

DIVISÃO 3 - USO E MANEJO DO SOLO

Comissão 3.1 - Fertilidade do solo e nutrição de plantas

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FOSFATOS DE ROCHA EM SOLO COM ELEVADO TEOR DE CÁLCIO TROCÁVEL⁽¹⁾

Richard Matos de Souza⁽²⁾, Lafayette Franco Sobral⁽³⁾, Pedro Roberto Almeida Viégas⁽⁴⁾, Adilson de Oliveira Junior⁽⁵⁾ & Maria da Conceição Santana Carvalho⁽⁶⁾

RESUMO

No Brasil, a maioria dos trabalhos sobre a aplicação de fosfatos de rocha foi realizada em solos do Cerrado com pH menor que 5,5 e baixos teores de Ca trocável. Estudos em condições diferentes dessa, além de raros, têm sido desestimulados, pois esses solos podem apresentar-se restritivos à dissolução dessas fontes, a depender da espécie cultivada e da natureza geológica do fosfato aplicado. Um experimento para estudar a eficiência agronômica dos fosfatos de Bayóvar e Itafós, aplicados por meio da adubação corretiva, foi implantado em um Cambissolo Háptico Ta eutrófico vertissólico de elevado teor de Ca trocável e pH 6. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas em faixas e quatro repetições. As parcelas consistiam de três tratamentos de fosfatagem, na dose de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com o Fosfato Natural Reativo de Bayóvar, o Fosfato de Rocha Itafós e o superfosfato triplo (fonte de referência), além de um tratamento-padrão sem correção de P. As subparcelas correspondiam aos três níveis de adubação de manutenção (0, 60 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅) aplicados anualmente no sulco de semeadura, utilizando superfosfato triplo. Cultivou-se milho nos dois anos em que o experimento foi conduzido (2011 e 2012). No período avaliado, a produtividade de grãos e o teor de P foliar do milho indicaram menores necessidades de reposição de P, por meio das doses de manutenção, conforme maior era a solubilidade da fonte corretiva aplicada. Tanto Mehlich-1 quanto a Resina de Troca Iônica Mista removeram mais P dos tratamentos em que foram aplicados fosfatos de rocha em relação ao tratamento onde foi aplicado o superfosfato triplo via adubação corretiva. Quando aplicados de maneira isolada (dose 0 de manutenção), os índices de eficiência agronômica dos fosfatos de rocha foram de 72,08 e 82,31% para o Bayóvar e de 43,85 e 47,47% para o Itafós nos anos de

⁽¹⁾ Trabalho extraído da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, financiado pela Rede FertBrasil/Embrapa. Recebido para publicação em 3 de setembro de 2013 e aprovado em 30 de julho de 2014.

⁽²⁾ Engenheiro Agrônomo, Mestre em Agroecossistemas, Técnico Administrativo de Nível Superior, Universidade Federal de Sergipe - UFS. Av. Marechal Cândido Rondon, s/n. CEP 49100-000 São Cristóvão (SE). E-mail: rmatos.agronomo@gmail.com

⁽³⁾ Pesquisador, Embrapa Tabuleiros Costeiros. Av. Beira Mar, 3250. CEP 49025-040 Aracaju (SE). E-mail: lafayette.sobral@embrapa.br

⁽⁴⁾ Professor, Departamento de Engenharia Agronômica, UFS. E-mail: pviegas@ufs.br

⁽⁵⁾ Pesquisador, Embrapa Soja. Caixa Postal 231. CEP 86001-970 Londrina (PR). E-mail: adilson.oliveira@embrapa.br

⁽⁶⁾ Pesquisadora, Embrapa Arroz e Feijão. Rod. GO-462, km 12, Zona Rural. Caixa Postal 179. CEP 75375-000 Santo Antônio de Goiás (GO). E-mail: maria.carvalho@embrapa.br

2011 e 2012, respectivamente. No período avaliado, os tratamentos de maior economicidade foram a fosfatagem com o superfosfato triplo nas doses de manutenção de 0 e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e a com o fosfato reativo de Bayóvar, nas doses de 60 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Termos de indexação: fertilizantes fosfatados, adubação fosfatada, milho.

SUMMARY: AGRONOMIC EFFICIENCY OF ROCK PHOSPHATES IN A SOIL WITH HIGH EXCHANGEABLE CALCIUM CONTENT

The vast majority of studies done on direct application of rock phosphates in Brazil have been performed in soils with pH less than 5.5 and low exchangeable Ca content. Studies under soil conditions different from these are not only rare, but have not been carried out because these soils may be restrictive to dissolution of these sources, depending on the species grown and the geological nature of the phosphate applied. A completely randomized block split-plot experimental design was set up, with plots subdivided into strips, and four replications, in order to study the agronomic effectiveness of Bayóvar reactive rock phosphate and Itafós rock phosphate in a Cambissolo Háplico Ta eutrófico vertissólico (Inceptisol) with pH 6.0 and high Ca content. The two rock phosphates and the reference source, triple superphosphate (TSP), were broadcast at the rate of 200 kg of P₂O₅ ha⁻¹ in the main plots and incorporated by disk plowing. A main plot without amendment of P was also included in the study. In the subplots, P was applied as maintenance fertilization at annual rates of 0, 60, and 120 kg of P₂O₅ ha⁻¹ through TSP in the plant rows. Maize was grown in the rainy seasons of 2011 and 2012. Maize yield and P leaf content indicated less need for maintenance application of P in the Bayóvar plots. The Mehlich-1 and mixed ion exchange resin method removed more soil P from rock phosphate plots than from the plot that received TSP. When applied alone, without maintenance applications, agronomic efficiency was 72.08 and 82.31 % for Bayóvar, and 43.85 and 47.47 % for Itafós in 2011 and 2012, respectively. The most profitable treatments were TSP alone and at the annual P maintenance application rate of 60 kg ha⁻¹ of P₂O₅; and Bayóvar with annual P application at rates of 60 and 120 kg ha⁻¹ of P₂O₅.

