**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Efeito do enxofre elementar na eficiência de fosfatos naturais

Fábio Ricardo Coutinho Fontes César

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2012**

Fábio Ricardo Coutinho Fontes César
Engenheiro Agrônomo

Efeito do enxofre elementar na eficiência de fosfatos naturais

Orientador:
Prof. Dr. **TAKASHI MURAOKA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

César, Fábio Ricardo Coutinho Fontes
Efeito do enxofre elementar na eficiência de fosfatos naturais / Fábio Ricardo
Coutinho Fontes César. - - Piracicaba, 2012.
90 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Arroz 2. Diluição isotópica 3. Enxofre 4. Feijão 5. Fertilizantes fosfatados
6. Fosfatos - Aplicações I. Título

CDD 631.41
C421e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus Pais,

Fábio Fontes César de Carvalho e Dulcinea Sena Coutinho de Carvalho,

pelo amor,

pelo exemplo de vida,

por nunca medirem esforços para que eu buscasse meus sonhos

e por sempre me ensinarem o caminho correto a seguir...

Dedico

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por guiar e iluminar meus passos, me dar saúde e forças para seguir em frente todos os dias da minha vida;
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Takashi Muraoka, pelos valiosos ensinamentos, amizade, apoio e confiança;
- À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade de realização do curso de mestrado;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo;
- À minha orientadora de iniciação científica Prof. Dra. Sylvana Naomi Matsumoto, por guiar meus primeiros passos na pesquisa, pelo incentivo e motivação;
- À minha namorada, Juliana Leles, pela presença constante nesta fase da vida, pelo amor, carinho e compreensão;
- Ao meu irmão Lucas Coutinho, pela amizade e companheirismo;
- Aos grandes amigos que tive a felicidade de conhecer durante essa jornada, Luiz Francisco e Rodrigo Coqui, por participarem ativamente da elaboração desse trabalho, por sempre estarem dispostos a ajudar com críticas construtivas e sugestões, pelo aprendizado e incentivo profissional;
- Aos grandes amigos e companheiros de orientação Alinne, Cristiano, Diogo, Fernando, Neri, Roger, Rafael e Rafhael, pela saudável convivência, pela amizade, incentivo, e pelos momentos de descontração;
- Aos amigos Daniel, Leandro e Ranieri, pela convivência harmoniosa durante todo o tempo;

- Aos amigos e colegas da pós-graduação: Arlete, Halan, Joice, Luiz Marcandalli, Máisa e Paula, sempre presentes;
- Aos amigos que mesmo distantes acompanharam essa jornada: Anderson, Carlos Leandro, Cid Diego, Nerivaldo, Thiago Batista e Thiago Fernandes;
- Aos técnicos e funcionários do Laboratório de Fertilidade do Solo CENA/USP Marileusa, Sandra e João;
- A todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
Referências	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Fósforo no sistema solo-planta	17
2.2 Características e utilização de fosfatos naturais	18
2.3 Alternativas para melhorar a eficiência dos fosfatos naturais	20
2.4 Associação entre fosfatos naturais e enxofre elementar	21
2.5 Enxofre no sistema solo-planta.....	22
2.6 Características e utilização de enxofre elementar.....	23
Referências	25
3 APLICAÇÃO DE FOSFATOS NATURAIS ASSOCIADOS A ENXOFRE ELEMENTAR NAS CULTURAS DO FEIJÃO E ARROZ.....	33
Resumo	33
Abstract.....	33
3.1 Introdução	34
3.2 Material e métodos	35
3.3 Resultados e discussão	41
3.4 Conclusões.....	52
Referências	52
4 EFEITOS DE DOSES DE ENXOFRE ELEMENTAR E DE FOSFATOS NATURAIS NO APROVEITAMENTO DO P PELO FEIJOEIRO	57
Resumo	57
Abstract.....	57
4.1 Introdução	58
4.2 Material e métodos	59
4.3 Resultados e discussão	64
4.4 Conclusões.....	86
Referências	86

RESUMO

Efeito do enxofre elementar na eficiência de fosfatos naturais

É amplamente conhecida a importância do fósforo (P) para a obtenção de boa produtividade de culturas. Sabe-se, também, que a matéria prima para produção de adubos fosfatados é um recurso escasso e não renovável. Utilizações adequadas e alternativas que busquem melhorias da eficiência das fontes de P são de grande importância para o manejo da fertilização fosfatada. Os fosfatos naturais (FNs) podem ser fontes alternativas aos fosfatos acidulados para adubação fosfatada. Entretanto, faz-se necessário buscar opções para melhorar a eficiência dessas fontes, sendo uma delas a aplicação junto com enxofre elementar (S^0), que, durante o processo de oxidação a sulfato no solo, libera prótons (H^+) necessários para solubilização dos FNs. Deste modo, objetivou-se por meio desse trabalho estudar esse efeito do S^0 . O trabalho constou de dois estudos conduzidos em casa de vegetação: (i) aplicação de FNs associados a S^0 nas culturas do arroz e feijão, e (ii) efeitos de doses de S^0 e de FNs no aproveitamento do P dessas fontes pelo feijoeiro. Em ambos os estudos, para contabilizar o efeito do S^0 no aumento da absorção de P dos FNs pelas culturas, foi utilizado o método da diluição isotópica com ^{32}P . No estudo 1 o objetivo foi avaliar o efeito do modo de aplicação do fosfato natural reativo de Gafsa (FNG) e do fosfato natural de Patos de Minas (FNP) aplicados isoladamente ou em associação com S^0 e tendo como referência o superfosfato triplo (SFT), nas culturas do arroz e feijão. Os tratamentos consistiram de 5 fontes de P: SFT, FNP, FNG e das associações do FNP + S^0 e FNG + S^0 , 2 modos de aplicação: área total e localizada, mais um tratamento controle, sem aplicação de P, constituindo um fatorial ($5 \times 2 + 1$). A acidez gerada na oxidação do S^0 promoveu aumento da solubilização do FNG e do FNP, melhorando a disponibilidade de P dessas fontes, com maior efeito quando os fertilizantes foram aplicados em contato, localizados no solo. No estudo 2 objetivou-se avaliar o efeito de doses de S^0 e de doses de P de FNG e FNP para a cultura do feijoeiro. Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial $3 \times 5 \times 4$, sendo 3 fontes de P: SFT, FNG e FNP, 5 doses de P (0, 30, 60, 90 e 120 mg kg⁻¹) e 4 doses de S com S^0 (0, 30, 60, 90 mg kg⁻¹). A associação do S^0 com FNG e FNP promoveu aumento da solubilização dessas fontes e consequentemente da absorção de P pelo feijão, sendo o efeito mais expressivo no FNG, comparado ao FNP. Quando aplicados sem a presença do S^0 , o FNG e o FNP foram equivalentes em fornecer P para a cultura do feijão. A absorção de P do FNG aumentou com as doses de S^0 e esse efeito foi mais expressivo na dose inicial, não mantendo proporcionalidade com as demais doses. O efeito sobre o fosfato natural de Patos de Minas foi pouco expressivo.

Palavras-chave: Diluição isotópica ^{32}P ; Fertilizantes fosfatados; Fosfato natural de Patos de Minas; Fosfato natural reativo de Gafsa; Arroz; Feijão; Mistura de fontes; Modos de aplicação

ABSTRACT

Effect of elemental sulfur on the efficiency of phosphate rocks

It is well known the importance of phosphorus (P) for obtaining good crop yield. It is also known that the raw material for obtaining phosphate fertilizers is a scarce and non renewable resource. Appropriate use and searching alternatives for improving the efficiency of P sources are of great importance for the management of phosphate fertilization. The phosphates rocks (PRs) may be the alternative sources for soluble P fertilization. However, it is necessary to find the ways to improve the efficiency of these sources, being one of them taking advantage of elemental sulfur (S^0) oxidation, which, during the process, releases protons (H^+), necessary for PRs solubilization. The objective of this research was to study this effect of S^0 . Two studies were carried out in the greenhouse: (i) application of PRs associated with S^0 in rice and beans crops, and (ii) effects of S^0 rates and of the PRs on the utilization of P from these sources by the bean crop. In both studies, to account the increasing effect of S^0 on the PR-P uptake by the crops, the ^{32}P dilution technique was used. The object of the study 1 was to evaluate the effect of applying methods of Gafsa reactive phosphate rock (GPR) and the Patos de Minas (PPR), sole or in combination with S^0 compared to the triple superphosphate (TSP) for rice and bean crops. The treatments consisted of five P sources: TSP, PPR, GPR, PPR+ S^0 and GPR + S^0 , application methods: total area or located, plus a control without P application, constituting a factorial ($5 \times 2 + 1$). The acidity generated by oxidation of S^0 increased the solubilization of GPR and PPR, increasing the availability of P from these sources, the effect being greater when fertilizers were applied in contact, located on the soil. The object of second study was to evaluate the effect of P rates associated with S rates as S^0 in bean crop. The treatments were arranged in a $3 \times 5 \times 4$ factorial, with 3 P sources: TSP, GPR and PPR, five P rates (0, 30, 60, 90 and 120 mg kg^{-1}) and four rates of the S (0, 30, 60, 90 mg kg^{-1}). The association of S^0 with GPR and PPR promoted an increase in solubilisation of these P sources and consequently the absorption of P by the bean plants, being the effect stronger in the GPR, compared to PPR. When applied without S^0 the PPR and GPR were equivalent in providing P to the bean crop. The absorption of P from GPR increased with increasing sulfur rate and this effect was more expressive in the initial rate, not maintaining the proportionality with other rates. The effect on the PPR was small.

Keywords: ^{32}P isotopic technique; Phosphate fertilizers; Patos de Minas phosphate rock; Gafsa phosphate rock; Rice; Bean; Mixed sources; Application method

1 INTRODUÇÃO

É amplamente conhecida a importância do fósforo (P) para a nutrição das culturas e consequentemente para que atinjam altas produtividades. Sabe-se, também, que a matéria prima para obtenção de adubos fosfatados é um recurso escasso e não renovável. Dessa forma é de suma importância a utilização eficiente das fontes de P, para que seja aumentado o tempo de vida útil das reservas de rochas fosfáticas, além de proporcionar maior rentabilidade para o sistema produtivo.

A grande maioria dos solos tropicais é deficiente em P sendo este nutriente o que mais limita a produção agrícola nestes solos (NOVAIS; SMYTH, 1999). Isso ocorre devido à natural escassez e pela grande capacidade de “fixação”^{/1} do P pelo solo, exigindo elevadas quantidades de fertilizantes fosfatados nos sistemas de cultivo.

O P é o nutriente que apresenta maior variação quanto às fontes disponíveis no mercado. As características de maiores importâncias e que difere essas fontes é a solubilidade e a natureza química da rocha fosfática. As fontes mais utilizadas no Brasil e em todo o mundo são solúveis, com elevada eficiência agrônômica, que possuem o P prontamente disponível para as culturas. Essas fontes são denominadas de fosfatos acidulados por serem obtidos por meio da reação da rocha fosfática com ácido sulfúrico ou ácido fosfórico, dando origem aos superfosfato simples (SFS) e triplo (SFT), respectivamente, e os fosfatos monoamônico (MAP) e diamônico (DAP), obtidos pela reação do ácido fosfórico com amônia.

Para obtenção dos fosfatos acidulados é necessária matéria prima com elevado teor de P e baixo conteúdo de impurezas. Outra questão limitante é o alto custo do processo industrial que onera ainda mais o produto final. Além disso, especialmente nos solos tropicais úmidos, a utilização de fontes totalmente solúveis como os fosfatos acidulados podem não ser o mais indicado, pois, o P fornecido via fertilizante ao mesmo tempo em que aumenta os teores de P na solução do solo favorecendo a absorção pelas raízes, pode também ser “fixado”, ou seja, transformado em formas não lábeis pelo solo.

Os fosfatos naturais (FNs) podem ser fontes alternativas para adubação fosfatada. Entretanto, não possuem o P prontamente disponível para as plantas. Devido a baixa solubilidade a disponibilidade do P no solo é muito lenta, não satisfazendo à necessidade

^{/1} O termo “fixação” de fósforo é bastante divergente entre autores. Neste trabalho, a terminologia é empregada referindo-se aos fenômenos que levam a diminuição da biodisponibilidade de P às plantas, como, principalmente, os de adsorção específica e de precipitação.

inicial da cultura. Assim, apresentam baixa eficiência agronômica principalmente para culturas anuais.

O elevado custo dos fosfatos totalmente acidulados, incorporação de novas áreas à agricultura brasileira e baixa disponibilidade de P nestes solos, aliado a existência de grandes jazidas de FNs em diversas regiões do País, tem feito com que a utilização dessas fontes seja um atrativo. Entretanto, faz-se necessário buscar alternativas para melhorar a eficiência dos FNs.

A solubilização dos FNs ocorre nos solos de acordo com a reação empírica: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2 + 12\text{H}^+ \rightarrow 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{F}^-$ (KHASAWNEH; DOLL, 1978). Assim, necessitam de prótons (H^+) no meio para que a reação ocorra. Uma das formas de promover a solubilização dos FNs melhorando sua eficiência é por meio da aplicação junto com enxofre elementar (S^0) (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996). O princípio do uso do FNs associado ao S^0 é utilizar a acidez gerada da oxidação do S^0 a H_2SO_4 que é realizada principalmente por microorganismos presentes no solo, e essa acidez auxiliar na solubilização do FNs. Existem poucos estudos no Brasil com relação à aplicação de FNs associado ao S^0 , principalmente quanto ao modo de aplicação da associação entre as fontes e doses e proporções a serem utilizadas.

