapa, 2006b), que foi de 8,7 mg dm⁻³ (Mehlich-1) na camada superficial de 0–10 cm. A ausência de aplicação de P nos cinco cultivos sucessivos do primeiro ciclo de rotação causou redução no teor de P disponível no solo para 4,1 mg dm⁻³ (Figura 1).

No segundo ciclo de rotação, realizado de 2003 a 2006, a aplicação dos fertilizantes fosfatados ao solo aumentou a produtividade de todas as culturas (Quadro 1). Na média das doses (40 a 160 kg ha⁻¹) e dos fosfatos (SFT, FNR-Arad e FNR-Gafsa), a adição de P ao solo, por ocasião da semeadura da primeira cultura (aveia), incrementou a produtividade acumulada das culturas de verão em 11 % e de inverno em 20 %. O menor incremento na produtividade pela aplicação de P ocorreu para o milho, de apenas 8 %, enquanto o maior ocorreu para a cevada, de 44 %. Além disso, a cevada foi a única espécie que respondeu à aplicação de P nos dois ciclos de cultivo. A maior resposta a P no segundo ciclo de rotação de culturas deve-se aos menores valores de P no solo no tratamento sem aplicação de fosfatos no início deste ciclo, os quais foram de 4,1 mg dm⁻³ (0–10 cm, Mehlich-1) e 3,3 mg dm⁻³ (10–20 cm). Além do baixo teor de P no

tratamento testemunha, a maior resposta à aplicação de fosfato no segundo ciclo de rotação também foi favorecida pelos maiores teores de P nos tratamentos que já haviam recebido aplicação de fosfato no início do primeiro ciclo de rotação, os quais foram na camada de 0–10 cm de 4,9 mg dm⁻³ P na dose de 40 kg ha⁻¹ P₂O₅ (média dos fosfatos), 6,0 mg dm⁻³ P na dose de 80 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 8,6 mg dm⁻³ P na dose de 160 kg ha⁻¹ P₂O₅ (Figura 1).

No segundo ciclo de rotação, a eficiência dos fertilizantes variou com a solubilidade deles para a maioria

das espécies vegetais (Quadro 1). O superfosfato triplo, que é um fertilizante solúvel em água, proporcionou 11 % a mais na produtividade média das culturas de inverno (aveia, trigo e cevada) do que os fertilizantes naturais reativos (Gafsa e Arad). Nas culturas de verão (milho e duas de soja), entretanto, não houve diferença na produtividade entre os fosfatos. Em todos os seis cultivos desse ciclo, a eficiência do fosfato de Gafsa não diferiu da do fosfato de Arad. A diferença entre as culturas possivelmente ocorreu em razão da maior exigência dos cereais de inverno a P, os quais

Quadro 2. Equivalente superfosfato triplo (EqSFT, %) dos fosfatos naturais reativos de Arad e Gafsa (média) em cada uma das culturas no segundo ciclo de rotação, em três doses de fósforo

P ₂ O ₅	Cultura						
	Aveia	Milho	Trigo	Soja	Cevada	Soja	Acumulado
kg ha ⁻¹	1º ciclo de rotação de culturas (2000-2003)						
40	100	98	94	96	100	91	97
80	97	101	102	102	101	98	100
160	98	103	90	98	95	98	98
Média	99	101	96	99	99	96	99
	2º ciclo de rotação de culturas (2003-2006)						
40	88	96	92	94	94	103	94
80	87	99	92	98	87	94	94
160	87	98	93	87	91	102	94
Média	87	97	92	93	91	100	94

EqSFT (%): [(produtividade da cultura no tratamento/produtividade da cultura com SFT) x 100].

