

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FOSFATOS NATURAIS, FOSFATOS PARCIALMENTE ACIDULADOS E TERMOFOSFATOS EM SOLO DE CERRADO¹

WENCESLAU J. GOEDERT², THOMAZ A. REIN³ e DJALMA M.G. DE SOUZA⁴

RESUMO - Foram avaliadas, durante quatro anos, 18 fontes de fósforo (fosfatos) produzidos a partir dos concentrados fosfáticos de Araxá, MG, Patos de Minas, MG, Tapira, MG, Catalão, GO e Anitápolis, SC. Os fosfatos constituíram-se destes materiais aplicados *in natura* (fosfatos naturais), parcialmente solubilizados com ácido sulfúrico e outros acidulantes, ou tratados termicamente. A cultura-teste foi a soja, e a eficiência agronômica relativa (ER) foi quantificada tomando-se como referência a curva de resposta do superfosfato triplo. Os fosfatos naturais apresentaram baixa eficiência agronômica, que praticamente não melhorou com o tempo. A solubilidade e eficiência relativa dos fosfatos parcialmente acidulados foi diretamente proporcional ao grau de acidulação (relação molar H^+/P_2O_5), independentemente da rocha de origem. A eficiência agronômica dos termofosfatos foi similar à do superfosfato triplo. A solubilidade em ácido cítrico ou citrato neutro de amônio + água permitiu prever, com boa aproximação, a eficiência agronômica dos fosfatos, principalmente a dos parcialmente acidulados.

Termos para indexação: fósforo, fosfatos, ácido cítrico, cerrados.

AGRONOMIC EFFICIENCY OF ROCK PHOSPHATES, PARTIALLY ACIDULATED PHOSPHATES AND THERMALPHOSPHATES IN A CERRADO SOIL

ABSTRACT - Eighteen phosphorus sources (phosphates) produced from Araxá, MG, Patos de Minas, MG, Tapira, MG, Catalão, GO and Anitápolis, SC, rock phosphates were evaluated during four years. The test crop was soybeans and the relative agronomic efficiency was calculated using as reference the triple superphosphate response curve obtained from one application in the first year. The rock phosphates applied *in natura* exhibited low agronomic efficiency which almost did not increase with time. The solubility and relative efficiency of the partially acidulated phosphates was directly proportional to the acidulation rate (H^+/P_2O_5 molar ratio), and were not dependent on the rock phosphate origin. The fused and calcinated thermalphosphates exhibited high agronomic efficiency. The citric acid or neutral ammonium citrate + water extractant solutions allowed to predict with a good approximation the agronomic efficiency of the phosphates, mainly of the partially acidulated.

Index terms: phosphorus, phosphates, citric acid, cerrados.

INTRODUÇÃO

As jazidas fosfáticas nacionais são constituídas principalmente de materiais de origem ígnea e de baixa solubilidade (Alcarde & Ponchio 1980), e conseqüentemente apresentam baixa eficiência agronômica quando aplicados *in natura* (Goedert & Lobato 1980). Deste modo, há a necessidade de tratamento destes

¹ Aceito para publicação em 27 de março de 1989.

Trabalho realizado dentro do convênio EMBRAPA/PETROFÉRTIL, e apresentado parcialmente na XVII Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo, em Londrina, PR, 1986.

² Eng.-Agr., Ph.D., EMBRAPA/Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), Caixa Postal 70.0023, CEP 73300 Planaltina, DF.

³ Eng.-Agr., EMBRAPA/CPAC.

⁴ Quím. M.Sc., EMBRAPA/CPAC.

fosfatos visando a sua solubilização e melhor aproveitamento pelas plantas.

No Brasil, assim como na maioria dos países, a opção mais utilizada é a solubilização com os ácidos sulfúrico e fosfórico, produzindo-se superfosfatos e os fosfatos de amônio. Na forma desses produtos consome-se mais de 90% do fósforo destinado à agricultura brasileira.

Estes produtos são de elevada solubilidade em água e eficiência agrônômica, mas apresentam alguns problemas no aspecto industrial e econômico, como a necessidade de enxofre, que é importado em mais de 80% (Carmo 1986). Outra limitação destes processos é a exigência de concentrados fosfáticos como matéria-prima com elevado teor de P_2O_5 e baixo conteúdo de impurezas, o que tem levado a perdas de até 40% do P_2O_5 extraído nas jazidas na fase de concentração do minério (Lobo & Silva 1984, Rieder 1986).

Algumas opções vêm sendo, testadas visando minimizar estes problemas, como, por exemplo, a acidulação parcial e o tratamento térmico dos concentrados fosfáticos. Por acidulação parcial entende-se a utilização de qualquer ácido em proporção estequiometricamente inferior à necessária para a solubilização total do fósforo apatítico. Os resultados obtidos com ácido sulfúrico, nítrico e fosfórico mostraram que a eficiência agrônômica dos fosfatos parcialmente acidulados é inferior à dos superfosfatos, e, em termos gerais, diretamente relacionada ao nível de acidulação utilizado (Barreto 1977, Franco 1977, Ferreira & Kaminski 1979). Goedert & Sousa (1986) e Siqueira et al. (1986), em experimentos de casa de vegetação, verificaram, ainda, que a eficiência agrônômica de produtos obtidos a partir de várias rochas e níveis de acidulação com ácido sulfúrico foi equivalente à fração solubilizada do P_2O_5 total, expressa por ácido cítrico ou citrato neutro de amônio.