Index terms: phosphate fertilizers, phosphate fertilization, maize.

INTRODUÇÃO

A utilização de fontes fosfatadas alternativas de baixo custo e elevado poder residual é fundamental para tornar a adubação corretiva viável, especialmente para os produtores mais descapitalizados. Nesse sentido, os fosfatos de rocha tendem a apresentar menor custo em razão do seu beneficiamento mais simplificado em relação às fontes totalmente aciduladas (Melamed et al., 2009), podendo disponibilizar o P de maneira mais gradual no solo, reduzindo a intensidade de perdas desse elemento pelas reações de indisponibilização (Novais & Smyth, 1999; Resende et al., 2006a).

A aplicação de fosfatos de rocha como fonte de P não vem sendo muito estudada e estimulada em solos com elevados teores de Ca e pH maior que 5,5. A maior concentração de Ca²⁺ e o baixo suprimento de prótons em solução tendem a promover um desequilíbrio na reação de dissolução dessas fontes, reduzindo a intensidade de liberação de P para o solo (Chien & Menon, 1995; Rajan et al., 2004).

Entretanto, a eficiência da utilização dos fosfatos de rocha em culturas agrícolas não é só determinada pelas propriedades químicas do solo, sendo

influenciada também pela espécie cultivada, pelas propriedades intrínsecas dos fosfatos naturais, pelas práticas de manejo adotadas e pelo clima (Chien et al., 2009). No caso das espécies cultivadas, a maior absorção de Ca e a excreção de prótons e ácidos orgânicos são mecanismos relatados por favorecer a dissolução de fosfatos naturais nos solos (Bolan et al., 1997; Novais & Smyth, 1999; Arcand & Schneider, 2006). Fatores intrínsecos à natureza geológica de fosfatos naturais também podem influenciar a resposta das culturas e, provavelmente, o suprimento de P em condições de solo mais adversas à sua solubilização no solo. De modo geral, os fosfatos naturais de origem sedimentar são mais reativos e adequados para aplicação direta no solo que as fontes de origem ígnea, pois se apresentam menos cristalinos, mais porosos e hidrolisáveis (Kaminski & Peruzzo, 1997; Rajan et al., 2004).

Os Cambissolos que ocorrem no nordeste da Bahia e no semiárido sergipano estão inseridos em áreas em que a cultura do milho vem se expandido e conseguindo médias de produtividade bem superiores à regional (Gomes et al., 2007). Apesar das boas propriedades físicas e químicas desses solos, a baixa disponibilidade de P tem demandado elevadas aplicações desse nutriente todos os anos, as quais vêm sendo realizadas

totalmente por meio de fertilizantes solúveis no sulco de plantio. Sendo assim, a adubação corretiva com fosfatos naturais poderia servir para aumentar o *status* de disponibilidade de P no solo e reduzir as doses que vêm sendo aplicadas anualmente por essas fontes.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência agrônômica dos fosfatos naturais de origem sedimentar Bayóvar e Itafós, aplicados via adubação de correção, em um Cambissolo com elevado teor de Ca e pH 6,0.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em 2011 e 2012 no Campo Experimental Pedro Arle, pertencente à Embrapa Tabuleiros Costeiros, localizado no município de Frei Paulo, SE. A área experimental possui solo classificado como Cambissolo Háplico Ta eutrófico vertissólico (Embrapa, 2006) e clima do tipo 'As', de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 24 °C. A precipitação pluvial ocorrida durante os dois períodos de condução do experimento é apresentada na figura 1.

O solo em que o experimento foi conduzido apresenta classificação textural franco argilosa, com 22,62 dag kg⁻¹ de areia, 42,06 dag kg⁻¹ de silte e 35,32 dag kg⁻¹ de argila, na profundidade de 0-20 cm. A descrição de alguns atributos químicos do solo encontra-se no quadro 1.

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas em faixas e quatro repetições. As parcelas consistiam dos tratamentos de adubações corretivas com as fontes Fosfato Natural Reativo de Bayóvar (FNR Bayóvar), Fosfato de Rocha Itafós (FR Itafós) e superfosfato triplo (SFT, fonte-padrão), na dose de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅, e de um

tratamento testemunha sem correção de P. A dose corretiva de P foi estimada com base no teor de argila do solo visando ultrapassar o potencial de fixação desse nutriente. O fosfato reativo de Bayóvar-Sechura é oriundo do oeste do deserto de Sechura, costa norte do Peru, possui origem sedimentar (sedimentos marinhos) e, pelo menos, 30 % da concentração total de fosfato solúvel em ácido cítrico a 2 % (Bech et al., 2010). O fosfato Itafós, chamado também de fosfato de Arraias, é extraído de fosforitas da Formação Sete Lagoas, porção basal do Grupo Bambuí, região de Campos Belos, GO, e Arraias, TO (Monteiro, 2009).

Nas subparcelas, foram aplicados, anualmente no sulco de semeadura, três níveis de adubação de manutenção, por meio de SFT, nas doses de 0, 60 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅. As doses de manutenção foram estimadas com base nas recomendações da cultura para o Estado de Sergipe (Sobral et al., 2007). As doses de fertilizantes foram calculadas levando-se em conta os teores totais em P₂O₅ das fontes (Quadro 2).

As parcelas possuíam dimensões de 16 × 7 m e as subparcelas de 4 × 7 m, distanciadas em 2 m entre si. Cada subparcela foi composta por cinco linhas de plantas, com espaçamento de 0,8 m, adotando-se a população de 62.500 plantas ha⁻¹ (equivalente a cinco plantas por metro linear). As áreas úteis das subparcelas possuíam 12 m² (5 × 2,40 m) e eram compostas pelas três linhas centrais, eliminando-se 1 m em cada extremidade. Somente no primeiro ano de cultivo houve preparo do solo por meio de aração e gradagem. No segundo ano, o experimento foi conduzido sob semeadura direta para possibilitar a adequada avaliação do efeito residual das fontes corretivas aplicadas no primeiro ano.

