

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FOSFATOS NATURAIS E SUA INFLUÊNCIA NO FÓSFORO DISPONÍVEL EM DOIS SOLOS DE CERRADO¹

Huberto José Kliemann² e David Vieira Lima³

ABSTRACT

AGRONOMIC EFFICIENCY OF NATURAL PHOSPHATES AND THEIR INFLUENCE ON SOIL AVAILABLE PHOSPHORUS ON TWO CERRADO SOILS

To evaluate the agronomic efficiency of natural phosphates soybean was grown in two oxisols under cerrado vegetation, using apatites (Araxá, Patos de Minas, Tapira, Abaeté, and Catalão), phosphoric bauxites (Pirocaua and Phospal), Gafsa hyperphosphate, and IPT thermophosphate, using triple superphosphate as a control. The agronomic efficiency indexes found were: a) apatites - Araxá and Abaeté, 27%; Patos de Minas, 13%; Tapira, 5%, and Catalão, 2%; b) phosphoric bauxites - Pirocaua, 41% and Phospal, 50%; c) thermophosphate IPT, 97% and hyperphosphate of Gafsa, 102%. The acid extractor Mehlich-1 overestimates available P when insoluble apatites are applied to soils. Bray-1 and Bray-2 extractors preferably solubilize the aluminum phosphates from phosphoric bauxites. Critical levels of soil available phosphorus are suitably estimated by Bray-1 extractant when apatitic phosphates and by Mehlich-1 extractant phosphoric bauxites are applied.

KEY WORDS: Oxisols, soybeans, phosphates sources, chemical extractors, soybean.

RESUMO

Conduziram-se experimentos de avaliação de fosfatos naturais em latossolo vermelho-escuro distrófico (textura média) e latossolo roxo distrófico (textura argilosa), fase cerrado, no Estado de Goiás. Usaram-se a soja como planta-teste, curvas de resposta com superfosfato triplo (SFT) como padrão e como fontes de fósforo as apatitas de Araxá, Patos de Minas, Tapira, Abaeté e Catalão, as bauxitas fosfóricas de Pirocaua (Maranhão) e Phospal (Senegal), o hiperfosfato de Gafsa e o termofosfato IPT. Obtiveram-se os seguintes índices de eficiência agrônômica (IEA): a) apatitas – Abaeté e Araxá: 27%; Patos de Minas: 13%; Tapira: 5%; e Catalão: 2%; b) termofosfato IPT: 97% e o hiperfosfato reativo de Gafsa, 102%; c) bauxitas de Pirocaua, 41% e Phospal: 50%. Os extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2 aferem adequadamente os níveis de P disponível nos dois solos estudados aplicados na forma de SFT. O extrator Mehlich-1 solubiliza os fosfatos naturais apatíticos aplicados ao solo, superestimando o P disponível; os extratores Bray-1 e Bray-2 solubilizam preferencialmente as bauxitas fosfóricas. Os níveis críticos de P disponível nos solos são adequadamente estimados pelo método Bray-1 com a aplicação de fosfatos apatíticos e pelo método Mehlich-1 com a aplicação das bauxitas fosfóricas.

PALAVRAS-CHAVE: Latossolos, cerrados, soja, fontes de fósforo, extratores químicos, soja.

INTRODUÇÃO

A baixa fertilidade dos solos de cerrados, caracterizada por acidez elevada e baixos teores de cálcio e fósforo, foi diagnosticada pelos trabalhos pioneiros de Fagundes *et al.* (1953). As curvas de resposta obtidas com culturas anuais e pastagens na ausência de fósforo mostram rendimentos muito baixos, inviabilizando a agricultura na região sem

adubação fosfatada (Goedert & Lobato 1983). Devido à alta capacidade de adsorção de fósforo de solos argilosos e reação ácida dos fosfatos solúveis, altas doses são necessárias para obter produções comerciais nos primeiros anos de cultivo. Para contornar o problema dos custos dos fosfatos solúveis obtidos pelos processos convencionais de solubilização, vem sendo proposto o uso de fontes alternativas de fósforo, como os fosfatos de fusão e os naturais.

1. Entregue para publicação em abril de 2001.

2. Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás - Cx. Postal 131, CEP 74001-970. Goiânia – GO.

3. Doutorado do Programa de Pós-graduação em Agronomia da Escola de Agronomia da UFG.

Os fosfatos naturais geralmente são classificados, quanto à sua origem, em vulcânicos (apatitas) e sedimentares (fosforitas e bauxitas fosfóricas). Os de origem vulcânica, devido ao seu alto grau de cristalização, são poucos solúveis, enquanto os de origem sedimentar são mais solúveis pelo índice “ACS” (*absolute citrate solubility*). Essa diferença é decorrente das características intrínsecas dos fosfatos, sendo as mais importantes o grau de cristalinidade, o grau de substituição isomórfica de PO_4^{3-} por CO_3^{2-} e F na rede cristalina do mineral, a porosidade e a granulometria (Chien 1977, Lehr & McClellan 1972).

A eficiência agronômica de fosfatos é afetada por vários fatores, como a origem geológica, a granulometria e a solubilidade, pelas características físicas e químicas do solo (textura, mineralogia, capacidade de adsorção de ânions, pH, teores de Ca, Mg, P, etc.), pelas espécies cultivadas, pelo modo de incorporação ao solo e tempo de reação (Thomas & Peaslee 1973, Hammond *et al.* 1986, Kaminski & Mello 1984, Goedert & Lobato 1984, Kliemann 1995).