Já alguns produtos obtidos a partir do tratamento térmico de rochas fosfáticas tem apresentado eficiência similar ou mesmo superior à dos superfosfatos, conforme revisão efetuada por Goedert et al. (1986). Esta superioridade,

verificada em alguns trabalhos, pode ser atribuída, em parte, aos efeitos alcalinizantes e nutricionais dos silicatos de cálcio e magnésio presentes nestes produtos.

Atualmente, o termofosfato magnesiano fundido e os fosfatos parcialmente solubilizados com ácido sulfúrico (contendo 50% do P_2O_5 total solúvel em citrato neutro de amônio + água) contribuem cada um com aproximadamente 2% do P_2O_5 consumido no Brasil (Lobo 1986).

O objetivo deste trabalho foi avaliar em condições de campo e a médio prazo a eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados produzidos a partir de rochas fosfáticas de diferentes origens, envolvendo diferentes tratamentos térmicos, acidulantes, e níveis de acidulação.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram avaliados, durante quatro anos, com a cultura da soja (cv. Cristalina), 18 fosfatos cujas especificações e características químicas estão apresentadas na Tabela 1. A análise da solubilidade foi realizada conforme os métodos oficiais (Brasil 1983). Não foi realizada análise granulométrica dos produtos. Os fosfatos naturais e os termofosfatos apresentavam-se na forma de pó e foram preparados pela PETROFÉRTIL, atendendo ao que preceitua a legislação brasileira para a granulometria desses produtos.

O experimento foi instalado num Latossolo Vermelho-Escuro argiloso de cerrado, contendo 59% de argila e as seguintes características químicas na camada superficial de 20 cm: pH em água (1:2,5) 4,7; Al 1,3 meq/100 ml; Ca + Mg 0,2 meq/100 ml; K 26 mg/l e P 0,5 mg/l, sendo o Al e Ca + Mg extraídos por solução KCl 1N e P e K pelo extrator Mehlich-1 (H_2SO_4 0,025 N + HCl 0,05N).

Aplicou-se calcário dolomítico na dose de 4t/ha (PRNT = 100%), sendo incorporado com arado de disco, dois meses antes do primeiro plantio. Amostras de solo realizadas anualmente em todas as parcelas na camada de 0-20 cm acusaram os seguintes valores médios para os parâmetros de acidez do solo durante os quatro anos: pH em água (1:2,5) 5,8; Al 0,02 meq/100 ml e Ca + Mg 3,99 meq/100 ml.

Os fosfatos foram aplicados a lanço e apenas no

TABELA 1. Características químicas e especificações dos fosfatos avaliados.

Fosfatos ⁽¹⁾ (identificação)	H ⁺ /P ₂ O ₅ ⁽²⁾	Nutrientes (teor total)				Solubilidade Relativa ⁽³⁾		
		P ₂ O ₅	N	S	Mg	CNA + água	Ác. cítrico	Água
%								
Fosfatos Naturais (FN)								
FN Patos de Minas (MG)	0	23,2	...	...	...	3,4	25,9	0,4
FN Araxá (MG)	0	34,3	...	...	...	2,6	14,6	0,0
FN Catalão (GO)	0	39,8	...	...	...	2,8	10,8	0,2
FN Tapira (MG)	0	36,5	...	...	...	2,5	13,1	0,3
FN Anitapolis (SC)	0	36,5	...	...	...	2,2	14,0	0,0
Fosfatos parcialmente solubilizados com ácido sulfúrico⁽⁴⁾								
Patos AS-50	0,7	23,4	...	2,4	...	13,2	28,2	5,1
Patos AS-150	1,8	22,2	...	4,6	...	23,9	33,3	8,1
Patos AS-250	3,0	21,1	...	7,0	...	43,1	40,7	26,5
Araxá AS-350	2,9	24,8	...	8,0	...	49,6	49,6	33,5
Catalão AS-350	2,5	28,4	...	7,7	...	55,3	50,3	35,6
Tapira AS-350	2,7	26,8	...	8,6	...	50,7	47,8	32,8
Anitapolis AS-350	2,7	25,9	...	7,8	...	50,6	45,9	29,7
Fosfatos parcialmente solubilizados com outros acidulantes								
Patos AN-120 ⁽⁵⁾	1,5	19,5	2,5	0,7	...	23,1	36,9	9,2
Patos RNC-I ⁽⁶⁾	4,6	14,9	1,8	10,0	...	80,5	82,5	56,4
Termofosfatos⁽⁷⁾								
Termo fundido	—	14,8	...	...	6,2	68,2	82,4	0,7
Termo calcinado	—	16,5	...	...	0,5	77,6	97,0	6,1
Superfosfatos								
Superfosfato simples	...	20,0	...	12,0	...	93,5	83,5	76,0
Superfosfato triplo	...	49,1	...	...	...	91,2	84,1	82,1