O milho foi cultivado em sequeiro e as fontes corretivas foram aplicadas a lanço e incorporadas ao solo, por meio de grade niveladora, sendo essa incorporação realizada 27 dias antes da semeadura do primeiro ano. Em 16/05/2011, o milho híbrido 2B707

Quadro 1. Caracterização química do solo da área experimental (profundidade 0-20 cm)

pH(H ₂ O)	Matéria orgânica	P-Mehlich-1	P rem	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H+Al	Al ³⁺	CTC	V
	g dm ⁻³	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³							%
6,0	17,2	<1,39	34,4	13,5	1,7	0,32	0,30	2,03	0,09	17,8	88,8

Quadro 2. Características químicas das fontes fosfatadas utilizadas no trabalho

Fonte	Teor de P ₂ O ₅	
	Total	Solúvel em ácido cítrico a 2 % ⁽¹⁾
	dag kg ⁻¹	
Superfosfato Triplo	45,00	— ⁽²⁾
Fosfato Natural Reativo de Bayóvar	29,28	13,27
Fosfato Natural de Itafós	17,47	5,45

⁽¹⁾ Determinado na proporção de 1:100. ⁽²⁾ Não determinado.

- *Dow AgroSciences*, foi semeado na área. No segundo ano de cultivo, foi aplicado o herbicida dessecante glifosato; em seguida, houve a reabertura dos sulcos nas subparcelas. A semeadura do milho, nesse ano, ocorreu em 19/06/2012, utilizando-se sementes do híbrido 2B587 - *Dow AgroSciences*.

Nos dois anos em que o milho foi cultivado, foram aplicados 200 kg ha⁻¹ de N (70 kg ha⁻¹ de N aplicados na semeadura + 130 kg ha⁻¹ de N aplicados em cobertura no estágio V4) sob a forma de ureia. De acordo com a análise química do solo (Quadro 1), não foram necessárias aplicações de K₂O. No primeiro ano, a cultura foi pulverizada com deltametrina para o controle da lagarta do cartucho. No segundo, o híbrido de milho cultivado possuía as tecnologias RR e Bt, facilitando o manejo tanto de plantas daninhas quanto de insetos-praga.

Na figura 1, têm-se as precipitações pluviárias diárias e acumuladas nas duas safras de milho avaliadas. Em 2011, tanto o volume quanto a distribuição de chuvas durante o ciclo da cultura foram coerentes com o que vem sendo observado para a região nesse período do ano. Em 2012, em razão da ocorrência de forte estiagem, as chuvas foram menos frequentes e em menor volume, reduzindo significativamente a produtividade média do experimento.

Para avaliar o *status* nutricional da cultura com relação ao P, amostras de folhas foram coletadas por volta de 70 dias após a semeadura (DAS), quando a maior parte das plantas estava no estágio do florescimento feminino. Foi amostrada a folha inteira, oposta e abaixo da primeira espiga, sem a nervura central da parte amostrada (Coelho & França, 1995). As amostras foram secas, moídas e submetidas à digestão com a mistura de ácidos nítrico e perclórico na proporção de 3:1. A determinação do teor de P no digerido seguiu o método da espectrofotometria com amarelo-de-vanadato, descrito em Silva (2009).

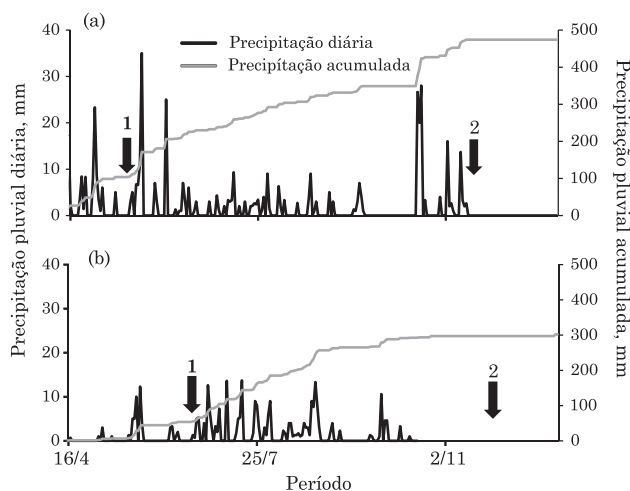


Figura 1. Precipitação pluviária diária e acumulada durante o cultivo de milho em 2011 (a) e em 2012 (b). Setas indicam época de plantio (1) e colheita (2).

Nos dois anos em que o experimento foi conduzido, amostras compostas de solo (profundidade de 0-20 cm) foram coletadas nas entrelinhas da cultura. Posteriormente, essas amostras foram submetidas à análise de P pelos extratores de Mehlich-1 (Silva, 2009) e pela Resina Trocadora de Ions (Raij et al., 2001).

A colheita do experimento ocorreu quando os grãos estavam com umidade por volta de 13 %, aos 185 e 161 DAS, para o primeiro e segundo anos, respectivamente. Com as produções de grãos obtidas nas parcelas, os valores foram convertidos para kg ha⁻¹ de grãos.

Para isolar o efeito da aplicação de fosfatos naturais na produção da cultura, o Índice de Eficiência Agronômica (IEA) dos fosfatos de rocha (FR) foi calculado com base nas produtividades obtidas no tratamento sem manutenção (dose 0), utilizando a seguinte fórmula:

$$IEA = \left[\frac{(\text{Produtividade com FR na dose de manutenção } 0 - \text{Controle})}{(\text{Produtividade com SFT na dose de manutenção } 0 - \text{Controle})} \right] \times 100$$

O tratamento-controle correspondeu às produtividades obtidas para o tratamento sem fosfatagem corretiva na dose zero de manutenção; SFT, nesse caso, equivale à parcela submetida à correção por meio da fonte-padrão superfosfato triplo.