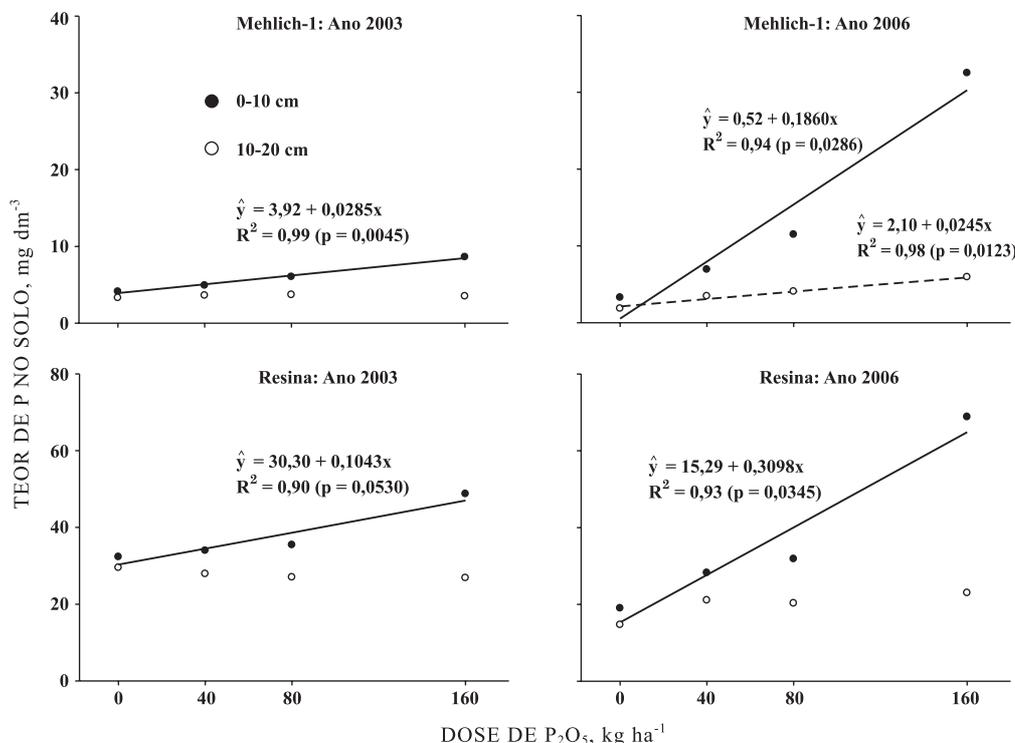


Figura 1. Teores de fósforo (Mehlich-1 e resina trocadora de ânions) nas camadas de 0–10 e 10–20 cm de um Latossolo Bruno após o primeiro (final do 3º ano, 2003) e segundo ciclos (final do 6º ano, 2006) de rotação de culturas na média das fontes (superfosfato triplo-SFT e FNR-Gafsa e Arad) e das doses aplicadas (0, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹ P₂O₅).

apresentam nível crítico (0–20 cm) de $9 \text{ mg dm}^{-3} \text{ P}$ (Reunião..., 2008), enquanto a soja apresenta nível crítico de 6 mg P dm^{-3} de solo (Embrapa, 2006b).

As produtividades totais acumuladas envolvendo as culturas de inverno e de verão foram muito semelhantes entre os dois ciclos de culturas, porém, para as culturas de verão, o acumulado foi 9 % maior no primeiro ciclo e, para as de inverno, 19 % maior no segundo ciclo (Quadro 1).

A superioridade do SFT em relação aos FNR pode ser ainda visualizada nos valores de EqSFT na cultura da aveia (segundo ciclo), que foi de 87 % para a média dos FNR (Quadro 2). Esse efeito imediato superior do SFT em relação aos FNR pode ter sido favorecido pelo sistema plantio direto, onde os fertilizantes entram em contato com pequeno volume de solo, o que dificulta a dissolução dos FNR e inibe parcialmente a insolubilização do P oriundo de fontes solúveis. Alguns autores têm observado que, quando os FNR são incorporados ao solo, a eficiência agrônômica deles é similar à das fontes solúveis (Goedert & Lobato, 1984; Resende et al., 2006).

A superioridade inicial do fosfato solúvel (SFT) em relação aos FNR é reportada por Oliveira Junior et al. (2008) e Scholefield et al. (1999). Entretanto, com o passar do tempo, seria esperado menor efeito residual desta fonte em comparação aos FNR, os quais apresentam solubilização lenta e gradual (Scholefield et al., 1999; Moreira et al., 2002; Resende et al., 2006). Esse comportamento não se confirmou, pois o SFT apresentou maior efeito residual nos cultivos de trigo e cevada e não diferiu dos FNR no cultivo de milho e nas duas safras de soja. Os valores de EqSFT dos FNR foram de 92 % na cultura do trigo e 91 % na da cevada, respectivamente, indicando menor eficiência média dos FNR em relação ao SFT (Quadro 2). Esse maior efeito residual do SFT contribuiu para que a produtividade acumulada do segundo ciclo de rotação tenha sido 6 % superior com SFT, em comparação à média dos FNR (Quadro 1).