- (1) Com exceção dos fosfatos naturais e termofosfatos, os demais produtos apresentavam-se na forma granulada.
- (2) Grau de acidulação dos fosfatos expresso pela relação molar H⁺/P₂O₅.
- (3) Percentagem de P₂O₅ solúvel em citrato neutro de amônio + água, ácido cítrico 2% e água, em relação ao teor de P₂O₅ total.
- (4) Os valores expressam a taxa de acidulação em kg de ácido sulfúrico/t de concentrado apatítico.
- (5) Mistura de ácido nítrico e sulfúrico, equivalente em termos de acidez (H⁺) a 120 kg de ácido sulfúrico/t de concentrado apatítico.
- (6) "Rota não convencional", mistura de ácido sulfúrico (AS) e sulfato de amônio (SA) na relação molar SA/AS = 0,3, equivalente em termos de acidez (H⁺) a 400 kg de ácido sulfúrico/t de concentrado apatítico.
- (7) Obtidos a partir do concentrado fosfático de Patos de Minas, sendo o Termo fundido produzido pelo CETEC-MG.

primeiro ano, uma semana antes do plantio, e incorporados com rotovalor. As doses aplicadas variaram de 190 e 240 kg de P₂O₅/ha, conforme especificado na Tabela 2. No primeiro ano foram aplicados também a lança 90 kg de K₂O/ha na forma de sulfato de potássio, e micronutrientes na forma de FTE-BR 12 (60 kg/ha). Anualmente, antes do plantio, foram realizadas adubações de manutenção com 80 kg de K₂O/ha (cloreto de potássio) e 30 kg de S/ha (sulfato de cálcio), seguida de aração, gradagem e sulcagem.

Em todos os cultivos fez-se inoculação das sementes com inoculante específico na dose de 1 kg/40 kg de sementes. Os plantios foram efetuados anualmente em novembro, sendo o espaçamento de

0,5 m entre linhas, e o estande foi calculado em 500.000 plantas/ha.

O experimento principal foi delineado em blocos ao acaso, com três repetições, sendo os tratamentos constituídos dos 18 fosfatos (Tabela 1) e de uma testemunha sem aplicação de fósforo. Em área contígua a este experimento principal foi instalada uma curva de resposta a superfosfato triplo (S. triplo), também aplicado apenas no primeiro ano, nas doses de 0, 60, 120, 180, 240 e 480 kg de P₂O₅/ha, em blocos ao acaso com três repetições.

As parcelas do experimento principal foram dimensionadas em 5 x 8 m com uma área útil de 18 m², enquanto as parcelas da curva de resposta mediram 5 x 6 m com 12 m² de área útil. Todos os demais de-

TABELA 2. Produção de soja durante quatro anos e teor de fósforo no solo avaliado após o segundo cultivo em resposta a fontes de fósforo aplicadas a lanço no primeiro cultivo. A eficiência relativa (ER) exprime a equivalência dos fosfatos em relação ao superfosfato triplo.

Fosfatos	P ₂ O ₅ aplicado	Produção de grãos (13% de umidade)				P no solo (2o. ano)		Eficiência relativa (ER)				
		1o. ano	2o. ano	3o. ano	4o. ano	Bray-I	Mehlich-1	1o. ano	2o. ano	3o. ano	4o. ano	Média
		kg/ha				mg/l		%				
FN Patos de Minas	240	397	207	224	243	1,1	11,6	1	4	13	25	11
FN Araxá	240	689	378	315	252	1,1	12,1	5	11	21	26	16
FN Catalão	240	360	158	145	107	1,1	12,7	1	2	5	9	14
FN Tapira	240	396	163	167	153	1,1	12,6	1	3	7	15	6
FN Anitápolis	240	352	179	174	134	1,0	13,1	1	3	8	12	6
Patos AS-50	190	840	310	209	251	1,2	9,8	10	11	14	33	17
Patos AS-150	190	1211	692	411	289	1,7	10,4	25	31	37	39	33
Patos AS-250	190	1643	935	508	378	1,5	7,4	55	45	47	51	49
Araxá AS-350	240	1634	1130	562	483	2,0	9,3	43	46	42	52	46
Catalão AS-350	190	1643	1010	433	351	1,7	5,3	55	50	39	48	48
Tapira AS-350	190	1796	1105	445	322	1,5	5,3	70	56	41	43	52
Anitápolis AS-350	190	1653	910	562	274	1,6	4,9	56	44	53	36	47
Patos AN-120	190	1210	410	208	162	1,2	5,4	25	16	14	20	19
Patos RNC-1	240	2123	1836	987	626	3,2	5,0	88	90	79	68	81
Termo fundido	240	2379	1724	1266	814	2,8	3,5	125	81	103	89	99
Termo calcinado	200	2576	1653	1037	565	2,6	2,9	195	91	99	74	115
S. simples	240	2241	1954	1242	701	2,9	3,0	104	100	100	77	95
S. triplo	240	2258	1836	1297	817	3,6	4,1	107	90	105	89	98
Testenurha (-P)	—	150	104	91	48	0,9	1,2	—	—	—	—	—
Coefficiente de variação (%)		11,5	13,0	21,4	30,4	11,6	22,6					

talhes com relação à instalação, aplicação dos fosfatos e condução, foram idênticas para ambos os experimentos.