Ao final do experimento, os dados foram submetidos à análise de variância. Quando constatados efeitos significativos ($p > 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey e submetidas à análise de regressão. No segundo caso, foram ajustados modelos lineares e quadráticos; para esse último, o coeficiente de determinação (R^2) não pode ser calculado em virtude da insuficiência de graus de liberdade para as doses de manutenção. O índice de eficiência agronômica e o teor de P no solo foram comparados entre anos (parcelas subdivididas no tempo). O programa estatístico utilizado foi o Sisvar (Ferreira, 2011).

A rentabilidade das adubações corretivas, de acordo com a fonte, e de manutenção foi calculada a partir do valor da produção média do tratamento, subtraindo-se o valor da produção da testemunha (tratamento sem correção e sem manutenção) e os custos dos fertilizantes utilizados na adubação corretiva e de manutenção. Consideraram-se o preço local do saco de milho de 60 kg, R\$ 30,00, e o preço dos fosfatos de rocha Bayóvar e Itafós, R\$ 427,42/t e R\$ 590,00/t, respectivamente, e do superfosfato triplo, R\$ 1280,00/t. Todos os preços foram considerados para o município de Frei Paulo, SE, inclusive com frete, quando necessário. Os demais custos de produção foram considerados constantes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teor de P na folha do milho

Em quase todos os tratamentos de adubação corretiva, as doses de manutenção aplicadas

anualmente no sulco de plantio proporcionaram respostas lineares e positivas para o teor de P na folha do milho (Figura 2). Respostas positivas e lineares também foram observadas para o tratamento sem correção nos dois anos em que a cultura foi cultivada, apesar de se apresentarem em patamar inferior ao observado para os tratamentos submetidos à fosfatagem.

Não houve efeito significativo da aplicação das doses de manutenção para a correção por meio do SFT no primeiro ano (Figura 2). A elevada liberação de P em curto prazo por essa fonte, em virtude de sua elevada solubilidade, deve ter satisfeito a exigência da cultura, que não foi significativamente influenciada pelas doses de P aplicadas no sulco de plantio. No segundo ano, a resposta linear e positiva observada pareceu estar relacionada ao efeito de concentração de nutriente nos tecidos, causado por um menor desenvolvimento das plantas em razão do déficit hídrico (Figura 1), e ao efeito residual e presente das adubações realizadas na linha.

No primeiro ano, os diferentes tratamentos de correção e o sem correção tenderam a assemelhar estatisticamente com a realização da adubação de manutenção e com o aumento da dose aplicada (Quadro 3). Tal fato aparentou indicar a proximidade a um ponto de satisfação nutricional da cultura, tendo em vista que as condições climáticas nesse período foram favoráveis. No segundo ano, teores de P na folha elevados, especialmente na dose de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, podem estar relacionados ao menor desenvolvimento das plantas nesse período, conforme anteriormente justificado, e ao efeito das adubações realizadas na linha e fosfatagens.

As respostas entre os tratamentos de correção no teor de P na folha do milho, nos dois anos, foram condizentes com o padrão de solubilidade das fontes testadas, onde o melhor desempenho foi constatado para a aplicação do SFT (Quadros 2 e 3). Esse tratamento proporcionou superioridade estatística em relação aos demais, quando não houve aplicação de P

no sulco de plantio, nos dois anos avaliados, e na dose de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no primeiro ano, quando a cultura não foi desfavorecida pela baixa precipitação.

Entre os fosfatos de rocha, o melhor desempenho do fosfato reativo de Bayóvar concorda com sua maior solubilidade de P em ácido cítrico a 2 % (Quadros 2 e 3). A correção com essa fonte proporcionou teores de P na folha estatisticamente superiores ao tratamento sem correção nas três doses de manutenção avaliadas e nos dois anos que o experimento foi conduzido. Para a correção com o Itafós, no entanto, teores significativamente superiores ao tratamento sem correção só foram observados na dose de manutenção de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, em cada ano avaliado. Nas doses de manutenção de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no primeiro ano e de 60 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no segundo, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos corrigidos com o fosfato de Bayóvar e o SFT, que apresentou o melhor desempenho entre os três avaliados. De maneira geral, as medidas de solubilidade de P dos fosfatos naturais, como em ácido cítrico a 2 %, apresentam relações com as respostas das culturas, podendo servir como forma rápida de prever o seu potencial agrônomo e favorecer o manejo dessa fonte (Chien & Menon, 1995; Truong, 2004; Chien et al., 2011).

Produtividade de grãos

Na figura 3, é apresentado o efeito das doses de manutenção, dentro de cada fonte de correção, na produtividade de grãos do milho no primeiro ano. Nesse período, somente a adubação corretiva com o SFT fez com que a cultura não fosse responsiva às doses de manutenção, reforçando o que foi observado para o teor de P na folha (Figura 2, Quadro 3). Em virtude da sua elevada solubilidade, o melhor desempenho em curto prazo do SFT é esperado e verificado em outros trabalhos (Araújo et al., 2003; Corrêa et al., 2005; Resende et al., 2006a; Harger et al., 2007).

Para os tratamentos corrigidos por meio dos fosfatos de rocha, respostas lineares e positivas foram

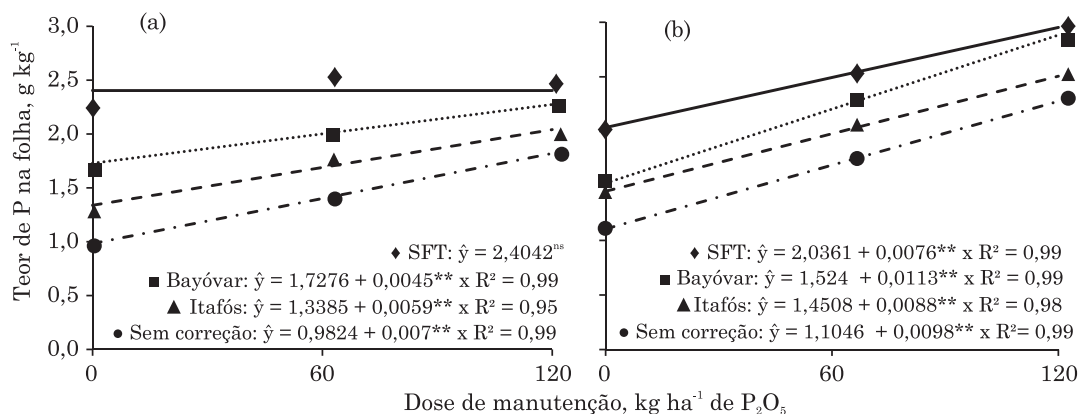


Figura 2. Teor de P nas folhas do milho em função da adubação de manutenção para cada fonte de correção em 2011 (a) e para o seu efeito residual em 2012 (b). ns e **: não significativo e significativo a 1 %, respectivamente.