Além do possível efeito benéfico sobre a eficiência dos FNs, a associação entre os FNs e S^0 merece destaque quanto ao fornecimento gradativo de enxofre (S) para as plantas. O S desempenha funções vitais no vegetal, participando como componente de todas as proteínas vegetais, aminoácidos essenciais, vitaminas e enzimas, com exigência pelas culturas agrícolas similares ou superiores as do P. Apesar disso, o S é muitas vezes deixado em segundo plano no manejo da adubação, sendo este nutriente fornecido as culturas como elemento acompanhante de fontes de outros nutrientes como SFS e o sulfato de amônio. Entretanto, as indústrias de fertilizantes têm buscado fontes NPK cada vez mais concentradas, por reduzir custos com o transporte e conseqüentemente da adubação destes macronutrientes primários.

Devido ao uso crescente de adubos concentrados que contem pouco ou nenhum S e da natural limitação deste nutriente nos solos, onde após alguns anos de cultivo declina seu suprimento a partir da matéria orgânica, pesquisas têm relatado cada vez mais respostas das culturas à aplicação de S. Dessa forma o S^0 pode ser uma opção para o fornecimento de S em decorrência do alto conteúdo do nutriente (85 a 100% de S) proporcionando redução nos custos de transporte e aplicação.

Com base no exposto a hipótese testada foi: (i) a acidez gerada a partir da oxidação do enxofre elementar à sulfato pode atuar na solubilização dos FNs melhorando sua eficiência e aumentando o fornecimento de P as culturas.

Os objetivos foram: (i) avaliar o efeito da acidez gerada por meio da oxidação do enxofre elementar na solubilização de fosfatos naturais e no aumento da disponibilidade do P; (ii) comparar a eficiência de aproveitamento do P de um fosfato natural reativo (importado) com um fosfato natural brasileiro, ambos aplicados em associação com enxofre elementar; (iii) avaliar a forma de aplicação da associação entre os fosfatos naturais e enxofre elementar no fornecimento de P para as culturas do arroz e feijão; (iv) avaliar o fornecimento de enxofre para a cultura do feijão por meio do enxofre elementar.

Referências

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 159-206, 1978.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 57, p. 77-159, 1996.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fósforo no sistema solo-planta

De acordo com Larsen (1967) o P no solo pode ser separado nas seguintes frações: P-solução, P-lábil e P-não lábil. A disponibilidade de P para as plantas é dependente do P-solução. Predominantemente em solos tropicais, o P fornecido via fertilizante com objetivo de aumentar o teor do P-solução e ser absorvido pela planta, pode também, ao mesmo tempo, ser transformado em P inorgânico na fase sólida, por meio de reações de adsorção específica e precipitação (NOVAIS; SMYTH, 1999; SOUSA et al., 2010).

A adsorção de P no solo ocorre inicialmente com uma rápida reação de atração eletrostática (BARROW, 1985), seguida por uma reação mais lenta de troca de ligantes de grupamentos OH e OH_2^+ , da superfície dos óxidos, por fosfato da solução, formando um complexo de superfície com ligações de alto grau de covalência (PARFITT, 1978). A precipitação ocorre da reação do P com formas iônicas de Al e Fe em solos ácidos e em solos neutros ou calcários com Ca especialmente, resultando em compostos de composição definida e pouco solúveis (SAMPLE et al., 1980). Esses processos causam diminuição dos teores de P-solução, tornando o indisponível às plantas.

A absorção do P da solução do solo pela planta ocorre por meio do contato do nutriente com a raiz, que é influenciada por características do solo, e em seguida com entrada do nutriente para o interior da raiz, que depende principalmente das características da planta. O P é absorvido principalmente na forma do íon H_2PO_4^- . De forma geral, difusão é o principal mecanismo de movimentação do P até as raízes, responsável por cerca de 94% do total de H_2PO_4^- absorvido; a interceptação radicular contribui com cerca de 3,5% e o fluxo de massa com apenas cerca de 2,6% do total, devido aos baixos teores de P na solução do solo (BARBER, 1962; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989).

Na planta o P exerce papel primordial no metabolismo e fisiologia, sendo essencial na cadeia fotossintética, compondo moléculas de ADP e ATP responsáveis pela transferência e armazenamento de energia, dos fosfolipídios das membranas e desempenha papel estrutural fazendo parte de moléculas de ácidos nucleicos (DNA e RNA) e coenzimas (EPSTEIN; BLOOM, 2005).

Devido à grande intensidade dos processos metabólicos nos tecidos em desenvolvimento, este é o local onde se encontra o P em maiores concentrações. O P é

bastante móvel quanto à redistribuição nos tecidos da planta podendo, se necessário, ser deslocado de tecidos mais velhos para tecidos mais jovens. Caso ocorra deficiência de P, as plantas anuais apresentam crescimento lento, as folhas com coloração verde-escuro, cujos pecíolos e nervuras arroxeados principalmente na parte abaxial, tendo o crescimento radicular reduzido, tornando as plantas estioladas ou com crescimento bastante prejudicado (BINGHAM, 1966).

2.2 Características e utilização de fosfatos naturais

Os FNs são grupos minerais de ocorrência natural com elevado teor de minerais fosfáticos, podendo ou não passar por processos físicos de concentração como lavagem e flotação, para separá-los de outros minerais com os quais estão misturados na jazida (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

Os FNs são matéria prima para a fabricação direta de fertilizantes (ataque sulfúrico para produção de superfosfato simples), ou indireta (ataque sulfúrico para obtenção de ácido fosfórico e posterior produção de superfosfato triplo ou fosfatos de amônio). Entretanto, o processo industrial é caro. Muitas vezes a origem e a natureza da rocha fosfática ou mesmo o tipo e o grau de contaminações de, por exemplo, óxidos de ferro e alumínio presentes em algumas rochas fosfáticas, inviabiliza o seu uso industrial, havendo, portanto, uma alternativa para essas rochas de menor qualidade (KAMINSKI; PERUZZO, 1997). A sua aplicação direta na agricultura é a que tem sido mais empregada e estudada.

Uma característica importante dos FNs é a sua reatividade, definida como uma propriedade intrínseca dessas fontes, usada para mensuração direta do quanto do P é solubilizado em um dado tempo. A reatividade é estimada através da solubilidade do FNs em solventes orgânicos: ácido cítrico (AC), ácido fórmico (AF) ou citrato neutro de amônio (CNA) (RAJAN et al., 1996). Os fosfatos de origem metamórfica ou ígnea são geralmente poucos reativos e os de origem sedimentar são classificados como altamente reativos. A reatividade varia de acordo com o regime geológico que é formada a apatita e está intimamente relacionada com o grau de substituição de fosfato (PO_4^{3-}) por carbonato (CO_3^{2-}), que gera instabilidade na estrutura cristalina da rocha (LEHR; McCLELLAN, 1972; CHIEN, 1977).

Alguns autores propuseram sistemas de classificação dos FNs para aplicação direta. Diamond (1979), com base no teor de P_2O_5 solúvel em CNA, AC e AF, classificou os fosfatos naturais em baixa, média e alta reatividade. Hammond e Leon (1983) sugeriram um sistema

utilizando como parâmetro a eficiência agronômica relativa (EAR) e o teor de P_2O_5 (%) solúvel em CNA, classificando-os em quatro categorias de reatividade (alta, média, baixa e muito baixa). Tisdale et al. (1993) propuseram que para classificar os FNs como altamente reativos, a amostra moída deve apresentar uma solubilidade em AF 2 % e AC 2 % maior que 65 % e 40 %, respectivamente.

Os FNs brasileiros de importância comercial, por serem no geral de origem ígnea, são de baixa reatividade como os fosfatos de Patos de Minas e Abaeté, e de muito baixa reatividade como os fosfatos de Jacupiranga, Catalão e Tapira. Já os FNs importados de origem sedimentar, como o Gafsa da Tunísia, Arad de Israel, Bayóvar do Peru e Carolina do Norte dos Estados Unidos, são classificados como altamente reativos (SYERS et al., 1986; LEÓN et al., 1986).

No Brasil, a legislação vigente do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2007) determina que um fosfato natural deva possuir garantias mínimas de 24 % de P_2O_5 total e mínimo de 4 % solúvel em AC. Já para classificar um fosfato natural como reativo esse deve possuir mínimo de 27 % de P_2O_5 total com mínimo de 30 % do teor total solúvel em AC.

Os índices de solubilidade dos FNs possuem capacidade preditiva da eficiência agronômica (EA) inicial da cultura. De maneira geral, quanto maior a solubilidade em AC ou AF, maior a capacidade de fornecimento de P para a cultura e conseqüentemente maior sua EA (SOUSA; REIN; LOBATO, 2008). A EA dos FNs depende muito de suas próprias características, incluindo sua origem, reatividade do fosfato, propriedades do solo, especialmente pH, práticas de manejo, tamanho e área superficial do grão e as características da planta a ser cultivada (CHIEN; MENON, 1995).

Desde a década de 1970 vários autores (DYNIA, 1977; BRAGA et al., 1980; GOEDERT; LOBATO, 1984; BRAGA et al., 1991; COUTINHO et al., 1991; CHIEN et al., 1996; VITORINO et al., 1998; KORNDÖRFER et al., 1999; SOUSA et al., 1999) tem comparado a EA da aplicação direta dos FNs com adubos fosfatados solúveis. De forma geral os resultados das pesquisas têm demonstrado baixo desempenho para os FNs brasileiros, de baixa reatividade, conseqüentemente com EA muito baixa para culturas anuais. Com os FNs reativos (importados) tem-se verificado alguns resultados satisfatórios, com EA em torno de 50% para culturas anuais no primeiro ano de cultivo.

2.3 Alternativas para melhorar a eficiência dos fosfatos naturais

Na década de 80, com intensificação do uso de FNs, principalmente em países em desenvolvimento e com reservas contendo elevados teores de impurezas, a exemplo da Índia, vários pesquisadores buscaram alternativas para melhorar a eficiência dos FNs para a aplicação direta. Existem vários meios para aumentar a eficiência que podem ser divididos em biológicos, químicos e físicos. A utilização de microorganismos solubilizadores, aplicação dos FNs junto com composto orgânico e o uso de genótipos mais eficientes em absorver P, são meios biológicos utilizados, embora não tão difundidos, quanto aos meios químicos e físicos (RAJAN, 2004).

A acidulação parcial dos FNs é um meio químico de promover o aumento de sua eficiência, embora apresente algumas restrições. Menon e Chien (1990), utilizando como cultura teste o milho, estudaram dois FNs parcialmente acidulados com ácido sulfúrico em quantidade necessária para solubilizar 50% do P total: FN de Huíla da Colômbia, com 9,0% de P total, 1,5% de P solúvel em CNA, e 2,3% de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ e FN de Capinota da Bolívia, com 8,6% de P total, 1,0% de P solúvel em CNA, e 8,8% de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$. O FN de Huíla alcançou 95% de eficiência em relação ao super fosfato triplo, enquanto o FN de Capinota, apenas 54%. A diferença entre as fontes ocorreu devido às quantidades distintas de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (impurezas). Após a acidulação o FN de Huíla alcançou os esperados 51% do P total solúvel em água e o FN de Capinota apenas 14,6%, devido a grande quantidade de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (8,8%), que foi determinante para o baixo teor de P solúvel em água após a acidulação e conseqüentemente para a baixa eficiência. Parte do ácido sulfúrico utilizado reagiu com o $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ restando menor quantidade para reagir com a apatita (HAMMOND et al., 1989).

A mistura seca ou compactada dos FNs com fontes fosfatadas de elevada solubilidade em água é um método físico estudado para aumentar a eficiência dos FNs, tendo alguns autores obtidos resultados satisfatórios dessas misturas (RAJAN, 2004). Begum; Narayanasamy e Biswas (2004) estudando, o FN Jhamarkotra da Índia com 8,09% de P total e 1,84% de P solúvel em CNA, em mistura compactada a seco (1:1) com o MAP, constataram na cultura do trigo, acúmulo de matéria seca total e concentração de P na matéria seca de 79% e 85% respectivamente, em relação ao DAP. Quando o FN foi aplicado sozinho o acúmulo de matéria seca total e concentração de P na matéria seca foram de apenas 14,5% e 12,7% respectivamente. Segundo os autores o fertilizante fosfatado solúvel em água supriu a necessidade inicial da cultura por P, resultando em melhor desenvolvimento do sistema

radicular, possibilitando a planta explorar maior volume de solo e conseqüentemente absorver mais P. Houve também efeito acidificante do MAP na dissolução do FN e assim maior liberação de P para a cultura. Franzini et al. (2009), utilizando o ^{32}P como traçador, verificaram que o efeito no aumento da disponibilidade de P dos FNs em mistura com uma fonte solúvel em água é devido à solubilização parcial do FN pela acidez residual da fonte solúvel.