A eficiência agrônômica relativa dos fosfatos foi calculada anualmente com base na produção de grãos de soja (13% de umidade), tomando-se como referência as curvas de resposta ao S. triplo. Estas curvas foram ajustadas a funções de resposta, através das quais calculou-se a dose de P₂O₅ aplicada na forma de S. triplo necessária para se obter a mesma produção de grãos atingida com cada fonte avaliada. A eficiência relativa (ER) de cada fosfato foi então calculada, obtendo-se a relação percentual entre as doses de P₂O₅ aplicadas na forma de superfosfato triplo e na forma da fonte em avaliação. Tradicionalmente, este índice (eficiência relativa-ER) tem sido denominado como equivalente em superfosfato triplo (Eq ST); contudo, como a pesquisa foi realizada com apenas uma dose de P₂O₅ de cada fonte, preferiu-se utilizar uma denominação mais restrita.

Em outubro de 1985, após o segundo cultivo, ava-

liou-se, através de 20 subamostras/parcela a disponibilidade de fósforo na camada superficial de 20 cm do solo. A disponibilidade (NH₄F 0,03 N + HCl 0,025 N), segundo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1979), e com estes parâmetros calculou-se também a eficiência relativa dos fosfatos, conforme descrito anteriormente, tomando-se como referência a disponibilidade de fósforo do solo da curva com superfosfato triplo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A solubilidade relativa dos fosfatos em três extratores, bem como o grau de acidulação (relação molar H⁺/P₂O₅), estão apresentados na Tabela 1. Alguns produtos apresentaram solubilidades bastante diferenciadas entre os extratores, como os fosfatos naturais e termo-fosfatos, praticamente insolúveis em água e mais solúveis em ácido cítrico, do que em ci-

trato neutro de amônio + água (CNA + Água). Estas observações concordam com Alcarde & Ponchio (1980).

Além destes fosfatos, os produtos resultantes de baixo grau de acidulação (Patos AS-50, AS-150 e AN-120) apresentaram maior solubilidade em ácido cítrico do que em citrato neutro de amônio + água, o que pode ser atribuído ao menor pH da solução de ácido cítrico, aliado à maior afinidade por cálcio das espécies iônicas complexantes presentes neste pH (Alcarde & Ponchio 1979). Já para os fosfatos parcialmente solubilizados sob maiores graus de acidulação, as solubilidades foram semelhantes em ambos os extratores.

Pode-se observar, também, na Tabela 1, que a economia de ácido proporcionada pela diminuição do grau de acidulação reduziu proporcionalmente a solubilidade relativa dos fosfatos nos três extratores. Uma regressão linear envolvendo a solubilidade relativa em CNA + água (y) em função da relação molar H^+/P_2O_5 (x), agrupando-se todos os fosfatos naturais e parcialmente solubilizados, resultou na seguinte equação: $y = 1,9 + 16,8 x$ ($r^2 =$

0,981^{***}). Aumentos na solubilidade em função do grau de acidulação também foram observados por Barreto (1977), Franco (1977) e Ferreira & Kaminski (1979).

Na Tabela 2 estão apresentadas as produções de grãos obtidas durante os quatro anos, e a eficiência relativa (ER) dos fosfatos calculada a partir das curvas de resposta a superfosfato triplo (Fig. 1), utilizando como fonte de referência (100%). O decréscimo na produção de grãos observado durante os anos é devido basicamente à perda de efeito dos fosfatos em função do tempo, já que foram aplicados apenas no primeiro ano. O coeficiente de variação relativamente elevado, verificado no último cultivo (30,4%), deveu-se principalmente à incidência de nematóides no experimento.

Dada a sua reduzida solubilidade (Tabela 1), a ER dos fosfatos naturais foi bastante baixa (Tabela 2), confirmando trabalhos realizados anteriormente com culturas anuais (Körndorfer 1978, Goedert & Lobato 1980, Oliveira et al. 1984). A origem dos fosfatos teve pouco efeito sobre as respectivas ER, que