A maior resposta em produtividade do SFT em comparação aos FNR no terceiro e quinto cultivos (trigo e cevada) após a aplicação dessas fontes pode ser parcialmente explicada pelo efeito da ausência de

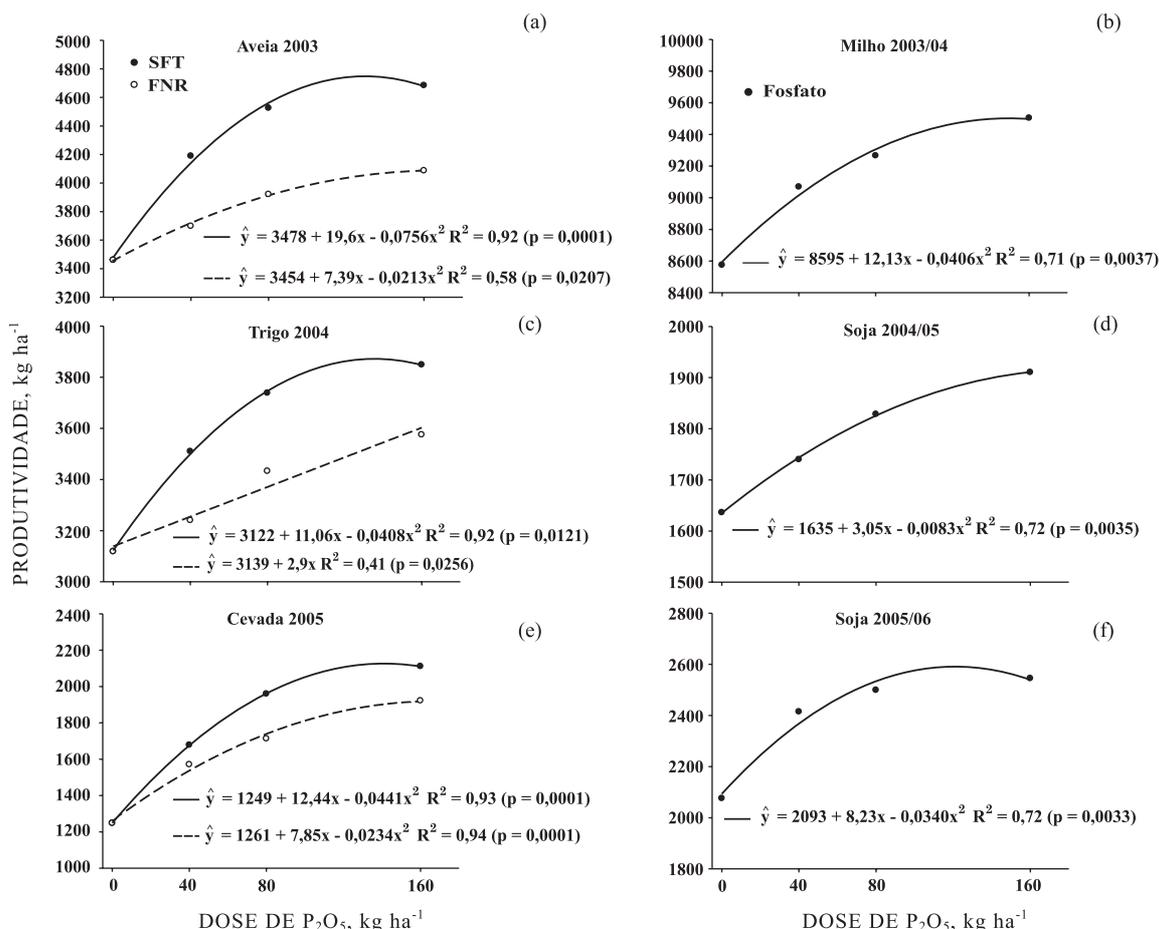


Figura 2. Produtividade de grãos das culturas no segundo ciclo de rotação (2003 – 2006), com a aplicação de doses de fósforo na forma de superfosfato triplo (SFT) e fosfatos naturais reativos (FNR) Gafsa e Arad, sendo considerada a média das fontes nas culturas que não diferiram estatisticamente ($p < 0,05$). O uso dos termos “fosfatos” e “FNR” indica que os valores correspondem, respectivamente, à média de todos os fosfatos e à média dos fosfatos naturais.

revolvimento do solo no sistema plantio direto, pois isso favorece o efeito residual do fosfato solúvel (Souza et al., 2004). Por sua vez, a ausência de incorporação dos fosfatos naturais ao solo pode ter prejudicado a solubilização destes, devido ao pequeno contato de suas partículas com o solo (Corrêa et al., 2005). Ademais, esse solo tinha alto teor de Ca trocável (7,6 cmol_c dm⁻³) e pH 5,2 na camada de 0–10 cm, que também podem ter contribuído para a redução da taxa de dissolução dos fosfatos naturais (Hilman et al., 2007).

As duas fontes de fosfato natural reativo (Arad e Gafsa) proporcionaram produtividades semelhantes, tanto no efeito imediato como no residual (Quadro 1). As produtividades iguais dos FNR decorrem de suas características semelhantes em grau de cristalinização e reatividade no solo (Kaminski & Peruzzo, 1997).