Oliveira Júnior; Prochnow e Klepker (2011) desenvolveram um trabalho em campo avaliando cinco proporções de misturas granuladas de Superfosfato Triplo (SFT) e o FN da Argélia na cultura da soja por duas safras. As fontes com diferentes teores de P solúvel em água foram obtidas a partir da granulação com diferentes proporções do fertilizante fosfatado totalmente acidulado e de fosfato de rocha reativo, obtendo-se teores de P solúvel em água de 24 %; 54 %; 62 % e 71 % do teor total de P, os quais foram denominados de solubilidade relativa (SR). A fonte padrão de elevada solubilidade em água utilizada foi o SFT com 92 % de “SR” e a fonte padrão de baixa solubilidade utilizada o Fosfato Natural Reativo Argélia, com 0,6 % de “SR”. Os autores verificaram que a partir de 60% de SR a fonte fosfatada não afetou a produtividade e a eficiência agrônômica. Dessa forma, o autor sugeriu que para a soja, a mistura que resulte em 60% de P do teor total solúvel em água seja uma alternativa agronomicamente viável, equivalente a do SFT.

2.4 Associação entre fosfatos naturais e enxofre elementar

Embora bastante carente de estudos a aplicação de FNs juntamente com enxofre elementar (S^0), é um método físico de aumentar a eficiência dos FNs (RAJAN, 2004). O princípio é utilizar a acidez gerada da oxidação do S^0 a H_2SO_4 , que é realizado principalmente por microorganismos do solo, para solubilização dos FNs, favorecendo a disponibilidade de P.

Conforme já visto, para que ocorra solubilização dos FNs nos solos são necessários prótons (H^+) no meio. A reação de oxidação do S^0 a sulfato no solo ocorre da seguinte forma: $\text{S}^0 + \text{CO}_2 + 0,5 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow [\text{CH}_2\text{O}] + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$ (SAIK, 1995; ALVAREZ-V. et al., 2007), promovendo a liberação de prótons (H^+) e conseqüentemente acidificando o meio.

Franceloso et al. (2010) avaliaram a influência do S^0 na solubilidade de um FN reativo e compararam a eficiência com o SFT na cultura do milho. O experimento foi instalado com quatro doses de cada fertilizante fosfatado (0, 100, 200 e 300 kg ha^{-1} de P_2O_5) e duas doses de S (0 e 30 kg ha^{-1} de S^0 em pó). Os índices de eficiência agrônômica do FN usando como referência o SFT apresentaram média de 43% e 33% com a adição e sem adição de S^0 ,

respectivamente. A oxidação do S^0 influenciou positivamente a disponibilidade de P do FN para as plantas. Cabe ressaltar a baixa relação de S^0 (30 kg ha^{-1}): FN ($100, 200 \text{ e } 300 \text{ kg ha}^{-1}$) utilizada no experimento, que talvez tenha limitado os resultados de eficiência do FN, por acidez gerada da oxidação do S^0 ter sido suficiente apenas para solubilizar parte do P do FN.

Begum; Narayanasamy e Biswas (2004), realizando estudo de incubação por 100 dias em um solo alcalino (pH 8,5), com objetivo de avaliar a capacidade de fornecimento de P de misturas de fertilizantes fosfatados: FN Jhamarkotra (FNJ) da Índia e os produtos fabricados pela sua compactação com SFS, MAP e $MAP + S^0$, verificaram maior disponibilidade de P do FN nas misturas na seguinte ordem: $FNJ + MAP + S^0 > FNJ + MAP > FNJ + SPS > FNJ$. Segundo os autores a maior solubilização para o tratamento com adição de S^0 ocorreu pela sua oxidação que reduziu o pH do solo, promovendo maior liberação de P do FN.

A associação entre o S^0 e os FNs pode ter grande aplicabilidade na agricultura que segue princípios “naturais” e “ecológicos”, pois, devido as limitações legislativas da International Federation for Organic Agriculture Movements (IFOAM) não se pode utilizar fertilizantes acidulados nesse sistema produtivo. Assim, as fontes cabíveis de uso são em grande parte os FNs, que possuem baixa eficiência comparados as fontes aciduladas, necessitando de alternativas que busquem melhorias de sua eficiência. Evans; McDonald e Price (2006) desenvolveram estudos em campo, em fazendas com produção orgânica, com objetivo de avaliar o fornecimento de P do FN reativo de Arad aplicado junto com S^0 . Os autores constaram resultados satisfatórios da associação no aumento da eficiência dos FNs, e recomendaram a utilização dos FNs + S^0 para a agricultura orgânica no sudeste da Austrália.

2.5 Enxofre no sistema solo-planta

As exigências de S para as culturas são iguais ou superiores as do P. Entretanto o S é na maioria das vezes deixado como segundo plano no manejo da adubação para as culturas e quando utilizado é principalmente como nutriente acompanhante de fontes de NPK. A tendência das indústrias em produzir fertilizantes fontes de NPK cada vez mais concentrados, com objetivo de reduzir custos com transportes, tem contribuído ainda mais para a escassez desse nutriente nos solos Brasileiros. Programas de adubação na agricultura moderna não podem faltar adequado suprimento de enxofre (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

A entrada de S no solo pode ocorrer pelo intemperismo de minerais sulfatados, pelas águas da chuva e irrigação e pelas adições de fertilizantes minerais ou orgânicos. Por outro

lado, as saídas deste elemento estão relacionadas às exportações pelas culturas, à lixiviação, a erosão e a emissão de gases sulfurados (STIPP; CASARIN, 2010).

O S está presente no solo nas formas orgânica e inorgânica, sendo a primeira forma predominante podendo representar até mais que 90% do total (NASCIMENTO; MORELLI, 1980). Os dois principais tipos de transformações do S no solo são a mineralização e a imobilização. A mineralização da matéria orgânica do solo resulta na produção de SO_4^{2-} e controla o fornecimento de S para os vegetais (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). Na imobilização o SO_4^{2-} é convertido em S orgânico por ação de microrganismos.

O SO_4^{2-} é a forma química preferencialmente absorvida pelas plantas e o contato com a raiz é predominantemente por fluxo de massa. A capacidade da planta em redistribuir o S é muito pequena e conseqüentemente quando em carência os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas mais jovens, apresentando-se principalmente na forma de amarelecimento que toma todo o limbo da folha (MARSCHNER, 1997; LOPES, 1998).

As faixas de interpretação de S utilizadas em quase todas as regiões do Brasil indicam que solos com teores “disponíveis” acima de 10 mg dm^{-3} de S têm menor probabilidade de responder à adição de adubos contendo este elemento (RAIJ et al., 1996; REIN; SOUSA, 2004; COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC, 2004). Malavolta e Moraes (2007) reuniram resultados de 30 ensaios com 13 culturas, constatando também que praticamente não houve resposta a S em solos com mais de 10 mg dm^{-3} de SO_4^{2-} . De acordo com Vitti e Heinrichs (2007), a dose de S necessária para a maioria das culturas variam de 15 a 50 kg ha^{-1} . Culturas mais exigentes como crucíferas e liliáceas demandam doses médias de 70 a 80 kg ha^{-1} de S (ALVAREZ-V. et al., 2007). Na planta o teor de S varia de 1 a 15 g kg^{-1} , sendo as das famílias *Cruciferae* e *Liliaceae*, que apresentam os teores próximos à faixa superior (DUKE; REISENAUER, 1986).

2.6 Características e utilização de enxofre elementar

Cerca de 70% da produção mundial de S é obtido do S^0 (LOPES et al., 2010), embora não seja a principal fonte de S utilizada diretamente na agricultura, que emprega principalmente o SFS e o sulfato de amônio com 12% e 24% de S respectivamente. Entretanto, há uma tendência mundial na indústria de fertilizantes para mudar a produção dessas fontes contendo S para fontes mais concentradas em NPK, como MAP, DAP ou uréia. Os fertilizantes contendo S e formulações NPK feitas a partir de SFS e sulfato de amônio são menos concentrados em macronutrientes primários elevando o custo da adubação. Dessa

forma o S^0 pode ser uma opção em decorrência do alto conteúdo de S (85 a 99%) (CANTARELLA; MONTEZANO 2010).

O S é encontrado na natureza em diferentes estados de oxidação, variando de -2 a +6, conforme Tabela 2.1, adaptado de Suzuki (1999).

Tabela 2.1 - Estados de oxidação de formas de S inorgânicas

-2	0	+2	+4	+6
H_2S	S^0	(SO)	SO_2	SO_3
Sulfeto de Hidrogênio	S elementar	Monóxido de Enxofre	Dióxido de Enxofre	Trióxido de Enxofre
HS^-	S^0	H_2SO_2	H_2SO_3	H_2SO_4
		Ácido sulfoxílico	Ácido sulfuroso	Ácido sulfúrico
			SO_3^{2-}	SO_4^{2-}
			Sulfito	Sulfato

O S^0 é o produto da oxidação do sulfeto de hidrogênio (H_2S), sendo uma forma estável. O monóxido de enxofre (SO) e sua forma hidratada, ácido sulfoxílico (H_2SO_2) são produtos intermediários instáveis entre o S^0 e o dióxido de enxofre (SO_2). O SO_2 é um gás altamente solúvel em água que dá origem ao ácido sulfuroso (H_2SO_3) e sua forma dissociada sulfito (SO_3^{2-}). A forma mais oxidada do S, que apresenta valência +6, é o trióxido de enxofre (SO_3) formado pela junção do SO_2 e um oxigênio, na presença de um catalisador, sendo sua forma hidratada o ácido sulfúrico (H_2SO_4) e sua forma dissociada o íon sulfato (SO_4^{2-}) (SUZUKI, 1999).

O S^0 não é prontamente disponível para as plantas, necessita ser oxidado no solo a sulfato (SO_4^{2-}) forma que as plantas absorvem o nutriente (JANZEN; BETTANY, 1987). A oxidação do S^0 pode ocorrer de forma abiótica ou por atividade biológica, reações catalisadas por microrganismos que são os principais agentes no processo de oxidação (HOROWITZ; MEURER 2006). Vários grupos de microrganismos podem oxidar o S^0 no solo, embora os mais importantes na maioria dos solos aeróbicos são os quimioautotróficos, como, por exemplo, as bactérias do gênero *Thiobacillus* e heterotróficos que compõem um grande grupo de bactérias e fungos (GERMIDA; JANZEN, 1993).

Diversos fatores podem afetar a taxa de oxidação do S^0 nos solos, sendo os principais pH, granulometria, disponibilidade de nutrientes, aeração, tamanho das partículas, umidade e tipo de solo (SCHERER, 2001; SOLBERG et al., 2003). Há uma relação positiva entre o pH inicial do solo e a taxa de oxidação do S^0 , a qual quanto maior o pH maior a oxidação (LAWRENCE; GERMIDA, 1988; HOROWITZ, 2003). Segundo Barrow (1971), a

capacidade do solo em tamponar o ácido sulfúrico formado na oxidação, pode ser determinante para este comportamento, uma vez que altas concentrações do ácido podem inibir a atividade dos microorganismos oxidantes. Segundo Skiba e Wainwright (1984), em temperaturas médias de 30 a 40 °C ocorrem maiores taxas de oxidação. Deng e Dick (1990), avaliando a oxidação em quatro solos nos Estados Unidos, verificaram que temperaturas entre 25 e 30° C proporcionaram maiores taxas de oxidação. Janzen e Bettany (1987) relataram que em regiões frias, a eficiência de fertilizantes com S^0 é baixa, com temperaturas menores que 15 °C. Solberg et al. (2005a) verificaram que a taxa de oxidação do S^0 aumenta com umidade de 40% a 90% da capacidade de campo. Tamanhos menores de partículas do S^0 também proporcionam maiores taxas de oxidação (SOLBERG et al., 2005b). Donald e Chapman (1998) constataram que a taxa de oxidação foi maior para partículas com tamanho inferior a 0,048 mm, quando comparadas com partículas com tamanho inferior a 0,125 mm.

Yang et al. (2008) em um experimento de incubação para determinar o efeito de aplicações sucessivas de S^0 , observaram que, após cada aplicação, houve aumento na população microbiana de *Thiobacillus*, altamente correlacionada com o teor de SO_4^{2-} extraível do solo. Vários autores encontraram resultados semelhantes, em que, após as primeiras aplicações de S^0 ao solo, houve efeito estimulante na taxa de oxidação das aplicações posteriores, provavelmente devido ao aumento da população de microorganismos, proporcionando maior capacidade do solo em oxidar o S^0 , disponibilizando SO_4^{2-} para a cultura (NOVELL; WAINWRIGHT, 1987; SOLBERG et al., 2003; LI et al., 2005).

Horowitz (2003), avaliando a taxa de oxidação de S^0 em amostras de 42 solos coletadas em vários estados do Brasil, verificou que todos os solos avaliados possuíam capacidade de oxidar o S^0 . As taxas de oxidação obtidas variaram entre 1,95 e 21,89 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de S^0 . Segundo o autor, é muito provável que na maior parte do território do Brasil, o S^0 apresente elevada eficiência, principalmente se aplicado na forma de pó fino, pelas condições favoráveis que apresenta, principalmente de temperatura e umidade, favoráveis para a oxidação do S^0 .

Referências

ALVAREZ-V., V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C.H.; PEREIRA, N.F. Enxofre. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 595-646.

BARBER, S.A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. **Soil Science**, Baltimore, v. 93, p. 39-49, 1962.

BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 183-230, 1985.

BARROW, N.J. Slowly available sulphur fertilizers in south-western Australia. I. Elemental sulphur. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, Collingwood, v. 2, p. 211-216, 1971.