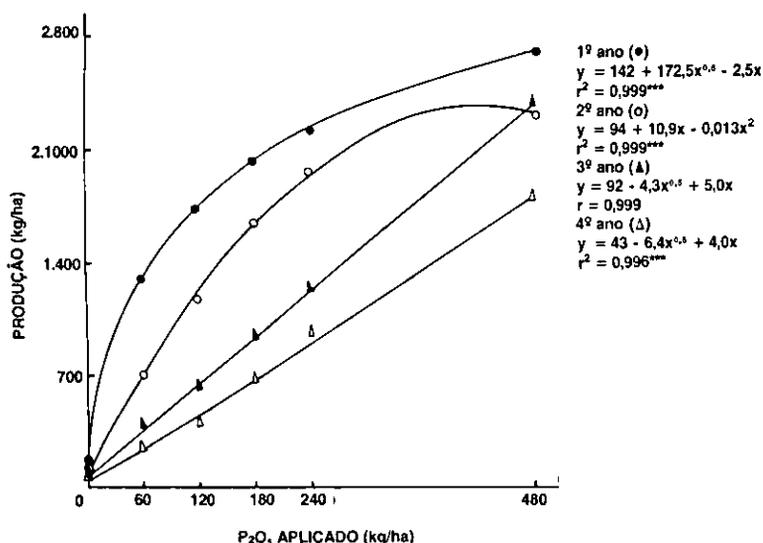


FIG. 1. Produção de grãos de soja durante quatro anos em resposta a fósforo aplicado apenas no primeiro ano na forma de superfosfato triplo.

na média dos quatro anos foi de apenas 11%. Embora tenha ocorrido um pequeno aumento na ER destes materiais em função do tempo, em termos de produção absoluta os resultados do último ano ainda mostraram que com superfosfato triplo obteve-se uma produção de grãos em média 4,6 vezes superior à obtida com os fosfatos naturais.

É provável que o comportamento destes fosfatos fosse superior sob condições de maior acidez do solo, conforme observado por Goedert & Lobato (1980) neste mesmo tipo de solo com a cultura da soja. O pH em água médio de todas as parcelas durante os quatro anos foi de 5,8, que é uma situação próxima à ideal para o desenvolvimento da maioria das culturas anuais. Em experimentos de longa duração realizados neste mesmo tipo de solo e em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, com gramíneas forrageiras tolerantes à acidez, têm-se obtido bons resultados com vários fosfatos naturais brasileiros (Goedert & Lobato 1984, Sanzonowicz et al. 1987, Sousa et al. 1987).

Do mesmo modo que se verificou com a solubilidade, a acidulação aumentou acentuadamente a eficiência agrônômica dos fosfatos (Tabela 2). Este aumento também foi diretamente proporcional ao grau de acidulação, expresso pela relação molar H^+/P_2O_5 (Tabela 1). O agrupamento dos fosfatos naturais e parcialmente solubilizados (14 produtos) resultou na seguinte equação de regressão linear envolvendo a ER média dos quatro anos (y) e a relação molar H^+/P_2O_5 (x): $y = 8,6 + 14,6 x$ ($r^2 = 0,974^{***}$). Relações diretas entre grau de acidulação e eficiência agrônômica de fosfatos também foram observadas em ensaios preliminares em casa de vegetação (Barreto 1977, Franco 1977, Ferreira & Kaminski 1979, Goedert & Sousa 1986).

De uma maneira geral, a ER dos fosfatos parcialmente solubilizados variou pouco em função dos anos (Tabela 2). Analisando-se os produtos com solubilidade em ácido cítrico ou CNA + água próximas a 50% (Patos AS-250, Araxá AS-350, Catalão AS-350, Tapira AS-350 e Anitápolis AS-350), e resultantes de

semelhantes graus de acidulação, verificou-se que a ER média durante os quatro anos foi de, respectivamente, 56, 48, 44 e 46%. A ausência de melhoria na eficiência agrônômica com o tempo, aliada à proporcionalidade entre o grau de acidulação e a ER, mostraram que a acidulação parcial não foi vantajosa como medida de economia de ácido sulfúrico, já que apenas a fração do P_2O_5 total solubilizada pelo ácido foi aproveitada pela soja.

Com exceção do superfosfato simples, que foi praticamente equivalente ao superfosfato triplo como fonte de fósforo, os termofosfatos e o RNC-I também apresentaram elevada eficiência agrônômica (Tabela 2). O RNC-I, cujo acidulante é constituído de uma mistura de ácido sulfúrico e sulfato de amônio (Tabela 1), é uma tecnologia que vem sendo desenvolvida para o aproveitamento do concentrado fosfático de Patos de Minas (Albuquerque & Costa 1986), problemático no que concerne ao elevado teor de impurezas.

No primeiro ano, a ER dos termofosfatos, também produzidos a partir do concentrado fosfático de Patos de Minas, foi superior à do superfosfato triplo, tendo sido o mesmo observado em vários trabalhos conforme revisão de Goedert et al. (1986). Estes resultados têm sido atribuídos aos efeitos nutricional e corretivo dos silicatos de cálcio e magnésio presentes nestes materiais, sendo que neste caso a ER não estaria refletindo apenas a disponibilidade de fósforo destes produtos. O fato de as produções obtidas com os termofosfatos no primeiro ano estarem próximas da produção máxima (Fig. 1) também prejudicou a avaliação destes materiais, já que nestas condições pequenos acréscimos em termos de produção absoluta resultam em grandes incrementos na ER. O mesmo não ocorreu nos anos subsequentes, e a ER destes produtos foi semelhante à dos superfosfatos (Tabela 2). Estes resultados confirmam o potencial do tratamento térmico para a produção de fertilizantes fosfatados, mesmo a partir de concentrados fosfáticos de baixa qualidade, como o de Patos de Minas.