A eficiência agronômica de fosfatos pode ser avaliada por diversos índices, dentre os quais se destacam a solubilidade em ácido cítrico a 2%, o índice de eficiência agronômica (IEA) e o equivalente em superfosfato triplo (EqST), cuja eficiência agronômica é aferida por meio de índices estabelecidos pela comparação com um fosfato padrão, em geral o superfosfato triplo. Diversos trabalhos evidenciam baixa eficiência agronômica de alguns fosfatos naturais (Oliveira *et al.* 1984, León *et al.* 1986, Korndörfer *et al.* 1999).

O ácido cítrico a 2% (pH 2,3) apresenta-se predominantemente na espécie $\text{H}_3\text{citrato}^-$ e em menor proporção na espécie $\text{H}_2\text{citrato}^-$. A primeira espécie forma preferencialmente complexos com Ca^{2+} e Cu^{2+} , a segunda com Ca^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} e Mn^{2+} , mas nenhuma das duas espécies forma complexos com o Al^{3+} . Conseqüentemente, é de se esperar maior solubilidade dos fosfatos de cálcio do que do fosfato de ferro e alumínio e maior do fosfato de ferro do que do fosfato de alumínio. A solubilidade total em ácido cítrico ocorre em termofosfatos, farinha de ossos e fosfatos bi e tricálcicos, a solubilidade mediana em fosforitas e a baixa solubilidade em apatitas (Oliveira *et al.* 1984).

A solubilidade dos fosfatos em ácido cítrico a 2% é considerada um critério indireto de avaliação da eficiência agronômica de fosfatos. Braga (1980) considera que a solubilidade de fosfatos em ácido cítrico jamais servirá para caracterizar a eficiência

agronômica, devendo ser usada apenas como indicativo para diferenciar os fertilizantes do ponto de vista comercial. Goedert & Lobato (1984) obtiveram estreitas correlações entre o índice de eficiência agronômica e a solubilidade em água e em ácido cítrico a 2% de fosfatos parcialmente acidulados, considerando os procedimentos válidos para avaliar a eficiência do fertilizante a curto prazo. Da mesma forma, Oliveira *et al.* (1984) obtiveram estreita correlação entre a eficiência agronômica de fosfatos e sua solubilidade em ácido cítrico, com exclusão de fosfatos de alumínio, não solúveis em ácido cítrico.

Nas avaliações de diversas fontes de fosfatos, com base na produção de culturas, devem-se levar em conta erros de interpretação provenientes de aplicações de doses únicas de fertilizantes. Por isso, alguns autores recomendam o uso de curvas de resposta. Na prática, porém, segundo Raji & Diest (1980), o emprego de diferentes fosfatos gera curvas de respostas de formatos diferentes, o que dificulta o uso dos mesmos modelos matemáticos para todos os casos. Mesmo assim, é útil calcular os valores de eficiência para diferentes doses de P_2O_5 aplicados. Por outro lado, as avaliações das fontes de fósforo nem sempre discriminam com segurança a sua eficiência agronômica, uma vez que as comparações costumam ser feitas dentro de uma mesma dose e não permitem, assim, avaliar a equivalência de fontes para o mesmo nível de rendimento físico. A eficiência agronômica de fosfatos, estimada pelo índice de eficiência agronômica (IEA), também chamado de eficiência agronômica relativa (EAR), foi proposta por Barnes & Kamprath (1975) e empregada por diversos autores brasileiros (Goedert & Lobato 1984, Braga *et al.* 1991, Korndörfer *et al.* 1999). O modelo pressupõe que a quantidade de P nativo do solo absorvida pelas plantas é a mesma em qualquer dose de adubação.

Entretanto, sabe-se que a aplicação de fosfatos naturais modifica substancialmente o comportamento dos extratores de P disponível, que devem ser interpretados à luz de seu comportamento químico no solo e de sua reação com os fosfatos.

Com a aplicação de fosfatos naturais cálcicos, tipo apatitas, o H^+ ativo dos extratores Mehlich-1 e Bray-2 solubiliza uma porção apreciável de fósforo, que, no entanto, não reagiu previamente com o solo. Conseqüentemente, o fósforo disponível é superestimado (Bahia Filho *et al.* 1982, Braga *et al.* 1991). Dessa forma, o extrator Bray-1, através do íon fluoreto e da sua menor acidez, é sensível a modificações na disponibilidade de P causadas por

reações de fosfatos apatíticos (Bahia Filho *et al.* 1982).

A eficiência agronômica de fosfatos naturais foi pesquisada por Feitosa *et al.* (1978), usando o trigo como planta indicadora, com a seguinte ordem decrescente: superfosfato triplo < termofosfato Yoorin < hiperfosfato < termofosfato IPT < bauxita fosfórica (de Pirocaua – MA) < Phospal (Senegal) e fosfato Alvorada, cujo comportamento foi semelhante e superior aos demais. As apatitas (de Araxá, de Jacupiranga, de Patos de Minas, de Catalão e de Ipanema) não diferiram da testemunha.

A pesquisa com fosfato de ferro e alumínio, ao que tudo indica, foi iniciada na Nova Zelândia com Doak *et al.* (1965). O fosfato de ferro/alumínio (calcinado a baixa temperatura - “C grade” Christmas Island rock phosphate) possui teores de P_2O_5 da ordem de 9 a 13 %, com teores variáveis de apatita e solubilidade em ácido cítrico variando entre 70 e 100%. O produto, segundo Stephens & Lipsett (1973), embora finamente moído, foi claramente inferior ao superfosfato no primeiro ano de pastagem com trevo subterrâneo no Sudoeste da Austrália. O efeito residual, no entanto, chegou a 2/3 da resposta do superfosfato triplo. A mistura das duas formas apresentou resultados intermediários. Não foram observados efeitos tóxicos do material.