BEGUM, M.; NARAYANASAMY, G.; BISWAS, D.R. Phosphorus supplying capacity of phosphate rocks as influenced by compaction with water-soluble P fertilizers. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 68, p. 73-84, 2004.

BINGHAM, F.T. Phosphorus. In: CHAPMAN, H.D. (Ed.). **Diagnostic criteria for plants and soils**. Abilene: Homer D. Chapman, 1966. p. 324-361.

BRAGA, N.R.; MASCARENHAS, H.A.A.; FEITOSA, C.T.; HIROCE, R.; RAIJ, B. van. Efeitos de fosfatos sobre o crescimento e produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, p. 36-39, 1980.

BRAGA, N.R.; MASCARENHAS, H.A.A.; BULISANI, E.A.; RAIJ, B. van; FEITOSA, C.T.; HIROCE, R. Eficiência agrônômica de nove fosfatos em quatro cultivos consecutivos de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 315-319, 1991.

BRASIL Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa para fertilizantes minerais, N° 05, de 23 de fevereiro de 2007**. Brasília, 2007.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z.F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI - Brasil, 2010. v. 2, cap. 1, p. 5-46.

CHIEN, S.H. Dissolution of phosphate rock in a flooded acid soil. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 41, p. 1106-109, 1977.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, p. 227-234, 1995.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G.; BILLINGHAM, K.S. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1173-1177, 1996.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO – RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, EMBRAPA-CNPT, 2004. 394 p.

COUTINHO, E.L.M.; NATALE, W.; VILLA NOVA, A.S.; SITTA, D.S.X. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, p. 1393-1399, 1991.

DENG, S.; DICK, R. P. Sulfur oxidation and rhodanese activity in soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 150, n. 2, p. 552-560, 1990.

DIAMOND, R.B. Views on marketing of phosphate rock for direct application. In: SEMINAR ON PHOSPHATE ROCK FOR DIRECT APPLICATION, 1979, Muscle Shoals, **Proceedings...** Muscle Shoals, 1979. p. 448-463. (Special Publication, 1).

DONALD, D.; CHAPMAN, S. J. Use of powdered elemental sulphur as a sulphur source for grass and clover. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madison, v. 29, n. 9-10, p. 1315-1328, 1998.

DUKE, S.H.; REISENAUER, H.M. Roles and requirements of sulfur in plant nutrition. In: **Sulfur in agriculture**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1986. p. 123-168. (Agronomy Monography, 27).

DYNIA, J.F. **Efeito do pH e da capacidade de retenção de fósforo dos solos na eficiência de adubos fosfatados**. 1977. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. Mineral metabolism. In: _____. **Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. p. 201-242.

EVANS, J.; MCDONALD, L.; PRICE, A. Application of reactive phosphate rock and sulphur fertilisers to enhance the availability of soil phosphate in organic farming. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 75, p. 233-246, 2006.

FRANDOLOSO, J.F.; LANA, M.C.; FONTANIVA, S. CZYCZA, R.V. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, p. 686-694, 2010.

FRANZINI, V.T; MURAOKA, T.; CORASPE-LEON, H.M.; MENDES, F.L. Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 9, p. 1092-1099, 2009.

GERMIDA, J.J.; JANZEN, H.H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. **Fertilizer Research**, Wageningen, v. 35, p. 101-114, 1993.

GOEDERT, W.J.; LOBATO, E. Eficiência agronômica de fosfatos em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 97-102, 1984.

HAMMOND, L.L.; LEON, L.A. Agronomic effectiveness of natural and altered phosphatite rocks from America Latina. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON PHOSPHORUS COMPOUNDS, 3, 1983, Brussels. **Proceedings...** Brussels: World Phosphate Institute, 1983. p. 503-518.

HAMMOND, L.L.; CHIEN, S.H.; ROY, A.H.; MOKWUNYE, A.U. Solubility and agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rocks as influenced by their iron and aluminum oxide contents. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 19, p. 93-98, 1989.

HOROWITZ, N. **Oxidação e eficiência agronômica do enxofre elementar em solos do Brasil**. 2003. 111 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 822-828, 2006.

JANZEN, H.H.; BETTANY, J.R. The effect of temperature and water potential on sulfur oxidation in soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 144, n.2, p.81-89, 1987.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo**. Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31 p. (Boletim Técnico).

KORNDÖRFER, G.H.; LARA-CABEZAS, W.A.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, p. 391-396, 1999.

LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 19, p. 151-210, 1967.

LAWRENCE, J.R.; GERMIDA, J.J. Relationship between microbial biomass and elemental sulfur oxidation in agricultural soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 52, p. 672-677, 1988.

LEHR, J.R.; McCLELLAN, G.H. **A revised laboratory reactivity scale for evaluating phosphate rocks for direct application**. Muscle Shoals: National Fertilizer Development Center, TVA, 1972. 36 p. (Bulletin, Y-43).

LÉON, L.A.; FENSTER, W.E.; HAMMOND, L.L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Perú and Venezuela. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 798-802, 1986.

LI, S.; LIN, B.; ZHOU, W. Effects of previous elemental sulfur applications on oxidation of additional applied elemental sulfur in soils. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 42, p. 146-152, 2005.

LOPES, A.A.; DAHER, E.; BASTOS, A.R.R.; GUILERME, L.R.G. Suprimento e extensão das reservas de nutrientes no Brasil. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI - Brasil, 2010. v. 2, cap. 5, p. 283-305.

LOPES, A.S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. Piracicaba: Potafos, 1998. 177 p.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M.F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: Internacional Plant Nutrition Institute, 2007. p. 189-249.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201p.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of higher plants**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1997. 889 p.

MENON, R.G.; CHIEN, S.H. Phosphorus availability to maize from partially acidulated phosphate rocks and phosphate rocks compacted with triple superphosphate. **Plant and Soil**, The Hague, v. 127, p. 123-128, 1990.

NASCIMENTO, J.A.L.; MORELLI, M. Enxofre em solos do Rio Grande do Sul. I. Formas nos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 3, p. 131-135, 1980.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

NOVELL, W.; WAINWRIGHT, M. Influence of soil moisture on sulphur oxidation in brown earth soils exposed to atmospheric pollution. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 5, p. 209-214, 1987.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; PROCHNOW, L.I.; KLEPKER, D. Soybean yield in response to application of phosphate rock associated with triple superphosphate. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n.3, p. 376-385, 2011.

PARFITT, R.L.; SMART, R.S.C. The mechanism of sulphate adsorption on iron oxides. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, n. 1, p. 48-50, 1978.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAJAN, S.S.S. Ways of improving the agronomic effectiveness of phosphate rocks, In: ZAPATA, F.; ROY, R.N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004. p. 85-97.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 57, p. 77-159, 1996.

REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. Adubação com enxofre. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. p. 227-242.

SAIK, R.D. The evolution of a sulphur bentonite fertilizer: one company's perspective. **Sulphur in Agriculture**, Washington, v. 19, p. 74-77, 1995.

SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 263-310.

SCHERE, H.W. Sulphur in crop production (invited paper). **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 14, p. 81-111, 2001.

SKIBA, U.; WAINWRIGHT, M. Oxidation of elemental-S in coastal-dune sands and soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 77, p. 87-95, 1984.

SOLBERG, E.D.; MALHI, S.S.; NYBORG, M.; GILL, K.S. Temperature, soil moisture, and antecedent sulfur application effects on recovery of elemental sulfur as SO_4^{2-} in incubated soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madison, v. 36, p. 863-874, 2005.

SOLBERG, E.D.; MALHI, S.S.; NYBORG, M.; GILL, K.S. Fertilizer type, tillage, and application time effects on recovery of sulfate-s from elemental sulfur fertilizers in fallow field soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, n. 5, p. 815-830, 2003.

SOLBERG, E.D.; MALHI, S.S.; NYBORG, M.; GILL, K.S.; HENRIQUEZ, B. Source, application method, and cultivation effects on recovery of elemental sulfur as sulfate-s in incubated soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madison, v. 36, p. 847-862, 2005.

SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.; LOBATO, E. Eficiência agrônômica do fosfato natural de Gafsa em um Latossolo de Cerrado com a cultura da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, Brasília. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. 1 CD-ROM.

_____. Solubilidade e eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um latossolo de cerrado. In: SIMPOSIO NACIONAL CERRADO, 9.; SIMPOSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS, 2., 2008, Brasília. **Anais...** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. CD-ROM.

SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.; GOEDERT, W.J.; LOBATO, E.; NUNES, R.S. Fósforo. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI - Brasil, 2010. v. 2, p. 71-126.

STIPP, S.R.; CASARIN, V. **A importância do enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. p. 14-20. (Informações Agronômicas, 129).

SUZUKI, I. Oxidation of inorganic sulfur compounds: chemical and enzymatic reactions. **Canadian Journal of Microbiology**, Ottawa, v. 45, p. 97-105, 1999.

SYERS, J.K.; MACKAY, A.D.; BROWN, M.W.; CURRIE, L.D. Chemical and physical characteristics of phosphate rock materials of varying reactivity. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Barking, v. 37, p. 1057-1064, 1986.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HAVLIN, J.L. **Soil fertility and fertilizers**. 5th ed. New York: Mucmillan, 1993. 634 p.

VITORINO, A.C.T.; SOUZA, L.C.F.; VITORINO, P.F.P.G.; JOENCK, V. Efeito da aplicação de diferentes doses de fosfatos naturais reativos na produção de soja. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DE SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23., 1998, Caxambu. **Anais...** Lavras: UFLA; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; SBM, 1998. p. 82.

VITTI, G.C.; HEINRICHS, R. Formas alternativas de obtenção e utilização do nitrogênio e do enxofre: uma visão holística. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 109-160.

YANG, Z.; HANEKLAUS, S.; SINGH, B.R.; SCHNUG, E. Effect of repeated applications of elemental sulfur on microbial population, sulfate concentration, and ph in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madison, v. 39, p. 124-140, 2008.

3 APLICAÇÃO DE FOSFATOS NATURAIS ASSOCIADOS A ENXOFRE ELEMENTAR NAS CULTURAS DO FEIJÃO E ARROZ

Resumo

Utilizações adequadas e alternativas que busquem melhorias da eficiência das fontes de fósforo (P) são de grande importância para o manejo da fertilização fosfatada. Objetivou-se com esse trabalho avaliar o efeito do modo de aplicação e eficiência de fosfatos naturais (FNs) em associação com enxofre elementar (S^0), no fornecimento de P para as culturas do arroz e feijão, e contabilizar o efeito do enxofre elementar sobre o aumento da absorção de P dos FNs, utilizando o método da diluição isotópica com ^{32}P . Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação utilizando o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris*, L.), cultivar Pérola, e o arroz de terras altas (*Oryza sativa* L.), cultivar BRS Primavera. Os experimentos foram arranjados em delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial $5 \times 2 + 1$, sendo cinco fontes de P constituídas a partir do: super fosfato triplo (SFT), fosfato natural de Patos de Minas (FNP), fosfato natural reativo de Gafsa (FNG) e das associações do FNP + S^0 e FNG + S^0 , com dois modos de aplicação: área total e localizado, mais um tratamento controle (tratamento adicional) sem aplicação de P. Foram avaliados os parâmetros: massa seca da parte aérea (MSPA), P acumulado na MSPA, aproveitamento do P das fontes, pH do solo, e o incremento na absorção do P dos FNs em função da aplicação do S^0 . A acidez gerada da oxidação de S^0 promoveu aumento na solubilização do FNG e do FNP, melhorando a disponibilidade do P a partir dessas fontes, o efeito sendo maior quando os fertilizantes foram aplicados em contato, localizados no solo. Quando utilizados isoladamente a aplicação em área total proporcionou maior eficiência do FNG e do FNP, comparada à aplicação localizada. Na cultura do arroz o aproveitamento do P do SFT e o seu acúmulo foram maiores quando aplicado em área total, enquanto que na cultura do feijão maiores valores foram verificados quando aplicado localizado no solo. A aplicação do S^0 não modificou o pH do solo.

Palavras-chave: Diluição isotópica ^{32}P ; Fertilizantes fosfatados; Fosfato natural de Patos de Minas; Fosfato natural reativo de Gafsa

Abstract

Appropriate use and seeking alternative for improving efficiency of the sources of phosphorus (P) are of great importance for managing of P fertilization. The objective of this study was to evaluate the effect of the application methods and efficiency of phosphate rocks (PRs) combined with elemental sulfur (S^0) in supplying P to rice and beans crops, and to quantify the effect of elemental sulfur on the absorption of P from PRs, using the ^{32}P dilution technique. Two experiments were conducted in greenhouse with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Pérola cultivar, and upland rice (*Oryza sativa* L.) BRS Primavera cultivar. The experiment were arranged in a completely randomized $5 \times 2 + 1$ design with four replications, with five treatments consisting of three P sources: Triple superphosphate (TSP), Patos de Minas phosphate rock (PPR), reactive Gafsa phosphate rock (GPR) and associations of the PPR + elemental sulfur (S^0) and GPR + S^0 with two different forms of application: total area and located, plus a control (additional treatment) without application of P. The following parameters were evaluated: shoot dry matter, P uptake, P recovery, soil pH, and absorption of P from phosphates rock as a function of the application of elemental sulfur. The acidity generated by oxidation of elemental sulfur led to increase in solubilization of GPR and PPR,

increasing the availability of phosphorus from these sources, and this effect was greater when fertilizers were applied in contact, located on the soil. When used sole the efficiency of GPR and of PPR were better applied in to total area, compared to localized application. In rice the highest utilization and accumulations of P was obtained from TSP applied in total area, while in the bean, the highest values were observed when applied located in soil. The application of elemental sulfur did not modify the pH of the soil.