Com exceção do termofosfato fundido, Pa-

tos AN-120 e superfosfato simples, os demais fertilizantes avaliados neste trabalho haviam sido testados preliminarmente na forma de pó em casa de vegetação, utilizando-se o milho como planta teste num Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (Goedert & Sousa 1986). A ER média obtida durante estes quatro anos no experimento de campo (y) foi numericamente próxima ao índice de eficiência agronômica verificado no primeiro cultivo em casa de vegetação (x), conforme mostra a equação de regressão: $y = 5,6 + 0,91x$ ($r^2 = 0,916$). Este resultado evidencia a validade deste tipo de ensaio em casa de vegetação, que apesar das diferenças com relação a espaço de tempo, ambiente e espécie, refletiu bem o comportamento dos produtos no campo. Boa concordância entre resultados de testes de fosfatos em casa de vegetação e campo também foi obtido por Hausenbuiller & Weaver (1960).

Do mesmo modo que observado no ensaio em casa de vegetação (Goedert & Sousa 1986), a ER dos fosfatos testados no campo mostrou uma estreita relação com a solubilidade relativa em água, ácido cítrico ou citrato neutro de amônio + água (Tabela 3). De uma

maneira geral estes extratores predisseram com boa precisão a disponibilidade biológica de fósforo destes produtos, principalmente com relação aos fosfatos parcialmente acidulados, cujas ER foram numericamente próximas às respectivas solubilidades em CNA + água ou ácido cítrico. (Tabelas 1 e 2).

Na Fig. 2 estão apresentados os teores de fósforo extraível do solo por dois métodos, em função das doses de P_2O_5 aplicado na forma de S. triplo. Tomando-se como referência estas equações de regressão, calculou-se a ER dos fosfatos a partir dos teores de fósforo extraível do solo após o segundo cultivo (Tabela 2), estando estes resultados plotados na Fig. 3. Verificou-se uma relação direta entre a ER calculada com a produção de grãos e a ER calculada com Bray-I (NH_4 0,03N + HCl 0,025N), mostrando que, independentemente do fosfato, este extrator avaliou corretamente a disponibilidade de fósforo do solo (Fig. 3), e de um modo geral esse procedimento analítico pode ser utilizado para quantificar a eficiência agronômica dos fosfatos. Já com o extrator Mehlich-1 (H_2SO_4 0,25N + HCl 0,05N), que é usado rotineiramente em várias regiões do

TABELA 3. Equações de regressão linear envolvendo a eficiência relativa (y) e as respectivas solubilidades relativas (x) dos fosfatos em água e em soluções de ácido cítrico e citrato neutro de amônio + água. A solubilidade relativa se refere a percentagem de P_2O_5 solúvel em relação ao P_2O_5 total.

Solução extratora	Eficiência relativa (y)				
	1o. ano ⁽¹⁾	2o. ano	3o. ano	4o. ano	Média
Citrato neutro de amônio + água	$y = -4,9 + 1,44x$ $r^2 = 0,764$	$y = 0,2 + 1,06x$ $r^2 = 0,971$	$y = 3,5 + 1,04x$ $r^2 = 0,884$	$y = 14,9 + 0,73x$ $r^2 = 0,856$	$y = 4,7 + 1,04x$ $r^2 = 0,900$
Ácido cítrico	$y = -30,3 + 1,80x$ $r^2 = 0,889$	$y = -13,6 + 1,21x$ $r^2 = 0,944$	$y = -11,5 + 1,23x$ $r^2 = 0,919$	$y = 4,4 + 0,86x$ $r^2 = 0,889$	$y = -11,0 + 1,25x$ $r^2 = 0,955$
Água ⁽¹⁾	$y = 7,2 + 1,34x$ $r^2 = 0,948$	$y = 8,1 + 1,19x$ $r^2 = 0,946$	$y = 10,8 + 1,14x$ $r^2 = 0,941$	$y = 20,0 + 0,81x$ $r^2 = 0,903$	$y = 12,6 + 1,10x$ $r^2 = 0,970$

(1) Excluiu-se o Termo fundido e o Termo calcinado.