obtidas com a aplicação das doses de manutenção no primeiro ano (Figura 3). Esse resultado pareceu estar relacionado ao grau de dependência que a cultura tem às doses de P aplicadas no sulco de plantio, em virtude da solubilização mais lenta dos fosfatos de rocha no solo (Novais & Smyth, 1999; Resende et al., 2006a). Entre esses, o melhor desempenho do fosfato reativo de Bayóvar no primeiro ano foi consistente com a maior solubilidade em ácido cítrico dessa fonte (Quadro 2), conforme anteriormente relatado, e com os resultados observados para o teor de P na folha do milho (Figura 2, Quadro 3). Nas doses de manutenção de 0 e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ desse período, a sua aplicação, via adubação corretiva, proporcionou médias de produtividade significativamente superiores a do Itafós, somente se igualando estatisticamente na última dose aplicada, de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Quadro 4). Em soma a isso, o menor coeficiente angular observado indicou a menor influência das doses de manutenção no aumento de produtividade do milho e, conseqüentemente, a menor necessidade de aplicação de P no sulco de plantio nesse tratamento (Figura 3).

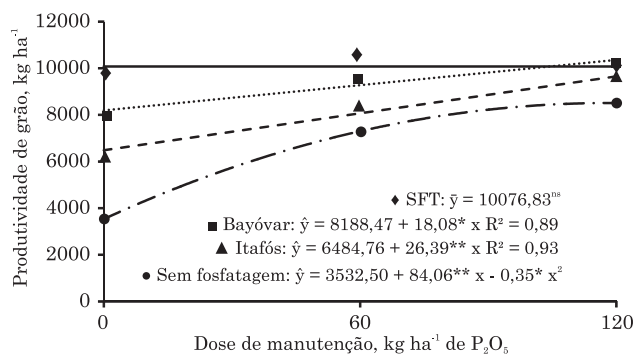


Figura 3. Produtividade de grãos de milho cultivado em um Cambissolo sergipano no primeiro ano em função da adubação fosfatada corretiva e das doses de manutenção. ns, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1 %, respectivamente.

No segundo ano, o menor volume e a menor frequência das chuvas (Figura 1) devem ter sido as principais razões para a redução no teto de produtividade do experimento e para as menores respostas das plantas aos tratamentos (Quadro 4, Figura 4). Nesse período, não foram observados efeitos significativos das doses de manutenção nos tratamentos corrigidos com o SFT e o fosfato reativo de Bayóvar. Para o tratamento corrigido por meio do fosfato de rocha Itafós, a resposta linear e positiva (Figura 4) pareceu estar relacionada com a menor intensidade de liberação de P por essa fonte no solo, fato consistente com a sua menor solubilidade em ácido cítrico 2 % (Quadro 2). Nesse ano, os tratamentos de adubação corretiva somente diferiram estatisticamente do tratamento sem correção quando não houve a aplicação de P no sulco de plantio (Quadro 4).

Índice de eficiência agronômica (IEA) dos fosfatos de rocha Itafós e Bayóvar

Nos dois anos em que o experimento foi avaliado, os maiores IEA foram observados para o fosfato de Bayóvar, com 72,08 % no primeiro ano e 82,31 % no segundo (Figura 5). Para o fosfato de Itafós, esses índices foram de 43,85 e 47,47%, para o primeiro e o segundo anos, respectivamente.

De um ano para o outro, somente foi observado aumento significativo do IEA para o fosfato reativo de Bayóvar, enquanto o fosfato de rocha Itafós manteve-se semelhante. Esse incremento de IEA, entretanto, pareceu estar mais relacionado à baixa precipitação ocorrida no segundo ano, que reduziu o teto de produtividade e promoveu maior similaridade de respostas entre os tratamentos corrigidos por meio do SFT e do fosfato reativo de Bayóvar (Quadro 4). Em outros trabalhos, o aumento da eficiência relativa dos fosfatos de rocha com o passar do tempo está mais relacionado à liberação de P de forma gradual e à maior proteção desse nutriente das reações de fixação no solo comparado às fontes de elevada solubilidade (Novais

Quadro 3. Efeito dos tratamentos de adubação corretiva no teor de P na folha do milho dentro de cada dose de manutenção

Tratamento	2011			2012		
	Doses de manutenção (kg ha ⁻¹)					
	0	60	120	0	60	120
	g kg ⁻¹					
Superfosfato triplo	2,235 a	2,502 a	2,475 a	2,035 a	2,496 a	2,952 a
FNR Bayóvar	1,733 b	1,988 b	2,279 ab	1,508 b	2,235 ab	2,866 a
FN Itafós	1,293 c	1,781 b	1,995 bc	1,413 bc	2,053 b	2,468 b
Sem correção de P	0,973 c	1,420 c	1,810 c	1,108 c	1,684 c	2,279 b
DMS ⁽¹⁾	0,353			0,342		
CV (%) ⁽²⁾	10,04			8,36		

⁽¹⁾ DMS: diferença mínima significativa. ⁽²⁾ CV: coeficiente de variação. Médias acompanhadas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

Quadro 4. Efeito dos tratamentos de adubação corretiva na produtividade de grãos dentro de cada dose de manutenção