Keywords: ^{32}P isotopic technique; Phosphate fertilizers; Patos de Minas phosphate rock; Gafsa phosphate rock

3.1 Introdução

O feijão e o arroz compõem a base de alimentação da população brasileira, contribuindo significativamente como fontes de proteínas e calorias. Na média anual dos últimos dez anos o feijão e arroz ocuparam, respectivamente, a terceira (4,05 milhões de ha) e a quarta (3,07 milhões de ha) posição entre culturas graníferas mais plantadas no Brasil, com média de produção de 11,66 (arroz) e 3,19 (feijão) milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2012). O feijão é rico em aminoácido essencial lisina, porém, pobre em aminoácidos sulfurados. Essa deficiência é suprida por cereais, especialmente o arroz, tornando a tradicional dieta brasileira complementar, no que se refere aos aminoácidos essenciais.

O feijoeiro é cultivado em todas as regiões brasileiras e o arroz de terras altas concentra-se na região dos cerrados. O P é o nutriente mais deficiente na maioria dos solos brasileiros, em especial nos solos do cerrado. Isso ocorre devido a natural escassez e pela grande capacidade de “fixação” do P pelo solo, exigindo elevadas quantidades de fertilizantes fosfatados nos sistemas de cultivo.

Os fosfatos solúveis, com o P prontamente disponível, como o SFS, SFT, MAP e DAP, são as fontes de P mais utilizadas no Brasil e em todo mundo e apresentam, em geral, elevada eficiência agrônômica. Porém, para a obtenção desses produtos é necessário matéria prima com baixos teores de impurezas e elevado teor do nutriente, aumentando o seu custo. Além disso, em solos que possuem elevada capacidade de fixação, o P proveniente de fertilizantes totalmente solúveis, pode rapidamente ser adsorvido pelo solo ou precipitado formando compostos de menor solubilidade (NOVAES; SMYTH, 1999).

Os fosfatos naturais (FN) brasileiros e os fosfatos naturais reativos (FNR) importados são fontes alternativas de baixo custo para adubação fosfatada. Entretanto, sabe-se que essas fontes apresentam baixa eficiência agrônômica, principalmente em culturas anuais que demandam alto conteúdo de P em curto espaço de tempo (RESENDE et al., 2006; NOVAIS et

al., 2007). Os resultados mais satisfatórios da utilização direta na agricultura dessas fontes têm sido para os FNR, por serem de origem sedimentar e de alta reatividade. Quando a sua aplicação é realizada a lanço, pelo seu maior contato com solo, permite reagir melhor com prótons (H^+) que atuam na solubilização da rocha, além de proporcionar que maior porção do sistema radicular entre em contato com o fertilizante, conforme observado por Corrêa et al. (2005). Os FN brasileiros, por serem de baixa reatividade, têm apresentado baixa eficiência agronômica mesmo quando aplicados a lanço e incorporado, como verificado por Coutinho (1991) para o fosfato natural de Patos de Minas.

Em culturas anuais, a adubação fosfatada é praticamente toda realizada com fontes aciduladas e no sulco de plantio. Já para os fosfatos naturais, vários autores têm estudado a aplicação no sulco de plantio e verificado baixa eficiência (MOTOMIYA, 2004; CORRÊA, 2005; RESENDE, 2006; OLIVEIRA JUNIOR; PROCHNOW e KLEPKER, 2008; FRANZINI et al., 2009) e isso ocorre devido o menor contato do fertilizante com o solo.

Uma das alternativas para melhorar a eficiência dos fosfatos naturais é por meio da aplicação junto com enxofre elementar (S^0). O S^0 é oxidado a sulfato no solo, reação que ocorre principalmente por ação de microorganismos, segundo o seguinte modelo empírico: $S^0 + CO_2 + 0,5 O_2 + 2 H_2O \rightarrow [CH_2O] + SO_4^{2-} + 2H^+$ (SAIK, 1995; ALVAREZ-V. et al., 2007), promovendo a liberação de prótons (H^+) e consequentemente acidificando o meio. O princípio do uso dos fosfatos naturais associado ao S^0 é utilizar a acidez gerada da oxidação, para auxiliar na solubilização da rocha (RAJAN, 2004). Existem poucos estudos no Brasil com relação à aplicação de fosfatos naturais associados a S^0 , e são raros os trabalhos que estudaram o modo de aplicação dessa associação.

Com base no exposto, objetivou-se com esse trabalho avaliar o efeito do modo de aplicação do fosfato natural reativo de Gafsa (FNG) e do fosfato natural de Patos de Minas (FNP) aplicados isoladamente ou em associação com enxofre elementar, tendo como referência o superfosfato triplo, no aproveitamento do P por plantas de arroz e feijão, e contabilizar o efeito do enxofre elementar sobre o aumento da absorção de P dos fosfatos naturais, utilizando o método da diluição isotópica com ^{32}P .

3.2 Material e métodos

Dois experimentos utilizando como culturas testes o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris*, L.), cultivar Pérola, e o arroz de terras altas (*Oryza sativa* L.), cultivar BRS

Primavera, foram conduzidos em casa de vegetação com temperatura máxima e mínima de 35 e 22 °C, respectivamente, em Piracicaba, SP.

O solo utilizado nos experimentos foi coletado na camada de 0 a 0,2 m no município de Piracicaba-SP, sendo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2006). As amostras de terra foram secas ao ar, peneiradas em malha de 2 mm e determinadas as propriedades químicas (Tabela 3.1) de acordo com o sistema IAC de análises de solo (RAIJ et al., 2001). A caracterização granulométrica apresentou respectivamente, 251, 43 e 706 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, sendo o solo classificado como de textura médio-argilosa conforme Camargo et al. (1986).

Tabela 3.1 - Características químicas das amostras de solo utilizadas nos experimentos

pH	MO	P	S	K⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	Al³⁺	H+Al	SB	T	V	m
CaCl ₂	g dm ⁻³	— mg dm ⁻³ —					mmol _c dm ⁻³				— % —	
4,5	32	5	3	0,9	12	6	2	47	19,1	66	29	11
B			Cu			Fe		Mn			Zn	
						mg dm ⁻³						
0,13			0,9			109		4,7			1,6	

Foram utilizados vasos plásticos, revestidos com sacos plásticos e com capacidade de 2,5 L, que foram preenchidos com 2,0 kg de terra peneirada. Com base na análise química do solo foi realizada calagem, aplicando-se calcário com PRNT 95 % (27,50 % CaO e 18,5 % MgO) com objetivo de elevar a saturação por bases a 50 % para o experimento com arroz e 70% para o experimento com feijão (RAIJ et al., 1997). Em seguida o solo foi incubado por 30 dias mantendo a umidade em aproximadamente 70 % da capacidade máxima de retenção de água. Após o período de incubação foram novamente analisados o pH² do solo que revelou 4,9 e 5,5 respectivamente, para o solo preparado para o experimento com arroz e feijão.

Os experimentos foram arranjos em delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial 5 x 2 + 1, sendo 5 tratamentos constituídos a partir de cinco fontes de fósforo (P): superfosfato triplo (SFT), fosfato natural de Patos de Minas (FNP), fosfato natural reativo de Gafsa (FNG) e FNP + enxofre elementar (S⁰) e FNG + S⁰, com 2 modos de aplicação: área total e localizado, mais um tratamento controle (tratamento adicional) sem aplicação de P (Tabela 3.2).

² Média de cinco repetições para cada cultura, pH analisado em CaCl₂ 0,01 M.

Tabela 3.2 - Tratamentos propostos para os experimentos, utilizando como culturas testes o arroz de terras altas e o feijoeiro comum

Tratamento	⁽¹⁾ Fontes de P e S	Modo de aplicação	Tratamento	Fontes de P e S	Modo de aplicação
1	SFT	localizado	7	FNG + S ⁰	localizado
2	SFT	área total	8	FNG + S ⁰	área total
3	FNG	localizado	9	FNP + S ⁰	localizado
4	FNG	área total	10	FNP + S ⁰	área total
5	FNP	localizado	Controle	-	-
6	FNP	área total			

⁽¹⁾ SFT: Superfosfato triplo; FNG: Fosfato natural reativo de Gafsa; FNP: Fosfato natural de Patos de Minas; S⁰: Enxofre elementar.

Os fertilizantes foram caracterizados segundo metodologia oficial de análises de fertilizantes, corretivos, inoculantes, substratos e contaminantes do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2007) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Caracterização dos fertilizantes

Fertilizante	Teor de P ₂ O ₅			P total
	⁽¹⁾ Total	⁽²⁾ AC	⁽³⁾ CNA+H ₂ O	
	%			
Superfosfato triplo	44,6	-	43,2	19,5
Fosfato natural reativo de Gafsa	27,2	10,1	-	11,9
Fosfato natural de Patos de Minas	24,1	4,1	-	10,5

⁽¹⁾ Solubilizado com ácido clorídrico;

⁽²⁾ Fração solúvel em ácido cítrico (2%);

⁽³⁾ Fração solúvel em citrato neutro de amônio + água (9:1);

- Não analisado.

As fontes de P e o S⁰ foram aplicadas nas doses de 100 mg kg⁻¹ de P e 75 mg kg⁻¹ de S, respectivamente, com base no P e S total das fontes. Os tratamentos que não foram aplicados S⁰, receberam dose equivalente de S na forma de sulfato de magnésio. A aplicação dos fertilizantes referente aos tratamentos foi realizada no mesmo momento da semeadura.

Nos tratamentos com aplicação denominada de área total os fertilizantes foram aplicados na superfície do solo e incorporados através da agitação do saco plástico com solo, simulando a aplicação a lanço e posterior incorporação. Na forma localizada, os fertilizantes foram aplicados no solo a cerca de 5 cm de profundidade em faixa. Nos tratamentos FNG + S⁰ e FN + S⁰ os fertilizantes foram aplicados juntos em contato físico.

Para a quantificação do P absorvido pelas plantas, proveniente do SFT, FNG e FNP foi utilizado nos experimentos o método da diluição isotópica com ^{32}P marcando o solo (método indireto). A marcação do solo foi realizada através de 25 g de areia, que receberam 9,62 MBq de ^{32}P livre de carregador. A areia foi adicionada em cada saco plástico contendo os 2,0 kg de solo e posteriormente homogeneizada com o solo, por meio de agitação vigorosa. A aplicação foi realizada após os 30 dias de incubação da calagem, e em seguida a aplicação da areia o solo foi novamente mantido incubado por 10 dias para que ocorresse o equilíbrio isotópico entre o ^{32}P e ^{31}P .

A partir da interpretação da análise de solo verificou-se que apenas o B dos micronutrientes e o K dos macronutrientes^{/3} estavam abaixo dos teores adequados no solo, sendo assim, antes da semeadura foi realizada uma adubação básica na forma de solução com 150 mg kg⁻¹ de K (cloreto de potássio) e aplicação de micronutrientes também na forma de solução nas doses de 2,0 mg kg⁻¹ de B (ácido bórico) e 1 mg kg⁻¹ de Mo (molibdato de amônio tetra hidratado).

Foram semeadas a aproximadamente 1,5 cm de profundidade cinco e sete sementes por vaso, para o experimento com feijão e arroz, respectivamente, e desbastadas para duas plantas cinco dias após a emergência (DAE) em ambos os cultivos. Aos 10 e 25 DAE foram realizadas adubações de cobertura com 50 mg kg⁻¹ de N (ureia). Durante a condução dos experimentos a umidade do solo foi mantida a aproximadamente 70% da capacidade máxima de retenção de água.

As partes aéreas do feijão e arroz foram cortadas, respectivamente, aos 40 e 59 dias após a semeadura. As plantas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 60° C por três dias, procedendo-se a pesagem em balança analítica com exatidão de 0,01 g para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA) e posterior moagem das mesmas em moinho tipo Willey. As amostras foram submetidas à digestão nitroperclórica e no extrato foi determinada a atividade do ^{32}P , por meio do contador de cintilação em meio líquido, por efeito Cerenkov (VOSE, 1980) e a concentração de P determinada pelo método colorimétrico do metavanadato e molibdato, seguindo os procedimentos descritos por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

O P acumulado foi determinado considerando-se a concentração de fósforo (g kg⁻¹) e MSPA. O P na planta proveniente do FNP, FNG e SFT e o aproveitamento do P dessas

^{/3} Os nutrientes P e S, também estavam abaixo dos teores considerados adequados no solo. Entretanto, o P foi o objetivo do estudo, sendo fornecido pelos tratamentos e o S foi fornecido por meio do S⁰ e pelo sulfato de magnésio nos tratamentos que não receberam S⁰.

fontes, foram calculados de acordo com o método da diluição isotópica do ^{32}P , descrito por Chien et al., (1996) e Franzini et al., (2009) conforme eq. (1), (2), (3) e (4).