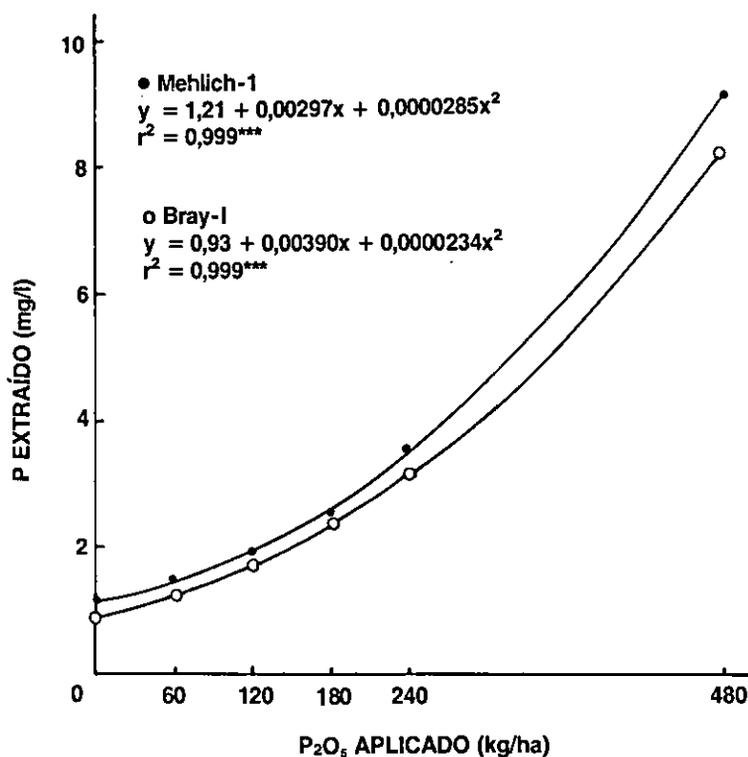


FIG. 2. Fósforo disponível no solo após o segundo cultivo, avaliado por dois extratores, em resposta a doses de P₂O₅ aplicado no primeiro ano na forma de superfosfato triplo.

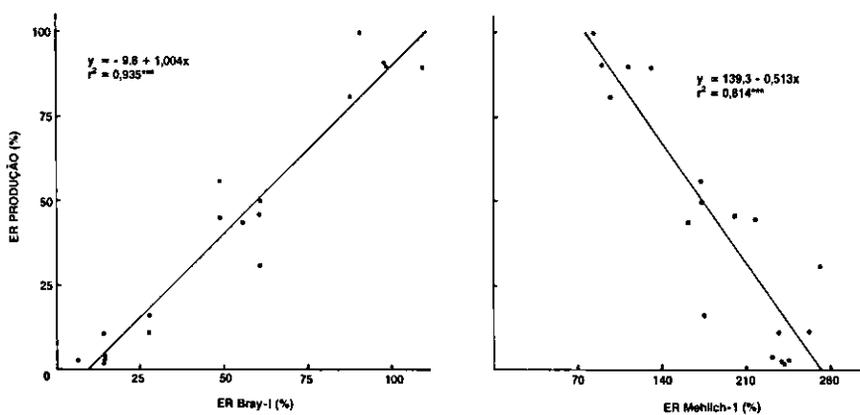


FIG. 3. Relações entre a eficiência relativa (ER) dos fosfatos calculada através da produção de grãos do segundo cultivo e ER calculada através do teor de fósforo no solo, avaliado por dois extratores após o segundo cultivo.

Brasil, esta relação foi inversa, o que pode ser atribuído à sua elevada acidez e conseqüente ação dissolutiva sobre a apatita, conforme observado em alguns experimentos com fosfatos naturais (Korndörfer 1978, Goedert & Lobato, 1980). Assim, os teores de fósforo extraível por Mehlich-1 foram diretamente proporcionais à fração de fósforo apatítica dos fertilizantes, que, por sua vez, se correlacionou negativamente com a eficiência agronômica.

Estes resultados mostraram que o extrator Mehlich-1 é inadequado para avaliar a disponibilidade de fósforo de solos que receberam fosfatos naturais ou parcialmente acidulados, e que não seria viável um trabalho de calibração independente para estes produtos, já que os valores de fósforo extraível dependem da relação fósforo apatítico/fósforo solúvel, que varia em função do grau de acidulação, e também pode variar com o tempo, dependendo das condições de solo que favoreçam a sua dissolução. Além do extrator Bray-I, bons resultados também seriam esperados com extratores alcalinos ou resina trocadora de íons, que não apresentam ação dissolutiva sobre a apatita.

CONCLUSÕES

1. Independentemente da origem da rocha, os fosfatos naturais apresentaram eficiência agronômica muito baixa, melhorando pouco com o tempo.

2. A solubilidade e eficiência dos fosfatos parcialmente acidulados foi diretamente proporcional à taxa de acidulação (relação molar H^+/P_2O_5), independentemente do concentrado fosfático de origem. De uma maneira geral, a eficiência destes produtos foi equivalente às respectivas solubilidades em citrato neutro de amônio + água ou ácido cítrico, praticamente não se verificando melhoria com o tempo. Assim, a acidulação parcial não foi vantajosa como medida de economia de ácido, pois apenas a fração fosfatada solubilizada foi aproveitada pela soja.

3. Os termofosfatos apresentaram eficiência

semelhante à dos superfosfatos, na média dos quatro cultivos, apesar de terem sido produzidos a partir de concentrado fosfático de baixa qualidade (Patos de Minas):

4. O extrator Bray-I mostrou-se útil na avaliação da eficiência agronômica, pois permitiu quantificar corretamente a disponibilidade biológica de fósforo no solo, independentemente do fosfato. O mesmo não ocorreu com o extrator Mehlich-1, que superestimou a disponibilidade de fósforo dos tratamentos com fosfatos naturais ou parcialmente acidulados.