O Phospal, originário do Senegal, é um fosfato alumino-cálcico, que com tratamento térmico apresenta teores médios de 34% de P_2O_5 , sendo 27% solúveis em citrato de amônio (SMT 1974). As bauxitas fosfóricas (de Pirocaua – MA e Phospal – Senegal), segundo Braga *et al.* (1980) e Goedert & Lobato (1984), mostraram reação apenas moderada.

A eficiência dos extratores químicos de P disponível no solo foi testada por diversos autores. O método Mehlich-1 (Nelson *et al.* 1953) tem sido pouco recomendado para solos argilosos, principalmente quando houve aplicação de fosfatos pouco solúveis em água. Segundo Raij & Diest (1980), com a aplicação de fosfatos naturais tipo apatitas, os extratores ácidos solubilizam quantidades de fósforo não disponíveis. O método Bray-1 tem sido recomendado para solos com amplas variações de propriedades químicas. A resina de troca aniônica tem apresentado resultados apenas satisfatórios em relação a outros extratores, cujas premissas básicas seriam a de não-alterações químicas nas propriedades naturais dos solos (Williams 1951) e de simular o comportamento do sistema radicular na absorção de fósforo do solo. A seguir foi introduzido o método Mehlich-3, para uso em solos ácidos. Esse extrator é adequado para

avaliar o P disponível em solos. Atualmente está sendo usado o extrator Mehlich-1. Dentre os extratores ácidos, o método Mehlich-3 vem sendo considerado o mais econômico para análises de rotina de solos, pela capacidade de extrair simultaneamente outros nutrientes, como Ca, Mg, K, Na e micronutrientes (Tran *et al.* 1990).

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência agronômica de fosfatos naturais e industrializados e sua influência na eficácia de extratores químicos de fósforo disponível no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em dois solos, com as seguintes características:

a) latossolo vermelho-escuro distrófico (LEd), fase cerrado; areia: 580 g kg^{-1} ; silte: 90 g kg^{-1} ; e argila: 380 g kg^{-1} ; carbono: $19,1 \text{ g kg}^{-1}$; P disponível: $4,1 \text{ mg dm}^{-3}$; K extraível: 27 mg dm^{-3} ; Ca+Mg: $2,50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; Al: $20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; H+Al: $5,90 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; pH em água: 5,80;

b) latossolo roxo distrófico (LRd), fase cerrado; areia: 330 g kg^{-1} ; silte: 140 g kg^{-1} ; argila: 530 g kg^{-1} ; carbono: $17,0 \text{ g kg}^{-1}$; P disponível: 1 mg dm^{-3} ; K: 117 mg dm^{-3} ; Ca+Mg: $0,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; Al: $1,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; H+Al: $7,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; de; pH em água: 5,60.

As amostras de terra das parcelas experimentais foram colhidas até a profundidade de 20 cm.

Utilizou-se um calcário com 75% de PRNT, aplicando-se 2 t ha^{-1} no solo LEd e 4 t ha^{-1} no LRd, quantidades estas corrigidas para 100%. As fontes de fosfato testadas nos experimentos, com as respectivas características, encontram-se na Tabela 1.

Empregou-se o delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições por tratamento. Usaram-se parcelas experimentais de 5m de comprimento por 2,4 m de largura. A máxima eficiência técnica das doses de superfosfato triplo foi determinada usando-se o modelo

$$Y = a_0 + a_1P + a_2P^{1/2}$$

onde:

Y: produção de grãos de soja (com umidade corrigida para 130 g kg^{-1}) em kg ha^{-1} e

P: doses de superfosfato triplo

(0, 100, 200, 400, 800 e $1600 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$).

A eficiência agronômica dos fosfatos foi calculada pelo índice de eficiência agronômica de Barnes & Kamprath (1975):

$$IEA = \frac{P_i - P_0}{PSFT_i - P_0} \times 100$$

onde:

P_i : produção nas doses de P_2O_5 consideradas de 200 e 800 kg ha⁻¹,

P_0 : produção na ausência de fósforo e

$PSFT_i$: a produção no nível de P_2O_5 considerado, estimada pela curva média de resposta à aplicação de níveis crescentes de superfosfato triplo.

Os índices de disponibilidade de fósforo no solo foram avaliados por extratores Mehlich-1 (Nelson *et al.* 1953) e Bray-1 e Bray-2 (Bray & Kurtz 1945), relacionando-os com as doses aplicadas e a produção relativa pelo modelo

$$Y = a_0 + a_1P_i + a_2P_i^2$$

onde:

Y : produção relativa e

P_i : teores de fósforo disponível no solo.

Tabela 1. Características químicas e físicas das fontes de fósforo usadas nos dois experimentos. Goiânia, GO. 2000.