Atividade específica de ^{32}P nas plantas:

$$AE = \frac{{}^{32}\text{P}}{{}^{31}\text{P}} \quad (1)$$

Em que:

AE = É a atividade específica (DPM μgP^{-1});

^{32}P = É a atividade do radioisótopo ^{32}P na planta (DPM);

^{31}P = É o conteúdo de P na planta (μg de P planta $^{-1}$).

Fração, percentagem e total de P absorvido dos fertilizantes (FNP, FNG ou SFT):

$$F_{\text{FPF}} = 1 - \left[\frac{AE_{\text{P(FNP, FNG ou SFT) + (solo)}}}{AE_{\text{P(solo)}}} \right] \quad (2)$$

$$\%P_{\text{PPF}} = 100 F_{\text{FPF}} \quad (3)$$

$$P_{\text{F}} = P_{\text{(FNP, FNG ou SFT)+(Solo)}} F_{\text{FPF}} \quad (4)$$

Em que:

F_{FPF} = fração do P absorvido do fertilizante (FNP, FNG ou SFT);

$AE_{\text{P(FN, FNR ou SFT + solo)}}$ = Atividade específica do P na planta absorvido do (FNP, FNG ou SFT) + (solo);

$AE_{\text{P(solo)}}$ = Atividade específica do P na planta absorvido do solo;

P_{F} = P absorvido do fertilizante (FNP, FNG ou SFT);

$P_{\text{(FN, FNR ou SFT + solo)}}$ = P absorvido do (FNP, FNG ou SFT) + (solo);

$\%P_{\text{PPF}}$ = % de P na planta proveniente do fertilizante (FNP, FNG ou SFT).

O aproveitamento do P dos fertilizantes (FNP, FNG ou SFT) (APpf (%)), ou eficiência da fonte fosfatada para as plantas foi determinada pela eq. (5):

Aproveitamento:

$$AP_{pf}(\%) = \frac{P_{PPF}}{P_{aplicado}} 100 \quad (5)$$

Em que:

P_{PPF} = É quantidade de P na planta proveniente do fertilizante (FNP, FNG ou SFT) (mg);

$P_{aplicado}$ = É quantidade de P aplicado ao solo proveniente do fertilizante (FNP, FNG ou SFT) (mg).

A eficiência agrônômica relativa (EAR) foi calculada com os valores de produção da MSPA e P acumulado na MSPA, conforme a eq. (6):

Eficiência agrônômica relativa:

$$EAR(\%) = \frac{Y_1 - Y_0}{Y_2 - Y_0} 100 \quad (6)$$

Em que:

Y_0 : É a produção de MSPA ou P acumulado na MSPA no tratamento testemunha (sem aplicação P);

Y_1 : É a produção de MSPA ou P acumulado nos tratamentos com FNP, FNG ou do SFT em área total;

Y_2 : É a produção de MSPA ou P acumulado no tratamento padrão (SFT localizado).

Com auxílio do método da diluição isotópica e com a quantificação do P na planta proveniente dos fertilizantes: FNP ou FNG aplicados isoladamente ou como mistura (FNP + S^0 ou FNG + S^0), foi possível comparar e contabilizar o incremento na absorção P do FNP ou FNG em função da aplicação junto com S^0 , segundo a metodologia adaptada de Chien et al. (1996), eq. (7):

Quantificação do efeito do S^0 no incremento da absorção de P dos fosfatos naturais:

$$\text{Incremento}(\%) = \frac{(A - B)}{(B)} 100 \quad (7)$$

Em que:

Incremento: É o aumento da absorção de P dos FNP ou FNG em função da adição de S^0 (%);

A: É o P acumulado na MSPA proveniente do FNP ou FNG nos tratamentos FNP + S^0 ou FNG + S^0 , respectivamente;

B: É o P acumulado na MSPA proveniente dos tratamentos FNP ou FNG.

Para monitorar a influência do S^0 sobre a acidez do solo, após a colheita dos experimentos o solo de cada unidade experimental foi seco ao ar, destorroado, homogeneizado e retirado uma amostra que foi peneirada em malha de 2 mm, para posterior determinação do pH em cloreto de cálcio (RAIJ et al., 2001).

As análises estatísticas dos dados foram realizadas pela análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para verificar o efeito da aplicação do S^0 na absorção de P dos fosfatos naturais, os valores de P acumulado na MSPA proveniente do FNP e FNG aplicados isoladamente, foram comparados por contrastes e teste F, com os tratamentos em que os fosfatos naturais foram aplicados juntos com o S^0 (FNP+ S^0 e FNG+ S^0). As análises foram realizadas utilizando o pacote estatístico SAS[®] - “Statistical Analysis System” (SAS INSTITUTE, 1996).

3.3 Resultados e discussão

Foram verificadas respostas significativas dos tratamentos em termos de aumento da MSPA e P acumulado para as plantas de feijão e arroz (Tabela 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7), independente dos tratamentos com P e da forma de aplicação dos fertilizantes. Por meio do tratamento controle verifica-se também a baixa disponibilidade de P no solo.

Os tratamentos com SFT, independente do modo de aplicação e da cultura, foram superiores aos demais tratamentos quanto à produção de MSPA e P acumulado.

Tabela 3.4 - Efeito das fontes de fósforo e do modo de aplicação sobre a massa seca da parte aérea (MSPA), e sobre a eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes, em plantas de feijão ⁽¹⁾

Modo de aplicação																	
Fontes de P ⁽²⁾	Localizado								Área total				Média				
	MSPA				EAR				MSPA					EAR			
	(g vaso ⁻¹)				(%)				(g vaso ⁻¹)					(%)			
SFT	12,21	A	a	100	11,89	A	a	97	12,05	A							
FNG	3,66	C	b	16	5,37	B	a	32	4,51	C							
FNP	3,85	C	a	17	3,76	C	a	17	3,80	D							
FNG + S ⁰	6,74	B	a	46	5,81	B	b	37	6,27	B							
FNP + S ⁰	4,15	C	a	20	3,32	C	b	12	3,72	D							
Média	5,44		a		5,37		a										
Controle	2,08	**															
CV (%)	8,15																

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfósforo Triplo; FNG: Fósforo Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fósforo Natural [Patos de Minas/MG];

** Média do tratamento testemunha difere em relação à média do fatorial pelo teste F, ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 3.5 - Efeito das fontes de fósforo e do modo de aplicação sobre a massa seca da parte aérea (MSPA), e sobre a eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes, em plantas de arroz ⁽¹⁾

Fontes de P ⁽²⁾	Modo de aplicação										Média	
	Localizado					Área total						
	MSPA (g vaso ⁻¹)		EAR (%)			MSPA (g vaso ⁻¹)		EAR (%)				
SFT	12,60	A	a	100		12,01	A	a	95		12,30	A
FNG	3,96	C	b	22		8,89	C	a	67		6,42	C
FNP	2,25	D	a	7		2,12	D	a	6		2,18	D
FNG + S ⁰	8,83	B	b	66		10,42	B	a	80		9,62	B
FNP + S ⁰	3,60	CD	a	19		2,28	D	b	7		2,94	D
Média	6,25		b			7,15		a				
Controle	1,48	**										
CV (%)	11,10											

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfósforo Triplo; FNG: Fósforo Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fósforo Natural [Patos de Minas/MG];

** Média do tratamento testemunha difere em relação à média do fatorial pelo teste F, ao nível de 1% de probabilidade.

Para o P acumulado, na cultura do feijão, o SFT quando aplicado localizado ao solo foi superior ao SFT aplicado em área total (Tabela 3.6). Entretanto, na cultura do arroz, o P acumulado no tratamento com SFT em área total foi superior ao SFT localizado (Tabela 3.7).

A diferença no desenvolvimento do sistema radicular do arroz (gramínea) e feijão (leguminosa) foi, possivelmente, o fator determinante para a resposta diferenciada das culturas, em função do modo de aplicação do SFT, fonte totalmente solúvel. O arroz possui sistema radicular bastante vigoroso e denso, típico das gramíneas, permitindo explorar maior volume de solo e consequentemente aumentando o contato com o fertilizante fosfatado, resultando em maior absorção e acúmulo de P, comparado ao feijão. O contato entre a maior quantidade de raízes e o fertilizante fosfatado reduz a distância a ser percorrida do P até as raízes. E por ser relativamente imóvel no solo, este contato maior do P com a raiz aumenta a eficiência de utilização dos adubos fosfatados (KLEPKER; ANGHINONI, 1993; BARRETO; FERNANDES, 2002), podendo compensar os processos relacionados à transformação do P para formas não lábeis (OLIVEIRA JUNIOR; PROCHNOW; DIRCEU KLEPKER, 2008).

Por outro lado, na cultura do feijão, que não apresenta sistema radicular tão vigoroso como o arroz, a aplicação em área total de uma fonte totalmente solúvel, desfavoreceu a absorção de P, devido à competição do solo com a planta pelo P fornecido, resultando provavelmente em maior adsorção e precipitação (NOVAES; SMYTH, 1999; HAVLIN et al., 2005).

Barreto e Fernandes (2002) verificaram que a aplicação a lanço do SFT resultou em maior produtividade para a cultura do milho, comparado com a aplicação localizada do SFT. Vários autores (ANGHINONI; BARBER, 1980; NOVAIS et al., 1985; VASCONCELLOS et al., 1986; KLEPKER; ANGHINONI, 1995), em trabalhos em condições de campo e em casa de vegetação, também verificaram resposta superior para modo de aplicação em área total do fertilizante fosfatado na cultura do milho que como o arroz, é uma gramínea, atribuindo esse efeito positivo ao maior volume de raízes em contato com o adubo fosfatado no solo.

Tabela 3.6 - Efeito das fontes de fósforo e do modo de aplicação sobre o fósforo acumulado na massa seca da parte aérea (P acumulado), e sobre a eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes, em plantas de feijão ⁽¹⁾

Fontes de P ⁽²⁾	Modo de aplicação										Média
	Localizado					Área total					
	P acumulado			EAR	P acumulado			EAR			
	(mg vaso ⁻¹)			(%)	(mg vaso ⁻¹)			(%)			
SFT	31,44	A	a	100	28,98	A	b	92	30,21	A	
FNG	4,67	C	b	8	9,53	B	a	25	7,09	C	
FNP	5,09	C	a	10	4,98	C	a	9	5,03	D	
FNG + S ⁰	11,40	B	a	31	10,92	B	a	30	11,16	B	
FNP + S ⁰	5,60	C	a	11	5,20	C	a	10	5,40	D	
Média	10,07	a			10,31	a					
Controle	2,26	**									
CV (%)	7,52										

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

** Média do tratamento testemunha difere em relação à média do fatorial pelo teste F, ao nível de 1% de probabilidade.

O FNG aplicado em área total proporcionou resposta superior para MSPA e P acumulado nas plantas de feijão e arroz, em relação ao aplicado localizado (Tabela 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7). O maior contato com solo aumentou a solubilização do FNG e a disponibilidade de P para as plantas. É consagrado na literatura por trabalhos de diversos autores que o aumento do contato do solo com os fosfatos naturais, favorece a sua solubilização e consequentemente o fornecimento de P para as plantas (CHIEN; MENON, 1995; RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996; OLIVEIRA JUNIOR; PROCHNOW; DIRCEU KLEPKER, 2008; FRANZINI et al., 2009). Dois fatores estão relacionados com a maior eficiência dos fosfatos naturais aplicados em área total: a) permite maior contato e reação do fosfato natural com prótons (H⁺) que atuam na solubilização da rocha; b) permite que maior volume das raízes entre em contato com o fertilizante.

Tabela 3.7 - Efeito das fontes de fósforo e do modo de aplicação sobre o fósforo acumulado na massa seca da parte aérea (P acumulado), e sobre a eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes, em plantas de arroz ⁽¹⁾

Fontes de P ⁽²⁾	Modo de aplicação										Média
	Localizado					Área total					
	P acumulado (mg vaso ⁻¹)			EAR (%)	P acumulado (mg vaso ⁻¹)			EAR (%)			
SFT	20,93	A	b	100	23,45	A	a	113	22,19	A	
FNG	2,76	C	b	9	13,13	B	a	61	7,94	C	
FNP	1,47	C	a	3	1,76	C	a	4	1,61	D	
FNG + S ⁰	7,21	B	b	32	14,24	B	a	67	10,73	B	
FNP + S ⁰	2,38	C	a	7	2,12	C	a	6	2,24	D	
Média	6,95		b		10,94		a				
Controle	0,90	**									
CV (%)	11,81										

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

** Média do tratamento testemunha difere em relação à média do fatorial pelo teste F, ao nível de 1% de probabilidade.

Na cultura do arroz a amplitude da diferença, entre o FNG aplicado localizado (EAR para MSPA de 22% e 9% para o P acumulado) e em área total (EAR para MSPA 67% e 61% para o P acumulado), foi bem mais acentuada em relação à cultura do feijão, que apresentou EAR para MSPA de 16% e 8% para o P acumulado, na aplicação localizada, e com EAR para MSPA 32% e 25% para o P acumulado, quando aplicado em área total. Essa diferença entre as espécies demonstra mais uma vez que, para arroz, o maior contato de raízes com o fertilizante fosfatado favorece a absorção de P do fertilizante. É necessário ressaltar o baixo desempenho do FNG em fornecer P para o arroz e feijão quando aplicado localizado, sendo equiparado ao FNP aplicado localizado, fonte de menor reatividade. Mesmo os fosfatos naturais de origem sedimentar e de alta reatividade como o FNG, apresentam baixa eficiência quando aplicados localizados no solo, conforme constatado por Corrêa et al. (2005) e Franzini et al. (2009).