Tratamento	2011			2012		
	Doses de manutenção (kg ha ⁻¹)					
	0	60	120	0	60	120
	kg ha ⁻¹					
Superfosfato triplo	9.802 a	10.627 a	9.798 a	7.104 a	6.965 a	7.091 a
FNR Bayóvar	7.978 b	9.693 a	10.148 a	6.385 ab	7.311 a	7.156 a
FN Itafós	6.247 c	8.543 b	9.414 ab	5.535 b	7.175 a	7.087 a
Sem correção de P	3.532 d	7.298 c	8.508 b	3.170 c	7.089 a	7.081 a
DMS ⁽¹⁾		1.100			1.208	
CV (%) ⁽²⁾		5,72			7,17	

⁽¹⁾ DMS: diferença mínima significativa. ⁽²⁾ CV: coeficiente de variação. Médias acompanhadas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

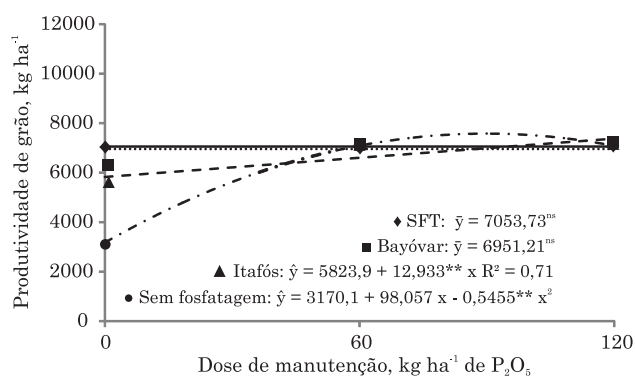


Figura 4. Produtividade de grãos de milho cultivado em um Cambissolo sergipano no segundo ano de cultivo (efeito residual) em função da adubação fosfatada corretiva e das doses de manutenção. ns e **: não significativo e significativo a 1 %, respectivamente.

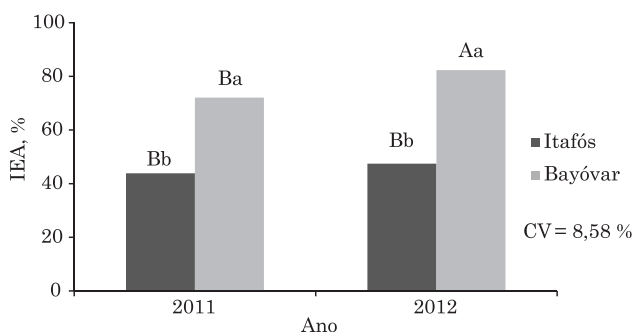


Figura 5. Índice de eficiência agrônoma (IEA) dos fosfatos de rocha Itafós e Bayóvar, aplicados via adubação corretiva, em um Cambissolo cultivado com milho no Estado de Sergipe. Médias seguidas da mesma letra minúscula, para fontes, e maiúscula, para anos, não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5 %.

& Smyth, 1999; Resende et al., 2006b; Costa et al., 2008; Guedes et al., 2009; Ono et al., 2009).

O elevado teor de Ca trocável e a leve acidez do solo (Quadro 1) não impuseram grande restrição à solubilização dos fosfatos de rocha. A origem sedimentar dos fosfatos deve ser uma explicação para isso, pois essas fontes tendem a se apresentar, comumente, mais reativas e hidrolisáveis que as de origem ígnea (Kaminski & Peruzzo, 1997) e, provavelmente, menos influenciadas pelas condições edáficas durante sua dissolução.

Também podem justificar este fato a maior absorção de Ca²⁺ e H₂PO₄⁻, produtos da reação de dissolução dos fosfatos e a acidificação da rizosfera (Chien & Menon, 1995; Bolan et al., 1997; Novais & Smyth, 1999; Arcand & Schneider, 2006). No segundo caso, a acidificação da rizosfera deve ter sido mais incentivada quando o P prontamente disponível das adubações de manutenção não foi aplicado. Liu et al. (2004) observaram que um genótipo de milho tolerante à deficiência de P promoveu maior acidificação da rizosfera e redução do pH da solução de nutrientes quando submetido à ausência desse elemento. Alguns trabalhos, entretanto, têm relatado que a deficiência de P em milho está relacionada à maior exsudação de ácidos orgânicos (Gaume et al., 2001; Li et al., 2008). A maior liberação desses últimos compostos poderia favorecer a solubilização dos fosfatos naturais, não somente pelo suprimento de prótons necessários à reação de dissolução como também pela complexação de Ca liberado por essa (Arcand & Schneider, 2006).

Efeito das fontes corretivas no teor de P disponível do solo pelos extratores Mehlich-1 e Resina

De um ano para o outro, não foi constatado aumento ou redução significativa no teor de P no solo dos tratamentos onde ocorreu a correção desse elemento (Quadro 5). Para ambos os extratores avaliados, os

maiores teores de P no solo foram observados nos tratamentos onde foram aplicados os fosfatos de rocha, em não consonância com a superioridade observada para a aplicação do SFT, via adubação corretiva, na cultura de milho.

Em solos onde foram aplicados fosfatos de rocha, Mehlich-1 normalmente extrai quantidades de P superestimadas (Santos & Kliemann, 2005; Corrêa et al., 2008; Schlindwein et al., 2011). Isso se deve ao caráter ácido desse extrator, que pode dissociar formas de P ligado a Ca dessas fontes, não disponíveis em curto prazo para as plantas (Silva & Rajj, 1999; Novais & Smyth, 1999; Schlindwein et al., 2011).

Para a Resina de Troca Iônica, a maior extração de P do solo nos tratamentos corrigidos por meio dos fosfatos naturais pode ter ocorrido em razão da utilização da mistura de resinas de troca catiônica e aniônica. Dessa forma, a resina de troca catiônica atua como um forte dreno de Ca do solo e das partículas ainda insolúveis dos fosfatos de rocha, causando liberação adicional de P para ser recuperado pela resina de troca aniônica. Estima-se que a resina mista extraia mais que 100 vezes Ca do solo do que as plantas, o que poderia reforçar o fato observado (Freitas et al., 2013).