Fontes de Fósforo	P_2O_5 (g kg ⁻¹) ¹			Granulometria - mesh				
	Total	solúvel em A.C. ²		> 60	60-100	100-150	150-200	< 200
		1:100	1:300	g kg ⁻¹				
Araxá	378,1	43,6	93,3	-	6,0	24,0	43,0	923,0
Patos de Minas	245,3	47,5	100,3	-	5,0	93,0	192,0	710,0
Tapira	368,8	-	-	-	-	-	-	-
Abaeté	218,8	36,0	75,0	439,0	116,0	80,0	35,0	330,0
Catalão	378,1	tr.	tr.	20,0	90,0	120,0	158,0	612,0
Bauxita de Pirocaua	306,2	tr.	tr.	6,0	79,0	121,0	114,0	647,0
Bauxita Phospal	328,1	-	-	-	-	-	-	-
Hiperfosfato de Gafsa	284,4	117,5	243,0	-	40,0	50,0	116,0	647,0
Termofosfato IPT	289,5	91,3	111,0	165,0	108,0	129,0	95,0	503,0
Superfosfato Triplo	484,4	462,5	-	-	-	-	-	-

1. Fonte: CPAC/Embrapa, Planaltina (DF) e Escola de Agronomia (UFG), Goiânia, GO.

2. A.C. : Ácido cítrico a 2%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de resposta da soja à adubação fosfatada (na forma de superfosfato triplo) são ilustradas na Figura 1, a partir das quais se estimou a máxima eficiência técnica de 3432 kg ha⁻¹ de soja com 968 kg ha⁻¹ de P_2O_5 e de 1680 kg ha⁻¹ de soja com 1.280 kg de ha⁻¹ de P_2O_5 , nos solos latossolo vermelho-escuro distrófico (Goiânia) e latossolo roxo distrófico (Anápolis), respectivamente. A diferença da produtividade de grãos de soja no solo de Anápolis foi causada pela ocorrência de veranico e replantio da soja, que reduziu em cerca de 50% a produtividade e a eficiência dos fertilizantes, quando comparada com a obtida no solo de Goiânia.

A partir das curvas de respostas calcularam-se os índices de eficiência agronômica dos fosfatos testados com sua posição relativa, como mostram a Figura 1 e a Tabela 2.

Segundo León *et al.* (1986), fazem parte do grupo de rochas fosfáticas de alta eficiência as provenientes de Gafsa (Tunísia), Arad (Israel), Sechura e Bayovar (Peru) e Carolina do Norte (EUA); as do segundo grupo, de média eficiência, são as provenientes do Centro da Flórida e Tennessee (EUA), Pesca e Huila (Colômbia); as do terceiro grupo, de baixa eficiência, são as apatitas de Patos de Minas, Araxá e Abaeté; e as de muito baixa eficiência, são as de Jacupiranga, Tapira e Catalão. Para Lehr & McClellan (1972), os fosfatos da Argélia e do Marrocos apresentam eficiência de 100%, comparados ao SFT. Korndörfer *et al.* (1999), cultivando milho em solo LV distrófico, fase cerrado, verificaram que a capacidade dos fosfatos naturais Arad, Marrocos e Gafsa em fornecer fósforo para o milho foi de 60, 80 e 97%, respectivamente, quando comparados com o superfosfato triplo.

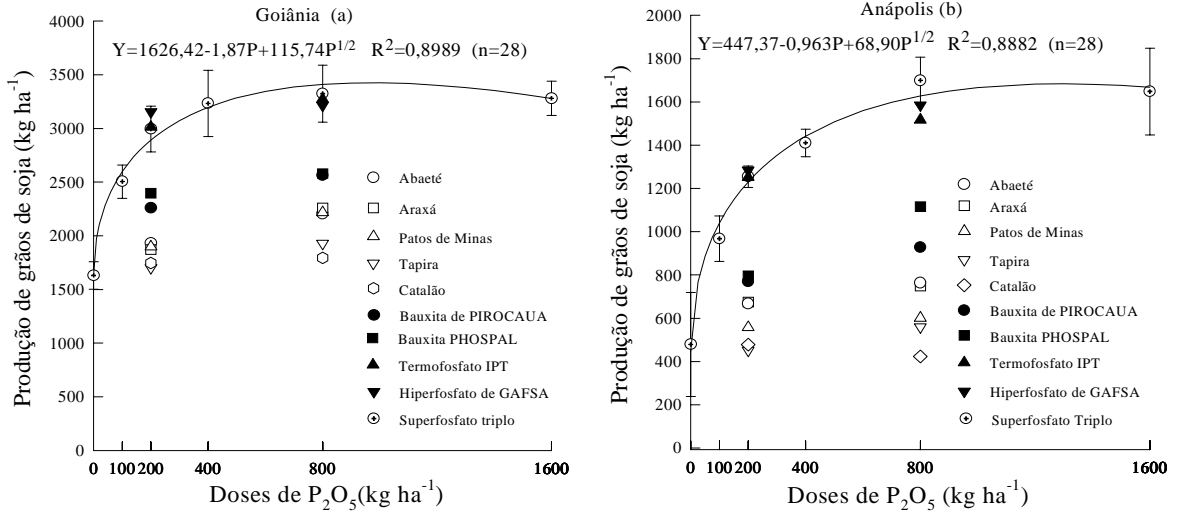


Figura 1. Produção de soja em função das doses de fósforo em dois latossolos (LEd (a) – Goiânia, fase cerrado, e LRd (b) – Anápolis, fase cerrado). Goiânia, GO. 2000.

O termofosfato IPT e o hiperfosfato (fosfato reativo) de Gafsa apresentam índices de eficiência agrônômica médios equivalentes ao SFT, confirmando resultados semelhantes de Goedert & Lobato (1984). Korndörfer *et al.* (1999) encontraram equivalentes em superfosfato triplo dos fosfatos naturais reativos de Arad, Marrocos e Gafsa de 60%, 80% e 97%, respectivamente. No caso específico do hiperfosfato de Gafsa, a maior solubilidade e eficiência devem ser atribuídas à substituição isomórfica parcial do PO_4^{3-} da rede cristalina da fosforita por CO_3^{2-} , de acordo com Lehr & McClellan (1972).