Para o FNP não foi verificada diferença significativa entre os modos de aplicação, nas plantas de feijão e arroz. O FNP também apresentou menor resposta da MSPA e P acumulado entre os tratamentos, para as plantas de feijão e arroz (Tabela 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7). De acordo com Prochnow et al. (2004) o FNP de Patos de Minas é reconhecido como de baixa reatividade, com baixo teor de P₂O₅ e com elevados teores de óxidos de Fe e Al. Desta forma, não é indicado para a aplicação direta na agricultura.

Coutinho et al. (1991), trabalhando com quatro fontes de P incorporadas ao solo, na cultura de soja, verificaram que o FN de Patos de Minas foi ineficiente no fornecimento de P para a cultura, obtendo produção e % P na folha, bastante inferiores em relação ao SFT, FN de Gafsa e ao termofosfato. A baixa eficiência do FN de Patos de Minas também foi observada em outros estudos com milho, trigo e azevém (PROCHNOW et al., 2004; VILLANUEVA et al., 2006; FRANZINI; MURAOKA; MENDES, 2009).

Nos tratamentos em que o FNG foi aplicado junto com S^0 (FNG + S^0), independente do modo de aplicação, foram superiores quanto a MSPA e P acumulado nas plantas de arroz e feijão, em relação aos tratamentos em que o FNG foi aplicado isoladamente (Tabela 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7). Após o SFT foram também os tratamentos que proporcionaram maior MSPA e P acumulado nas plantas de feijão, não havendo diferença entre os modos de aplicação para o P acumulado. Nas plantas de arroz quando o FNG + S^0 foi aplicado em área total não foi verificado diferença na MSPA em relação ao SFT, atingindo EAR de 80%. Porém, o P acumulado foi inferior e com EAR de 67%. Quando aplicado de forma localizada no solo o FNG + S^0 obteve EAR de 66% e 32%, respectivamente, para a MSPA e P acumulado, resultados inferiores em relação à aplicação em área total. Esses resultados demonstram o efeito benéfico da oxidação do S^0 na solubilização do FNG, proporcionando maior disponibilidade de P, resultando em maior acúmulo de P e rendimento de MSPA.

Richart et al. (2006) realizaram um trabalho a campo com a cultura da soja, onde os tratamentos constituíram de dois fertilizantes fosfatados, fosfato natural reativo de Marrocos (Youssoúfia) (FNM) e SFT com quatro doses (0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅) de cada fertilizante e três doses de S (0, 30 e 60 kg ha⁻¹ de S^0), todos os fertilizantes foram aplicados no sulco de plantio. A associação das doses de S^0 beneficiou o FNM, indicando efeito positivo na dose de 60 kg ha⁻¹ de S^0 , aumentando o acúmulo de P no tecido foliar. Verificou-se também efeito benéfico para a produtividade, pois houve contribuição do S^0 para melhorar a eficiência do FNM em relação ao SFT. Segundo os autores tais resultados podem ser tomados como evidência da oxidação do S^0 elementar, redução do pH do solo e solubilização do FNM.

O FNP aplicado junto com S^0 (FNP + S^0), nas culturas do feijão e arroz, não apresentou diferença na produção de MSPA e P acumulado em relação aos tratamentos em que o FNP foi aplicado isoladamente. Para o modo de aplicação só houve diferença na MSPA para arroz e feijão, sendo a aplicação em área total superior à localizada (Tabela 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7). Demonstrando mais uma vez a baixa reatividade e eficiência do FN de Patos de Minas.

O aproveitamento do P proveniente dos fertilizantes (APpf) pela cultura do feijão diferiu quanto ao modo de aplicação somente para o SFT que obteve maior APpf (15,52%),

quando aplicado localizado no solo e para o FNG que alcançou maior APpf (4,12%) na aplicação em área total (Tabela 3.8). De forma geral na cultura do feijão o APpf seguiu a ordem decrescente dos tratamentos: $SFT > FNG + S^0 > FNG > FNP + S^0 = FNP$.

Na cultura do arroz o APpf do SFT, FNG e $FNG + S^0$ aplicados em área total foram superiores ao da aplicação localizada (Tabela 3.9). Para o FNP e $FNP + S^0$ não houve diferença no APpf entre os modos de aplicação. De forma geral o APpf pelo arroz seguiu a ordem decrescente dos tratamentos: $SFT > FNG + S^0 > FNG > FNP + S^0 = FNP$, mesma sequência observada para o feijão.

Tabela 3.8 - Efeito das fontes de fósforo e do modo de aplicação sobre o aproveitamento do P proveniente dos fertilizantes (APpf (%)), pelas plantas de feijão ⁽¹⁾

Fontes de P ⁽²⁾	Modo de aplicação							
	Localizado				Área total			Média
	APpf (%)							
SFT	15,52	A	a		14,26	A	b	14,88 A
FNG	1,29	C	b		4,12	B	a	2,70 C
FNP	1,30	C	a		1,45	C	a	1,37 D
FNG + S ⁰	4,93	B	a		4,80	B	a	4,86 B
FNP + S ⁰	1,72	C	a		1,64	C	a	1,67 D
Média	4,12		b		4,38		a	
CV (%)	8,49							

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

Tabela 3.9 - Efeito das fontes de fósforo e do modo de aplicação sobre o aproveitamento do P proveniente dos fertilizantes (APpf (%)), pelas plantas de arroz ⁽¹⁾

Fontes de P ⁽²⁾	Modo de aplicação									
	Localizado				Área total				Média	
	APpf (%)									
SFT	10,42	A	b		11,66	A	a		11,04	A
FNG	1,13	C	b		6,43	B	a		3,78	C
FNP	0,47	C	a		0,55	C	a		0,51	D
FNG + S ⁰	3,52	B	b		6,99	B	a		5,26	B
FNP + S ⁰	0,97	C	a		0,68	C	a		0,83	D
Média	2,75		b		4,39		a			
CV (%)	12,58									

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

Com base no APpf comprova-se o efeito do modo de aplicação do SFT diferenciado para as culturas do arroz e feijão, bem como o modo de aplicação do FNG, que proporciona maior fornecimento e aproveitamento de P as culturas quando aplicado em área total. A aplicação localizada do FNG+S⁰ na cultura do feijão, proporcionou valores de APpf maiores do que na aplicação em área total do FNG e FNG+S⁰, demonstrando forte influência da oxidação do S⁰ na solubilização do FNG e no aumento da disponibilidade de P.

Nos tratamentos com o SFT o APpf pelo feijão alcançou valores próximos a 15%, maior do que pelo arroz que obteve valores próximos a 11%. Já nos tratamentos com FNG e FNG + S⁰, quando aplicado em área total observou-se APpf maior pela cultura do arroz (~7%) do que pelo feijão (~5%). Essa diferença do APpf pelas culturas, de acordo com a fonte de P, pode ser explicada individualmente para cada fonte. Nos tratamentos com SFT, a maior demanda de P pelo feijão em relação ao arroz, resultou em maior APpf da fonte de P totalmente solúvel (SFT).

Nos tratamentos com FNG aplicado em área total, o arroz obteve maior APpf em relação ao feijão, devido à característica do seu sistema radicular já mencionada, e possivelmente devido a maior solubilização do FNG no solo preparado para a cultura do arroz em relação ao do feijão, em consequência do pH do solo, um importante fator que deve ser considerado. Para a cultura do feijão foi realizada calagem, segundo as recomendações de RAIJ et al., 1997, com objetivo de elevar a saturação por bases a 70%, enquanto para o arroz foi de elevar a 50%, resultando desta forma na aplicação de diferentes quantidades de calcário nos experimentos e, conseqüentemente culminando em valores diferenciados de pH do solo (4,9 arroz e 5,5 feijão), após a calagem.

De forma geral a dissolução dos fosfatos naturais pode ser expressa segundo a equação: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2 + 12\text{H}^+ \rightarrow 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{F}^-$ (KHASAWNEH; DOLL, 1978), necessitando de acidez (prótons H⁺) no meio para que a reação ocorra. Assim, com o maior suprimento de prótons (H⁺), ou seja, em solos mais ácidos espera-se maior solubilização dos fosfatos naturais.

Na Tabela 3.10 estão apresentados os contrastes das comparações do FNP e FNG aplicados isoladamente e associados ao S⁰ nas culturas do arroz e feijão. Com a utilização da técnica da diluição isotópica foi possível contabilizar o incremento na absorção de P dos fosfatos naturais em função da aplicação do S⁰. Houve incremento da absorção de P do FNP e FNG em todos os tratamentos com aplicação de S⁰. Porém, não foi verificada diferença significativa na absorção de P do FNP+S⁰ comparado ao FNP aplicados em área total, entretanto verificou-se pequeno incremento na absorção de P do FNP de 13 e 23% para as

culturas do feijão e arroz, respectivamente. Também não se verificou diferença na absorção de P do FNG + S⁰ comparado com o FNG aplicado em área total na cultura do arroz, sendo que a aplicação do S⁰ incrementou em 9% a absorção de P do FNG.

Os maiores incrementos na absorção de P em função da aplicação do S⁰ ocorreram quando os tratamentos foram aplicados localizados no solo, chegando a aumentar em 284% e 212% a absorção de P do FNG pelo feijão e arroz, respectivamente. Para o FNP o incremento foi de 33% para o feijão e 108% para o arroz, também quando aplicados localizados no solo (Tabela 3.10). Embora apresentando alto incremento na absorção de P do FNP, cabe ressaltar que a quantidade de P absorvida ainda foi bastante baixa comparada a absorção de outras fontes, tendo a aplicação de S⁰ proporcionado aumento de apenas cerca de 1 mg vaso⁻¹ na absorção de P do FNP para o arroz e feijão.

Tabela 3.10 - Efeito dos fosfatos naturais aplicados isoladamente ou associados ao enxofre elementar e do modo de aplicação sobre o P acumulado proveniente dos fertilizantes (mg vaso⁻¹), e sobre o incremento na absorção de P dos fertilizantes em função do enxofre elementar, pelas plantas de feijão e arroz

Contrastes ⁽¹⁾	P acumulado do fertilizante (mg vaso ⁻¹)	Incremento (%)
	Experimento com feijão	
FNG + S ⁰ localizado x FNG localizado	9,86 x 2,57**	284
FNG + S ⁰ área total x FNG área total	9,61 x 8,23*	17
FNP + S ⁰ localizado x FNP localizado	3,43 x 2,59 ^o	33
FNP + S ⁰ área total x FNP área total	3,32 x 2,90 ^{n.s.}	13
	Experimento com arroz	
FNG + S ⁰ localizado x FNG localizado	7,05 x 2,26**	212
FNG + S ⁰ área total x FNG área total	13,99 x 12,86 ^{n.s.}	9
FNP + S ⁰ localizado x FNP localizado	1,95 x 0,93 ^o	108
FNP + S ⁰ área total x FNP área total	1,35 x 1,10 ^{n.s.}	23

^{ns}, ^o, * e ** referem-se a não significativo e significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

(1) SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

O alto incremento na absorção de P do FNG quando aplicado localizado no solo deve ser visto com atenção. A sua eficiência foi bastante baixa em relação à aplicação em área total, provavelmente devido ao menor contato do fertilizante com o solo, que resultou em menor reação do FNG com prótons (H⁺) da solução do solo. Quando aplicado localizado no solo junto com S⁰, a oxidação do S⁰ acarretou em liberação de prótons (H⁺) no meio e consequentemente na solubilização do FNG e maior disponibilidade de P por esta fonte.

Com a utilização da técnica da diluição isotópica foi possível comprovar o efeito da acidez gerada (H^+) da oxidação do S^0 sobre a solubilização dos fosfatos naturais. E esse efeito foi maior quando as fontes foram aplicadas em contato, localizadas no solo, devido à ação direta da acidez gerada sobre os fosfatos naturais. Ao contrário da aplicação em área total, onde a acidez foi distribuída por todo o solo, resultando em menor ação sobre os fosfatos naturais.

Com bases nesses resultados pode-se inferir que o S^0 foi oxidado pelos microorganismos contidos no solo do estudo. Horowitz e Meurer (2007), avaliando a taxa de oxidação de S^0 em amostras de 42 solos coletadas em vários estados do Brasil, verificaram que todos os solos avaliados possuíam capacidade de oxidar o S^0 .

Não foi observada diferença significativa entre os tratamentos para o pH do solo na cultura do feijão (Tabela 3.11). Na cultura do arroz houve pequenas alterações no pH do solo em função dos tratamentos. De forma geral o FNG aplicado em área total apresentou pH superior aos demais tratamentos e o FNP+ S^0 aplicado em área total obteve os menores valores de pH, embora não diferindo do FNP aplicado isoladamente em área total. Esses resultados demonstram pouca interferência do S^0 sobre o pH do solo. Possivelmente a acidez gerada a partir da oxidação do S^0 agiu na região próxima aos fertilizantes e atuou sobre o FNP e FNG sem reduzir em demasia o pH do solo. Resultados semelhantes foram verificados por Frandoloso et al. (2010) utilizando dose de 30 kg ha^{-1} de S^0 associado ao FN de Gafsa em experimento a campo com a cultura do milho. Entretanto, Stamford et al. (2004) constataram variação no pH de 6,2 do tratamento controle para 4,8 nos tratamentos com FNR de Gafsa misturado com S^0 , possivelmente devido a elevada dose de S utilizada neste experimento, equivalente a 300 kg ha^{-1} .