A menor recuperação do P pela resina, no tratamento onde foi aplicado o SFT, também pode ter sido ocasionada pela sua maior recuperação pelas plantas e conversão para formas menos lábeis de P no solo. Entretanto, os teores de P desse tratamento foram elevados para valores considerados médios para a resina (Rajj et al., 1996) e adequados para Mehlich-1 (Sobral et al., 2007), indicando que os métodos utilizados não foram totalmente discrepantes da realidade do campo nesse caso.

Economicidade dos tratamentos de correção isolados ou associados às doses de manutenção

Em dois anos, a correção com SFT proporcionou elevada economicidade (acima de R\$ 4.500,00 ha⁻¹) para as doses de manutenção de 0 e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Quadro 6). A alta produtividade obtida nesse

tratamento, principalmente no primeiro ano, foi a justificativa para essa elevada relação benefício/custo. No entanto, na dose de manutenção de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a economicidade da fosfatagem com o SFT foi menor (R\$ 3.841,94ha⁻¹), pois houve maior gasto com a quantidade de fertilizante aplicada.

A rentabilidade acumulada dos fosfatos de rocha foi aumentada com a aplicação da fonte solúvel no sulco de plantio (Quadro 6). Entretanto, economicidade acima de R\$ 4.000,00 ha⁻¹ só foi observada com a aplicação das doses de manutenção (60 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅) no tratamento corrigido pelo fosfato reativo de Bayóvar (Quadro 6). No período avaliado, não houve diferenças relevantes quando a aplicação das doses de manutenção no tratamento corrigido por meio do fosfato de Itafós foi comparada à aplicação dessas doses isoladamente (sem correção). A utilização dos fosfatos de Bayóvar e Itafós isoladamente também não proporcionou ganhos econômicos superiores aos tratamentos em que houve somente a aplicação de P anual na linha.

De maneira geral, esses resultados demonstraram que a realização da adubação corretiva proporcionou rendimento econômico significativo, em curto prazo, quando realizado com fontes fosfatadas de elevada solubilidade; neste caso, o SFT. Retornos econômicos satisfatórios para os tratamentos corrigidos com os fosfatos de rocha só foram observados para o Bayóvar (fonte de solubilidade intermediária) associado à aplicação anual de P no sulco pelo SFT. No entanto, ressalta-se que os fosfatos de rocha possuem efeito residual em longo prazo, comparado às fontes de maior solubilidade, e podem apresentar retorno econômico mais espalhado com o passar do tempo. Nesse caso, as fontes de maior solubilidade tendem a liberar, de forma imediata, todo o P contido, favorecendo a maior fixação e exportação desse elemento em curto prazo. As fontes de baixa solubilidade, como os fosfatos de rocha, tendem a preservar mais o P em sua constituição, reduzindo a perda desse elemento para as reações de indisponibilização que ocorrem no solo (Novais & Smyth, 1999; Resende et al., 2006a).

Quadro 5. Teor de P disponível (Mehlich-1 e Resina) em Cambissolo submetido a diferentes tratamentos de fosfatagem

Tratamento	Mehlich-1		Resina	
	2011	2012	2011	2012
	mg dm ⁻³			
Superfosfato triplo	8,66 Abc	9,01 Ab	19,25 Abc	16,33 Abc
FNR Bayóvar	22,95 Aa	24,95 Aa	25,00 Aab	25,92 Ab
FN Itafós	14,98 Aab	18,06 Aa	38,33 Aa	46,33 Aa
Sem correção de P	2,81 Ac	4,85 Ab	6,00 Ac	8,33 Ac
DMS (fonte) ⁽¹⁾		8,82		16,99
DMS (ano) ⁽¹⁾		6,27		15,44
CV (%) ⁽²⁾		30,69		43,23

⁽¹⁾ DMS: diferença mínima significativa. ⁽²⁾ CV: coeficiente de variação. Médias acompanhadas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não se diferem pelo teste de Tukey a 5 %.

Quadro 6. Rentabilidade com base na produtividade do milho acumulada em dois anos (2011 e 2012) de acordo com os fertilizantes na adubação de correção (200 ka ha⁻¹ de P₂O₅) e doses de manutenção

Fertilizante	Dose de manutenção (kg ha ⁻¹)		
	0	60	120
	R\$ ha ⁻¹		
Superfosfato triplo	4.533,11	4.534,78	3.841,94
Fosfato de Bayóvar	3.427,49	4.406,66	4.215,33
Fosfato Itafós	2.050,68	3.677,34	3.727,51
Sem correção	-	3.501,17	3.760,83

CONCLUSÕES

1. Quanto maior foi a solubilidade de fonte testada na adubação corretiva, menor foi a necessidade de reposição de fósforo no sulco de plantio anualmente.

2. O Bayóvar proporcionou melhor nutrição da cultura e menor necessidade de reposição do nutriente no sulco de plantio por meio do superfosfato triplo, entre os fosfatos de rocha testados.

3. Os extratores Mehlich-1 e a Resina de Troca Iônica (resina mista) extraíram mais P dos tratamentos corrigidos por meio dos fosfatos de rocha, apresentando resposta incoerente com os resultados observados para a cultura de milho.

4. A correção com o superfosfato triplo apresentou-se vantajosa economicamente e não exigiu a aplicação anual de P no sulco de plantio. A fosfatagem com o fosfato de Bayóvar associada à adubação na linha apresentou economicidade maior que a do tratamento corrigido com o fosfato Itafós e a adubação na linha isolada.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor; e à Rede FertBrasil, pelo financiamento do experimento.

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.
- ARCAND, M.M. & SCHNEIDER, K.D. Plant- and microbial-based mechanisms to improve the agronomic effectiveness of phosphate rock: a review. *Anais Acad. Bras. Ci.*, 78:791-807, 2006.