Os índices médios de eficiência agrônômica das apatitas de Abaeté, de Araxá e de Patos de Minas, constantes na Tabela 2, são considerados baixos, e os das apatitas de Tapira e Catalão muito baixos, o que pode ser atribuído ao alto grau de cristalinidade das apatitas (Thomas & Peaslee 1973, Hammond *et al.* 1986) e à sua baixa solubilidade em ácido cítrico a 2% (Oliveira *et al.* 1984). Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores (Feitosa *et al.* 1978, Goedert & Lobato 1984).

Tabela 2. Índices de eficiência agrônômica de fosfatos naturais em latossolos vermelho-escuros distróficos (LEd) e roxo distrófico (LRd), fase cerrado. Goiânia, GO. 2000.

Fonte de fósforo/dose	Índices de eficiência agrônômica (%)					
	Goiânia (LEd)			Anápolis (LRd)		
	200 ¹	800 ¹	Média	200 ¹	800 ¹	Média
Apatita de Abaeté	16	24	20	28	27	27
Apatita de Araxá	19	35	27	29	26	27
Apatita de Patos de Minas	21	33	27	14	13	13
Apatita de Tapira	6	17	12	1	10	5
Apatita de Catalão	9	9	9	3	3	3
Termofosfato IPT (USP)	109	92	100	103	91	97
Hiperfosfato de Gafsa	120	89	104	103	96	102
Bauxita de Pirocaua (Maranhão)	50	52	51	41	41	41
Bauxita Phospal (Senegal)	61	53	57	44	57	50

1. Doses de P_2O_5 (kg ha⁻¹) utilizadas para calcular os índices de eficiência agrônômica (IEA).

As bauxitas fosfóricas testadas apresentam eficiência agrônômica média, da ordem de 50%, que, segundo Goedert & Lobato (1984) e Braga *et al.* (1991), é considerada apenas moderada.

As correlações significativas entre produção relativa de soja em função dos teores de fósforo disponível (Figura 2) mostram que os três extratores são eficientes na recuperação do fósforo adicionado na forma de superfosfato triplo. Estimaram-se os seguintes níveis críticos de P disponível no solo: 14, 11 e 29 mg P dm⁻³, respectivamente para os extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, com base em 90% de produção relativa de soja. Entretanto, quando são incluídos nas equações os teores de P disponível com a inclusão de diversas fontes de fósforo, diferentes relações foram verificadas, como mostra a Figura 3.

A ausência de correlação entre a produção relativa de soja e a extração de P pelo método Mehlich-1, com a inclusão dos teores de P extraído das apatitas (Abaeté, Araxá, Patos de Minas, Tapira e Catalão) na curva de reposta (Figura 3a), demonstra que o extrator extrai preferencialmente os fosfatos de solo e de fontes de fósforo ligadas ao cálcio, independentemente da solubilidade destes em ácido cítrico. As quantidades de P recuperadas pelo extrator Mehlich-1 não apresentam respostas correspondentes em termos de produção, particularmente com a aplicação de fosfatos apatíticos. Este aspecto é de extrema importância por causa dos valores de IEA baixos e muito baixos, já discutidos anteriormente. Portanto, na presença de fosfatos apatíticos, o extrator revela-se totalmente inadequado para avaliar o P disponível no solo. Resultados similares, trabalhando com fosfatos de rocha, foram obtidos por Brasil & Muraoka (1997).

O extrator Bray-1 recupera quantidades de P disponível compatíveis com os valores de IEA das apatitas (Tabela 2), o que é corroborado pela relação altamente significativa entre a produção relativa de soja e o P extraído pelo método Bray-1, mesmo com a inclusão dos teores de P extraído das apatitas como mostra a Figura 3b. O nível crítico de P disponível estimado, assumindo 90% da produção relativa, é de 12mg dm⁻³, isto é, praticamente o mesmo daquele obtido pela aplicação isolada do SFT (11mg dm⁻³). Raji & Diest (1980) consideraram o extrator Bray-1 como um dos métodos mais adequados para as estimativas de P disponível com a aplicação de fosfatos de diferentes naturezas. Brasil & Muraoka obtiveram correlação entre a extração de P disponível pelo método e o P extraído (acumulado) pelo caupi, porém altamente significativa com a cultura do arroz. Ao

contrário do extrator Bray-1, o extrator Bray-2, com a inclusão das apatitas, não fornece relações compatíveis com a eficiência agrônômica das apatitas, apresentando comportamento similar ao extrator Mehlich-1, como pode ser verificado na Figura 3c. A explicação para esse comportamento diferenciado dos três extratores diante das apatitas é a maior acidez dos métodos Mehlich-1 (HCl 0,05N + H₂SO₄ 0,025N) e Bray-2 (HCl 0,1N), comparados com o Bray-1 (HCl 0,025 N), uma vez que a acidez do último é suficiente para não solubilizar o PO₄⁻³ de fosfatos naturais apatíticos. Ainda, os métodos Mehlich-1 e Bray-2 fornecem íons de hidrogênio ativos (prótons) em maior concentração, deslocando, desta forma,