AGRADECIMENTOS

Aos técnicos da Petrobrás Fertilizantes S.A. (Petrofértil), pela produção dos fertilizantes e assessoria; ao técnico agrícola Joviano Mateus Pires Filho, pela participação na condução do experimento; e às funcionárias Fada Cavalcanti e Vânia de Cássia Arantes Hugo, pelo apoio secretarial.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P.C.W. de & COSTA, F.G.M. Rotas tecnológicas não tradicionais para solubilização de fosfatos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 3. Brasília, DF, 1986. *Anais...* São Paulo, IBRAFOS, 1986. p.339-61.
- ALCARDE, J.C. & PONCHIO, C.O. A ação solubilizante das soluções de citrato neutro de amônio e de ácido cítrico sobre fertilizantes fosfatados. *R. bras. Ci. Solo*, 3:173-78, 1979.
- ALCARDE, J.C., & PONCHIO, C.O. Caracterização das solubilidades das rochas fosfatadas brasileiras e termofosfatos em diferentes extratores químicos. *R. bras. Ci. Solo*, 4:196-200, 1980.
- BARRETO, A.C. Efeitos da acidulação parcial, de misturas com superfosfatos triplo e enxofre e da granulação na eficiência de fosfatos naturais. Porto Alegre, UFRGS, 1977. 63p. Tese Mestrado.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. *Análise de corretivos fertilizantes e inoculantes - Métodos oficiais*. Brasília, Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, 1983. 104p.

- CARMO, A.J.B. do. Fertilizantes e matérias-primas: preços, produção e consumo de 1980 e 1985. **Fertilizantes**, 8(2):1-5, 1986.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, RJ. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979.
- FERREIRA, T.N. & KAMINSKI, J. Eficiência agrônômica dos fosfatos naturais de Patos de Minas e Gafsa, puros e modificados por acidulação e calcinação. **R. bras. Ci. Solo**, 3:158-62, 1979.
- FRANCO, M. Fosfatos parcialmente acidulados com H_3PO_4 , HCl e H_2SO_4 na cultura do sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench) em solo de cerrado de Ituiutaba, MG. Viçosa, UFV, 1977. 75p. Tese Mestrado.
- GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Avaliação agrônômica de fosfatos em solo de cerrado. **R. bras. Ci. Solo**, 8:97-102, 1984.
- GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Eficiência agrônômica de fosfatos em solo de cerrado. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, 15(3):311-18, 1980.
- GOEDERT, W.J. & SOUSA, D.M.G. de. Avaliação preliminar da eficiência de fosfatos com acidulação parcial. **R. bras. Ci. Solo**, 10:75-80, 1986.
- GOEDERT, W.J.; REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. de. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados não tradicionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 3. Brasília, DF, 1986. **Anais...** São Paulo, IBRAFOS, 1986. p.415-29.
- HAUSENBULLER, R.L. & WEAVER, W.H. A comparison between greenhouse and field procedures in phosphate-fertilizer testing. **Soil Sci.**, 89:298-301, 1960.
- KORNDÖRFER, G.H. **Capacidade de fosfatos naturais e artificiais fornecerem fósforo para plantas de trigo**. Porto Alegre, UFRGS, 1978. 62p. Tese Mestrado.
- LOBO, M.G. Evolução e perspectivas da indústria nacional de fosfatos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 3. Brasília, DF, 1986. **Anais...** São Paulo, IBRAFOS, 1986. p.77-94.
- LOBO, M.G. & SILVA, R.M. Produção de fertilizantes fosfatados, In: ESPINOZA, W. & OLIVEIRA, A.J. de, ed. **Anais do simpósio sobre fertilizantes na agricultura brasileira**. Brasília, EMBRAPA-DEP, 1984. 73-102.
- OLIVEIRA, E.L. de; MUZILLI, O.; IGUE, K.; TORNERO, M.T.T. Avaliação da eficiência agrônômica de fosfatos naturais. **R. bras. Ci. Solo**, 8:63-7, 1984.
- RIEDER, J.H. Destinação racional dos jazimentos fosfáticos nacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 3. Brasília, DF, 1986. **Anais...** São Paulo IBRAFOS, 1986. p.139-72.
- SANZONOWICZ, C.; LOBATO, E.; GOEDERT, W.J. Efeito residual da calagem e de fontes de fósforo numa pastagem estabelecida em solo de cerrado. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, 22(3):233-43, 1987.
- SIQUEIRA, O.J.F. de; PERUZZO, G.; BEN, J.R. **Avaliação da eficiência agrônômica de diversas fontes de fósforo nacionais parcialmente solúveis - Trigo, 1984**. In: Reunião Nacional de Pesquisa de Trigo, 14. Londrina, PR. **Resultados de Pesquisa do Centro Nacional de Pesquisa de Trigo**. 1986. p.229-32.
- SOUSA, D.M.G. de; SANZONOWICZ, C.; MIRANDA, J.C.C. de; SMYTH, T.J. Manejo de fósforo na cultura da soja e braquiária em Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) de cerrado. **Relatório Técnico Anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1982/1985**. Planaltina, DF, 1987. p.115-20.