- BECH, J.; SUAREZ, M.; REVERTER, F.; TUME, P.; SÁNCHEZ, P.; BECH, J. & LANSAC, A. Selenium and other trace elements in phosphate rock of Bayovar-Sechura (Peru). *J. Geochem. Explor.*, 107:136-145, 2010.
- BOLAN, N.S.; ELIOTT, J.; GREGG, P.E.H. & WEIL, S. Enhanced dissolution of phosphate rocks in the rhizosphere. *Biol. Fert. Soils*, 24:169-174, 1997.
- CHIEN, S.H. & MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fert. Res.*, 41:227-234, 1995.
- CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I. & CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Adv. Agron.*, 102:267-322, 2009.
- CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I.; TU, S. & SNYDER, C.S. Agronomic and environmental aspects of fertilizers varying in source and solubility: an update review. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 89:229-255, 2011.
- COELHO, A.M. & FRANÇA, G.E. Seja o doutor do seu milho: Nutrição e adubação. 2.ed. Piracicaba, Potafos, 1995. 24p. (Arquivo do Agrônomo, 2)
- CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, 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.
- CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; FREIRE, F.J.; SOUZA, S.K. & SILVA, G.B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. *R. Bras. Ci. Agron.*, 3:218-224, 2008.
- COSTA, S.E.V.G.A.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; SILVA, T.O. & SILVA, T.R. Crescimento e nutrição da braquiária em função de fontes de fósforo. *Ci. Agrotec.*, 32:1419-1427, 2008.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: A computer statistic analysis system. *Ci. Agrotec.*, 35:1039-1042, 2011.
- FREITAS, I.F.; NOVAIS, R.F.; VILLANI, E.M.A. & NOVAIS, S.V. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. *R. Bras. Ci. Solo*, 37:667-677, 2013.
- GAUME, A.; MÄCHLER, F.; LEÓN, C.; NARRO, L. & FROSSARD, E. Low-P tolerance by maize (*Zea mays* L.) genotypes: Significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation. *Plant Soil*, 228:253-264, 2001.
- GOMES, J.B.V.; ARAÚJO FILHO, J.C.; SIQUEIRA, O.J.W.; CARVALHO FILHO, A. & SOBRAL, L.F. Principais classes de solo do Estado de Sergipe. In: SOBRAL, L.F.; VIÉGAS, P.R.A.; SIQUEIRA, O.J.W.; ANJOS, J.L.; BARRETTO, M.C.V. & GOMES, J.B.V., eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes no Estado de Sergipe. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007. p.25-48.

- GUEDES, E.M.S.; FERNANDES, A.R.; LIMA, E.V.; GAMA, M.A.P. & SILVA, A.L.P. Fósforo natural de Arad e calagem e o crescimento de *Brachiaria brizanta* em Latossolo Amarelo sob pastagem degradada na Amazônia. R. Ci. Agron., 52:117-129, 2009.
- HARGER, N.; BRITO, O.R.; RALISCH, R.; ORTIZ, F.R. & WATANABE, T.S. Avaliação de fontes e doses de fósforo no crescimento inicial do milho. Semina: Ci. Agrár., 28:39-44, 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)
- LIU, Y.; MI, G.; CHEN, F.; ZHANG, J. & ZHANG, F. Rhizosphere effect and root growth of two maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability. Plant Sci., 167:217-223, 2004.
- LI, K.; XU, C.; LI, Z.; ZHANG, K.; YANG, A. & ZHANG, J. Comparative proteome analyses of phosphorus response in maize (*Zea mays* L.) roots of wild type and a low-P-tolerant mutant reveal root characteristics associated with phosphorus efficiency. Plant J., 55:927-939, 2008.
- MELAMED, R.; GASPAR, J.C. & MIEKELEY, N. Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais. In: LAPIDO-LOUREIRO, E.V.; MELAMED, R. & FIGUEIREDO NETO, J., eds. Fertilizantes: Agroindústria e sustentabilidade. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2009. p.385-395.
- MONTEIRO, C.M. Fosforitos do Grupo Bambuí na região de Campos Belos (GO)/Arraias (TO), na borda oeste do Cráton São Francisco. Brasília, Universidade de Brasília, 2009. 129p.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- ONO, F.B.; MONTAGNA, J.; NOVELINO, J.O.; SERAFIM, M.E.; DALLASTA, D.C. & GARBIATE, M.V. Eficiência agronômica de superfosfato triplo e fosfato natural de Arad em cultivos sucessivos de soja e milho. Ci. Agrotec., 33:727-734, 2009.
- RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 284p.
- RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1996. 285p.
- RAJAN, S.S.S.; CASANOVA, E. & TRUONG, B. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rocks, with a case-study analysis. In: ZAPATA, F. & ROY, R.N., eds. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. Roma, FAO, 2004. p.41-57.
- RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; CURI, N. & LAGO, F.J. Resposta do milho a fontes e modos de aplicação de fósforo durante três cultivos sucessivos em solos da região do cerrado. Ci. Agrotec., 30:458-466, 2006a.
- 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, 2006b.
- SANTOS, E.A. & KLIEMANN, H.J. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos de cerrado e sua avaliação por extratores químicos. Pesq. Agropec. Trop., 35:139-146, 2005.
- SCHLINDWEIN, J.A.; BORTOLON, L. & GIANELLO, C. Soil phosphorus available for crops and grasses extracted with three soil-test methods in Southern Brazilian soils amended with phosphate rock. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 42:283-292, 2011.
- SILVA, F.C., ed. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- SILVA, F.C. & RAIJ, B.van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. Pesq. Agropec. Bras., 34:267-288, 1999.
- SOBRAL, L.F.; VIÉGAS, P.R.A.; SIQUEIRA, O.J.W.; ANJOS, J.L.; BARRETTO, M.C.V. & GOMES, J.B.V., eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes no Estado de Sergipe. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007. 251p.
- TRUONG, B. Evaluation of phosphate rocks for direct application. In: ZAPATA, F. & ROY, R.N., eds. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. Roma, FAO, 2004. p.27-40.