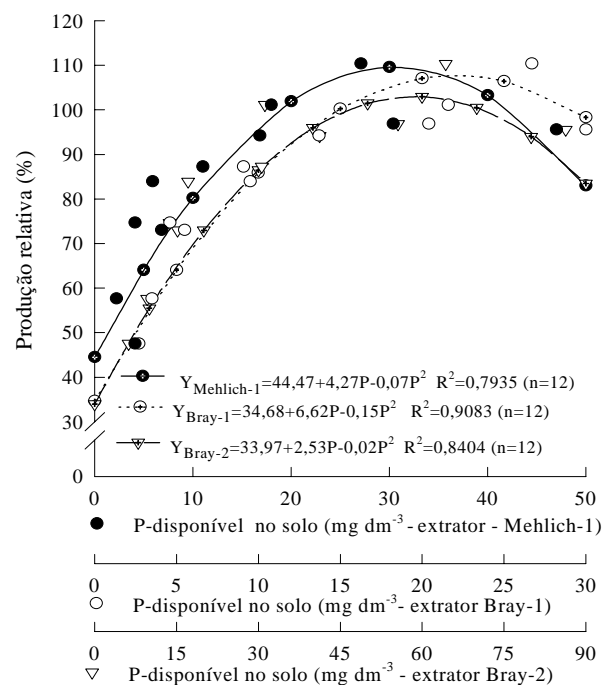


Figura 2. Relações da produção relativa de soja versus fósforo disponível estimado pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2 com a aplicação de superfosfato triplo (médias de quatro repetições). Goiânia, GO. 2000.

preferencialmente as formas de P-Ca das apatitas e/ou dos solos (Hingston *et al.* 1968).

A correlação altamente significativa entre a produção relativa e as quantidades recuperadas de P pelo extrator Mehlich-1, com a inclusão das bauxitas fosfóricas (de Pirocaua e Phospal), são compatíveis com os seus índices de eficiência agrônômica (Tabela 2), com um nível crítico de 16 mg P dm⁻³ (Figura 3d), índice este muito próximo daquele estimado para o SFT de 14 mg dm⁻³. Este comportamento pode ser

explicado pelos prótons em atividade na solução diluída de duplo ácido, que não são capazes de deslocar os radicais PO_4^{3-} das bauxitas fosfóricas e/ou do solo ligados ao alumínio; nesse caso, Brown *et al.* (1977) sugerem o uso de extratores como o Bray-2 e Olsen para a avaliar o fósforo disponível no solo.

As baixas correlações encontradas entre produção relativa e teores de P disponível estimados pelos extratores Bray-1 e Bray-2, de acordo com as Figuras 3e e 3f, no que se refere à ação do F^- , podem ser parcialmente explicadas pela atuação preferencial do íon F^- , liberado em solução pelos extratores Bray-1 e do Bray-2, sobre os fosfatos de alumínio das

bauxitas fosfóricas e/ou do solo. Em solos ácidos, em concentrações iguais, a adsorção do F^- predomina sobre os outros íons comuns, o que torna o íon F^- um agente efetivo de desorção de ânions previamente adsorvidos, como PO_4^{3-} , SiO_4^{2-} e SeO_3^{2-} . Desse modo, o íon F^- desloca e solubiliza quantidades de PO_4^{3-} das bauxitas não-compatíveis com seus índices de eficiência agrônômica constantes na Tabela 2. Por extensão, pode-se dizer que o extrator Bray-1 é adequado para estimar a solubilidade de fosfatos naturais apatíticos, devido à extração preferencial de P-Al (Thomas & Peaslee 1973, Khasawneh & Doll 1978, Couto *et al.* 1987).