A adição de doses crescentes dos fosfatos aumentou o teor de P no solo (Figura 1), resultando em aumento decrescente na produtividade das culturas (Figura 2). Para os FNR-Arad e Gafsa, a dose de 160 kg ha⁻¹ P₂O₅ geralmente proporcionou as maiores produtividades. Por outro lado, as curvas de resposta obtidas com as doses de SFT mostram que para os cereais de inverno, sabidamente exigentes em P, a dose de máxima eficiência técnica (MET) ocorreu entre 80 e 160 kg ha⁻¹ P₂O₅. Para a aveia cultivada em 2003 (efeito imediato), a MET foi de 129 kg ha⁻¹ P₂O₅ (Figura 2a); para o trigo cultivado em 2004, de 135 kg ha⁻¹ P₂O₅ (Figura 2c); e para a cevada cultivada em 2005, de 141 kg ha⁻¹ P₂O₅ (Figura 2e). Esse incremento na dose de MET ao longo dos anos indica que não há necessidade de uma dose inicial alta visando apenas à produtividade imediata da cultura. No entanto, quando se busca efeito residual do fertilizante, faz-se necessária a adição de doses maiores, a fim de manter o teor de P no solo acima do nível crítico.

CONCLUSÕES

1. O fosfato solúvel em água é mais eficiente do que os fosfatos naturais reativos em solos sob plantio direto, tanto no efeito imediato quanto na fase residual.

2. No sistema plantio direto, não há necessidade de aplicação de fertilizantes fosfatados para obtenção de alta produtividade em solos que tenham teores altos de P, a não ser para culturas muito exigentes nesse nutriente, a exemplo da cevada, a única cuja produtividade aumentou pela adição de P.

LITERATURA CITADA

ARAÚJO, I.B.; RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C. & SANTOS, J.Z.L. Eficiência nutricional do milho em resposta a fontes e modos de aplicação de fósforo. *R. Ceres*, 50:27-39, 2003.

BRAGA, N.R.; MASCARENHAS, H.A.A.; BULISANI, E.A.; RAIJ, B.van; FEITOSA, C.T. & HIROCE, R. Eficiência agrônômica de nove fosfatos em quatro cultivos consecutivos de soja. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:315-319, 1991.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - CFCRS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 1995. 224p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFSRS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

CHOUDHARY, M.; PECK, T.R.; PAUL, L.E. & BARLEY, L.D. Long-term comparison of rock phosphate with superphosphate on crop yield in two cereal-legume rotations. *Can. J. Plant Sci.*, 74:303-310, 1994.

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; SOUZA, S.K.S.; FREIRE, F.J. & SILVA, G.B. Gafsa rock phosphate and triple superphosphate for dry matter production and P uptake by corn. *Sci. Agric.*, 62:159-164, 2005.

EMPRESA BRASIELIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006a. 306p.

EMPRESA BRASIELIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja - Paraná 2007. Londrina, Embrapa Soja, 2006b. 217p.

GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Avaliação agrônômica de fosfatos em solo de cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 8:97-102, 1984.

HILMAN, Y.; RAHIM, A.A.; MUSA, M.H. & HASHIM, A. Principal component analysis of factors determining phosphate rock dissolution on acid soils. *Indonesian J. Agric. Sci.*, 8:10–16, 2007.

KAMINSKI, J. & PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Santa Maria, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31p. (Boletim Técnico, 3)

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. & MORAES, L.A.C. Eficiência de fontes e doses de fósforo na alfafa e centrosema cultivadas em Latossolo Amarelo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:1459-1466, 2002.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. & NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-550.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; PROCHNOW, L.I. & KLEPKER, D. Eficiência agrônômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:623-631, 2008.

PAVINATO, P.S. & ROSELEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo: Decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:911-920, 2008.

- RAIJ, B.van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.106-114.
- RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CARANTELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.
- RAMOS, S.J.; FAQUIN, V.; RODRIGUES, C.R.; SILVA, C.A. & BOLDRIN, P.F. Biomass production and phosphorus use of forage grasses fertilized with two phosphorus sources. R. Bras. Ci. Solo, 33:335-343, 2009.
- RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KIMPARA, D.I.; SANTOS, J.Z.L. & CARNEIRO, L.F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. R. Bras. Ci. Solo, 30:453-466, 2006.
- REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 1., Informações técnicas para a safra 2008: trigo e triticale. Londrina, Embrapa Soja, 2008. 147p.
- RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C. & KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. Ci. Rural, 38:576-586, 2008.
- SCHOLEFIELD, D.; SHOELDRICK, R.D.; MARTYN, T.M. & LAVENDER, R.H. A comparison of triple superphosphate and Gafsa ground rock phosphate fertilizers as P-sources for grass – clover swards on a poorly-drained acid clay soil. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 53:147-155, 1999.
- SOUZA, D.M.G. & LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.157-200.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)