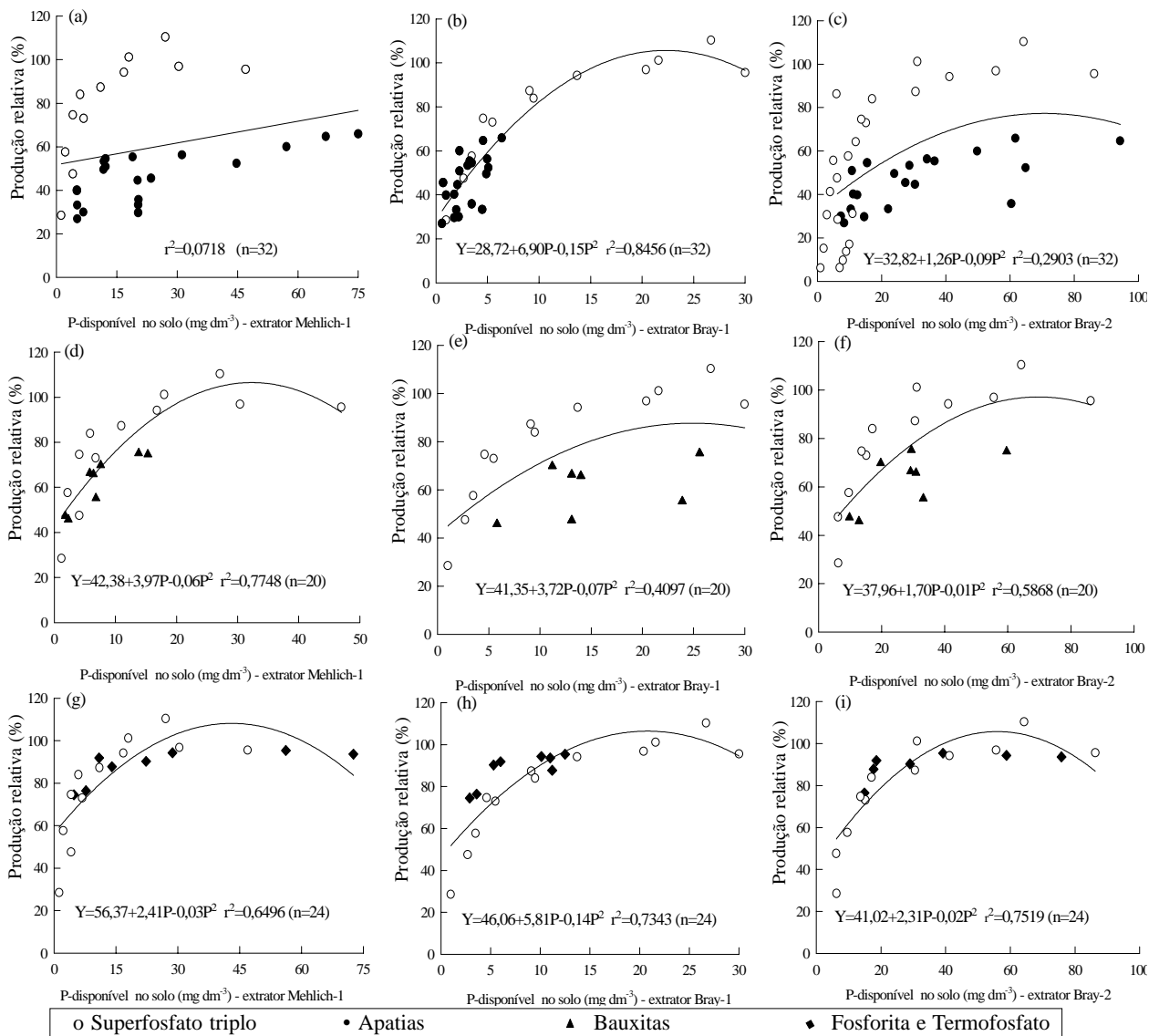


Figura 3. Produção relativa de soja *versus* teores de fósforo extraível estimado pelos métodos Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, com a aplicação de superfosfato triplo e inclusão das fontes de fosfato (apatitas de Araxá, Patos de Minas, Abaeté e Catalão; termofosfato IPT; bauxitas de Pirocaua e do Senegal; e fosfato reativo de Gafsa) (médias de quatro repetições). Goiânia, GO. 2000.

A maior acidez do Bray-2 (HCl 0,1N) em relação ao Bray-1 (HCl 0,025 N) é suficiente para que o segundo não solubilize o P de fosfatos naturais apatíticos, que nessa situação atua predominantemente sobre o fósforo ligado ao alumínio do solo e das bauxitas fosfóricas. Assim o extrator Bray-1, através do íon fluoreto e da sua menor acidez, é sensível a modificações na disponibilidade de P causadas por reações de fosfatos apatíticos (Bahia Filho *et al.* 1982). Essa diferença na acidez também exerce uma certa influência sobre o PO_4^{3-} liberado das bauxitas fosfóricas, sendo o efeito maior na de Pirocaua do que na Phospal, como pode ser visualizado nas Figuras 3(e) e 3(f).

As correlações altamente significativas da produção relativa *versus* P disponível pelo extrator Mehlich-1 (Figura 3g), com a inclusão do termofosfato IPT e do fosfato reativo de Gafsa, são esperadas, pois a sua eficiência agronômica é equivalente ao SFT, como mostra a Tabela 2. Além disso, o nível crítico estimado de 18mg P dm^{-3} pelo extrator Mehlich-1, a partir da equação da figura embora maior do que o verificado para o SFT, correlaciona-se significativamente com a produção relativa. Os níveis críticos estimados para os extratores Bray-1 Bray-2 (Figuras 3h e 3i), com a inclusão do termofosfato IPT e do fosfato reativo de Gafsa, são 10 e 28 mg P dm^{-3} , sendo praticamente iguais aos verificados para o SFT isoladamente.

O extrator Bray-1 recupera menores quantidades de fosfato disponível, adicionadas como hiperfosfato reativo de Gafsa (Figuras 3h e 4i), quando comparado com o Bray-2. Esse efeito pode ser parcialmente explicado pela maior acidez do segundo extrator, pela maior solubilidade da fosforita (da ordem 243 g kg^{-1}) e pela substituição isomórfica parcial do radical PO_4^{3-} por CO_3^{2-} na estrutura do cristal da fosforita (Chien 1977, Lehr & McClellan 1972).

CONCLUSÕES

Os fosfatos testados obedecem à ordem decrescente de eficiência agronômica: hiperfosfato de Gafsa > termofosfato IPT > bauxita fosfórica Phospal > bauxita fosfórica de Pirocaua > apatitas de Abaeté e Araxá > apatita de Patos de Minas > apatita de Tapira > apatita de Catalão, tendo como referencial o superfosfato triplo. Os extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2 aferem adequadamente os níveis de P disponível nos dois solos estudados. O extrator Mehlich-1 solubiliza os fosfatos naturais apatíticos aplicados ao solo, superestimando o P disponível; os

extratores Bray-1 e Bray-2 solubilizam preferencialmente as bauxitas fosfóricas. Os níveis críticos de P disponível no solo foram adequadamente aferidos pelo método Bray-1 com a aplicação de fosfatos apatíticos e pelo método Mehlich-1 com a aplicação das bauxitas fosfóricas.

REFERÊNCIAS

- Bahia Filho, A. F. C., C. A. Vasconcellos, H. L. Santos, J. F. Mendes, G. V. E. Pitta & A. C. Oliveira. 1982. Formas de fósforo “disponível” em um latossolo vermelho-escuro, fertilizado com diferentes fosfatos. *Rev. bras. Ci. Solo*, 6 (2) : 99-04.
- Barnes, J. S. & E. J. Kamprath. 1975. Availability of North Carolina rock phosphate applied to soil. Agricultural Station. North Carolina. 23 p. (Technical Bulletin, 229).
- Braga, N. R., H. A. A. Mascarenhas, C. T. Feitosa, R. Hiroce & B. Rajj. 1980. Efeitos de fosfatos sobre o crescimento e produção da soja. *Rev. bras. Ci. Solo*, 2 (3) : 36-9.
- Braga, N. R., H. A. A. Mascarenhas, E. A. Bulisani, B. Rajj, C. T. Feitosa & R. Hiroce. 1991. Eficiência agronômica de nove fosfatos em quatro cultivos consecutivos de soja. *Rev. bras. Ci. Solo*, 15 (3): 315-19.
- Brasil, E. C. & T. Muraoka. 1997. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. *Rev. bras. Ci. Solo*, 21:599-06.
- Bray, R. H. & L. T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, 59 (1) :39-45.
- Brown, J. R., J. Garret & J. R. Fisher. 1977. Soil testing in Missouri. University of Missouri, Columbia, USA. 33 p.
- Chien, S. H. 1977. Dissolution of phosphate rock in a flooded acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 41: 1106-109.
- Couto, C., R. F. Novais, L.M. Costa, N. F. Barros & J. C. L. Neves. 1987. Efeito de características químicas, físicas e mineralógicas do solo sobre a solubilização da apatita-de-araxá. *Rev. bras. Ci. Solo*, 11 (3) :239-44.
- Doak, B. W., P. J. Gallaher, L. Evans & F. B. Muller. 1965. Low temperature calcination of “C” grade rock phosphorus from Christmas Island. *N. Z. J. Agr. Res.*, 8 : .15-29.
- Fagundes, A. B., W. C. Menezes & R. E. Kalckmann, R. E. 1953. Adubação e calagem de

- terras do Cerrado. In Reunião Brasileira do Cerrado, 2. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Campinas, SP. p.295-304.
- Feitosa, C. T., A. R. D. Raij & J. C. Alcarde. 1978. Determinação preliminar da eficiência relativa de fosfatos para trigo, em casa de vegetação. *Rev. bras. Ci. Solo*, 2 (3) :193-95.
- Goedert, W. J. & E. Lobato. 1983. Eficiência agrônômica de fosfatos em solo de Cerrado. *Pesq. agropec. bras.*, 15 : 311-18.
- Goedert, W. J. & E. Lobato. 1984. Avaliação agrônômica de fosfatos em solo de Cerrado. *Rev. bras. Ci. Solo*, 8 (1) : 97-102.
- Hammond, L. L., S. H. Chien & A. U. Mokwunie. 1986. Agronomic value of unacidulated and partilally adiculated phosphate rocks indiginous to the tropics. *Adv. Agron.*, 40 : 89-40.
- Hingston, F. J., R. J. Atkinson, A.M. Posner & J. P. Quirk. 1968. Specific adsorption of anions on goehtite. In *Interantional Congress of Soil Science*, 1 : 699-77. Wilsonsin.
- Kaminski, J. & F. A. F. Mello. 1984. Épocas de aplicação de fosfatos em relação ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo. *Rev. bras. Ci. Solo*, 8 (3) : 297-00.
- Khasawneh, F. E. & E. C. Doll. 1978. The use of phosphate rok for direct application to soils. *Adv. Agron.*, 30 : 159-06.
- Kliemann, H. J. 1995. Efeitos da calagem e de fontes de fósforo no rendimento da soja em dois solos de Cerrado. *Anais Esc. Agron. e Vet.*, 25 (2) :129-39.
- Korndörfer, G. H., W. A. L. Cabezas & N. Horowitz. 1999. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais na cultura do milho. *Scientia Agricola*, 56 (2): 32-39.
- Lehr, J. R. & G. H. McClellan. 1972. A revised laboratory reactivity for evaluating phosphate rocks for direct application. Muscle shoals. National Fertilizer Development Center, Alabama. 36p. (Bulletin, Y-43).
- León, L. A., W. E. Fenster & L. L. Hammond. 1986. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Perú and Venezuela. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 780-02.
- Nelson, W. L, A. Mehlich & E. Winters. 1953. The development, evaluation and use of soil test for phosphorus availability. In Pierre, W.H. & A.G. Norman. *Soil fertilizer phosphorus*. Academic Press. New York. 153-88. (*Agronomy*, 14).
- Oliveira, E. L., O. Muzilli, K. Igue & M. T. T. Tornero. 1984. Avaliação da eficiência agrônômica dos fosfatos naturais. *R. bras. Ci. Solo*, 8 (1) :63-67.
- Raij, B. & B. Diest. 1980. Phosphate supplying power in na Oxisol. *Plant & Soil*, 55: 97.
- SMT. Societé D'études et d' Applications de Minerais de Thiès. 1974. Phospal et alumine. Courbevoie, França. SMT Information.
- Stephens, A. & J. Lipsett. 1973. Calcined C-grade rock phosphate from Christmas Island as a source of phosphate for pastures in south-eastern Australia. *Fld. Stn. Rec. Div. Pl. Ind.*, 2: 43-54.
- Thomas G. W. & D. E. Peaslee. 1973. Testing soils for phosphorus. In Walsh, L. M. & J. D. Beaton (eds). *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of América, p.115-29.
- Tran, T. S., M. Giroux, J. Guilbeaut & P. Audess. 1990. Evaluation of Mehlich-III extractant to estimate the available P in Quebec soils. *Comm. Soil Sci. Pl. Anal.*, 21: 1-28.
- William, E. G. 1951. Effects of acid treatment of soils on phosphate availability and solubility. *Soil Sci.*, 2 :110-17.