Tabela 3.11 - Efeito das fontes de fósforo e do modo de aplicação sobre o pH do solo, no experimento com feijão⁽¹⁾

Fontes de P ⁽²⁾	Modo de aplicação						Média
	Localizado			Área total			
	pH (CaCl ₂)						
SFT	5,19	A	a	5,14	A	a	5,16 A
FNG	5,22	A	a	5,28	A	a	5,25 A
FNP	5,22	A	a	5,25	A	a	5,23 A
FNG + S ⁰	5,24	A	a	5,10	A	b	5,17 A
FNP + S ⁰	5,25	A	a	5,12	A	a	5,19 A
Média	5,25		a	5,21		a	
Controle	5,31	n.s.					
CV (%)	2,00						

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

n.s. Média do tratamento testemunha não difere em relação à média do fatorial pelo teste F.

Tabela 3.12 - Efeito das fontes de fósforo e do modo de aplicação sobre o pH do solo, no experimento com arroz⁽¹⁾

Fontes de P ⁽²⁾	Modo de aplicação						Média	
	Localizado			Área total				
SFT	4,75	A	a	4,73	B	a	4,74	AB
FNG	4,74	A	b	4,98	A	a	4,86	A
FNP	4,70	A	a	4,57	BC	a	4,64	BC
FNG + S ⁰	4,63	A	a	4,65	BC	a	4,64	BC
FNP + S ⁰	4,60	A	a	4,48	C	a	4,54	C
Média	4,68	a		4,68	a			
Controle	4,66	n.s.						
CV (%)	1,80							

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

n.s. Média do tratamento testemunha não difere em relação à média do fatorial pelo teste F.

3.4 Conclusões

A aplicação associada ao enxofre elementar promoveu aumento da solubilização do fosfato natural reativo de Gafsa e do fosfato natural de Patos de Minas, aumentando a disponibilidade de fósforo a partir dessas fontes;

O efeito do enxofre elementar sobre a solubilização dos fosfatos naturais foi maior quando as fontes foram aplicadas em contato, localizadas no solo;

Quando utilizados isoladamente a aplicação em área total promoveu maior eficiência do fosfato natural reativo de Gafsa e do fosfato natural de Patos de Minas;

O superfosfato triplo promoveu maior aproveitamento e acúmulo de fósforo para a cultura do arroz quando aplicado em área total, enquanto na cultura do feijão maior aproveitamento e acúmulo de fósforo foram obtidos quando aplicado localizado no solo.

Referências

ALVAREZ-V., V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. F. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 595-646.

ANGHINONI, I.; BARBER, S. A. Predicting the most efficient phosphorus placement for corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 1016-1020, 1980.

BARRETO, C.; FERNANDES, M. F. Produtividade e absorção de fósforo por plantas de milho em função de doses e modos de aplicação de adubo fosfatado em solo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 151-156, 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes, corretivos, inoculantes, substratos e contaminantes**. Brasília, 2007. 140 p.

CAMARGO, A.O.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico).

CHIEN, S. H.; MENON, R. G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, p. 227-234, 1995.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G.; BILLINGHAM, K.S. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1173-1177, 1996.

COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas relativas às safras 1976/77 a 2009/2010 de área plantada, produtividade e produção.** Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_04_13_10_56_22_brasilproductoseriehist.xls. Acesso em: 10 abr. 2012.

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; SOUZA, S.K.S; FREIRE, F.J.; SILVA, G.B. Gafsa rock phosphate and triple superphosphate for dry matter production and p uptake by corn. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 62, p. 159-164, 2005.

COUTINHO, E.L.M.; NATALE, W.; VILLA NOVA, A.S.; SITTA, D.S.X. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, p. 1393-1399, 1991.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FRANDOLOSO, J.F.; LANA, M.C.; FONTANIVA, S.; CZYCZA, R.V. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, p. 686-694, 2010.

FRANZINI, V.I.; MURAOKA, T.; MENDES, F.L. Ratio and rate effects of 32P-triple superphosphate and phosphate rock mixtures on corn growth. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, p. 71-76, 2009.

FRANZINI, V.I.; MURAOKA, T.; CORASPE-LEON, H.M.; MENDES, F.L. Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 1092-1099, 2009.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D; TISDALE, S.L., NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 515 p.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 822-828, 2006.

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 159-206, 1978.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Crescimento radicular e aéreo do milho em vasos em função do nível de fósforo no solo e da localização do adubo fosfatado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 403-408, 1995.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319 p.

MOTOMIYA, W.R.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; GONÇALVES, M.C.; ROBAINA, A.D.; NOVELINO, J.O. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 307-312, 2004.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 8, p. 471-550.

NOVAIS, R.F.; FERREIRA, R.P.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Absorção de P e crescimento do milho com sistema radicular parcialmente exposto a fonte de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, p. 749-754, 1985.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; PROCHNOW, L.I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 623-631, 2008.

PROCHNOW, L.I.; CHIEN, S.H.; CARMONA, G.; HENAO, J. Greenhouse evaluation of phosphorus sources produced from a low-reactive Brazilian phosphate rock. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 761-768, 2004.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAJAN, S.S.S. Ways of improving the agronomic effectiveness of phosphate rocks, In: ZAPATA, F.; ROY, R.N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004. p. 85-97.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 57, p. 77-159, 1996.

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.S.; CARNEIRO, L.F.C. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 453-466, 2006.

RICHART, A.; LANA, M.C.; SCHULZ, L.R.; BERTONI, J.C.; BRACCINI, A.L. Disponibilidade de fósforo e enxofre para a cultura da soja na presença de fosfato natural reativo, superfosfato triplo e enxofre elementar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 695-705, 2006.

SAIK, R.D. The evolution of a sulphur bentonite fertilizer: one company's perspective. **Sulphur in Agriculture**, Washington, v. 19, p. 74-77, 1995.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. 4th ed. Cary, 1996.

STAMFORD, N.P.; MOURA, A.M.M.F.; SANTOS, K.S.; SANTOS, P.R. Atuação de *Acidithiobacillus* na solubilização de fosfato natural em solo de tabuleiro cultivado com Jacatupé (*Pachyrhizus erosus*). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 75-83, 2004.

VASCONCELLOS, C.A.; SANTOS, H.S.; FRANÇA, G.E.; BAHIA FILHO, A.F.C.; PITTA, G.V.E. Níveis, métodos de aplicação e fontes de fosfatos na produção de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, p. 245-254, 1986.

VILLANUEVA, F.C.A.; MURAOKA, T.; TREVIZAM, A.R.; FRANZINI, V.I.; ROCHA, A.P. Improving phosphorus availability from patos phosphate rock for *eucalyptus*: a study with ^{32}P radiotracer. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, p. 65-69, 2006.

VOSE, P.B. **Introduction to nuclear techniques in agronomy plant biology**. London: Pergamon Press, 1980. 391 p.

4 EFEITOS DE DOSES DE ENXOFRE ELEMENTAR E DE FOSFATOS NATURAIS NO APROVEITAMENTO DO P PELO FEIJOEIRO

Resumo

Objetivou-se com esse trabalho avaliar o efeito de doses de enxofre elementar (S^0) associadas com doses de fósforo (P) de fertilizantes fosfatados no fornecimento de P e S para a cultura do feijão. O experimento foi conduzido em casa de vegetação utilizando como cultura o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris*, L.), cultivar Pérola. O experimento foi instalado em delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições, em esquema fatorial $3 \times 5 \times 4$, sendo 3 fontes de P: superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo de Gafsa (FNG) e fosfato natural de Patos de Minas (FNP), 5 doses de P (0, 30, 60, 90 e 120 mg kg⁻¹) e 4 doses de S na forma de S^0 (0, 30, 60, 90 mg kg⁻¹). Foram avaliados os parâmetros: massa seca da parte aérea, P acumulado, S acumulado, P na planta proveniente do fertilizante e aproveitamento do P aplicado. A associação dos fosfatos naturais com S^0 promoveu aumento da solubilização dessas fontes e consequentemente da absorção de P pelo feijoeiro e esse efeito foi mais expressivo no FNG comparado ao FNP. Quando aplicados sem a presença do S^0 os dois fosfatos naturais foram equivalentes em fornecer P para a cultura do feijão. A absorção de P do FNG aumentou com as doses de S^0 e esse efeito foi mais expressivo na dose inicial, não mantendo proporcionalidade com as demais doses. O efeito sobre o fosfato natural de Patos de Minas foi pouco expressivo.

Palavras-chave: Diluição isotópica ^{32}P ; Fosfato natural de Patos de Minas; Fosfato natural reativo de Gafsa; Doses de fósforo; Doses de enxofre

Abstract

The objective of this study was to evaluate the effect of elemental sulfur (S^0) rates associated with phosphorus (P) from phosphate fertilizers rates on the supply of P and S for the bean crop. The experiment was conducted in a greenhouse with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Pérola cultivar. The experiment was carried out in a completely randomized design with three replications in a factorial $3 \times 5 \times 4$, with three P sources: Triple super phosphate (TSP), Gafsa phosphate rock (FNG) and Patos de Minas phosphate (FNP), five P rates (0, 30, 60, 90 and 120 mg P kg⁻¹) and four S^0 rates (0, 30, 60, 90 mg S kg⁻¹). The following parameters were evaluated: shoot dry weight, P uptake, S accumulated in the plant, P derived from fertilizer and P use efficiency. The association of elemental sulfur with FNG and FNP led to increase in solubility of these sources and consequently P uptake by bean and the effect was more expressive in the FNR, compared to FNP. When applied without addition of elemental sulfur the FNG and FNP, was equivalent in supplying P to the bean. The absorption of P from GPR increased with increasing sulfur rate and this effect was more expressive in the initial rate, not maintaining the proportionality with other rates. The effect on the PPR was small.

Keywords: ^{32}P isotope dilution; Phosphate of Patos de Minas; Gafsa phosphate rock; Phosphorus levels; Levels of sulfur

4.1 Introdução

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um dos constituintes mais importantes da dieta do brasileiro. É reconhecido como uma excelente fonte proteica, além de possuir bom conteúdo de vitaminas, minerais, carboidratos e ser rico em ferro. O Brasil é o maior produtor e consumidor de feijão. Estima-se que a produção nacional na safra de 2012 seja próxima a 3,7 milhões de toneladas (CONAB, 2012), sendo, portanto, de fundamental importância para o Brasil.

O feijoeiro é cultivado em todas as regiões brasileiras por pequenos e grandes produtores em vários sistemas de produção e classes de solo. O P é o nutriente mais deficiente na maioria dos solos brasileiros, dessa forma seu fornecimento através de fertilizantes é indispensável para a produção do feijoeiro.

Dentre as fontes de P disponíveis no mercado, as mais utilizadas são os fosfatos totalmente acidulados, com o P totalmente solúvel em água. Entretanto, o processo industrial para obtenção dessas fontes é caro, acarretando em preços altos do produto final. Além disso, em solos tropicais, altamente intemperizados, com aplicação de fertilizantes totalmente solúveis, o P fornecido para elevar os teores da solução do solo e ser absorvido pela planta, pode também ser “fixado” ou precipitado formando compostos de menor solubilidade (NOVAES; SMYTH, 1999).

Os fosfatos naturais (FNs) são fontes alternativas para adubação fosfatada, entretanto apresentam baixa eficiência agrônômica, principalmente para culturas anuais que demandam alto conteúdo de P em curto espaço de tempo (RESENDE et al., 2006; NOVAIS et al., 2007). Uma característica importante dos FNs é que presume sua eficiência é a reatividade, definida como uma propriedade intrínseca do FN (RAJAN et al., 1996). Os FNs brasileiros por serem de origem ígnea são no geral de baixa ou muito baixa reatividade. Já os FNs reativos importados, desde que de origem sedimentar, como o de Gafsa da Tunísia e o Arad de Israel são classificados como altamente reativos (SYERS et al., 1986; LEÓN et al., 1986).

A dissolução dos FNs nos solos ocorre de acordo com a reação empírica: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2 + 12\text{H}^+ \rightarrow 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{F}^-$ (KHASAWNEH; DOLL, 1978), necessitando do suprimento de acidez (prótons H^+) para que a reação ocorra. A aplicação do enxofre elementar (S^0) pode ser utilizada para fornecer prótons (H^+) (RAJAN, 2004) e melhorar a eficiência dos FNs. O S^0 é oxidado a sulfato por microorganismos presentes nos solos segundo a reação: $\text{S}^0 + \text{CO}_2 + 0,5 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow [\text{CH}_2\text{O}] + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$ (SAIK, 1995), promovendo a liberação de prótons (H^+).

Alguns autores (RAJAN, 1983; EVANS; MCDONALD; PRICE, 2006; EVANS; PRICE, 2009) verificaram respostas positivas do S^0 sobre a solubilização dos FNs e no aumento da absorção de P pela planta.

Além do possível efeito benéfico sobre a eficiência dos FNs, a associação entre os FN e S^0 merece destaque quanto ao fornecimento gradativo de enxofre (S) para as plantas. Vários autores têm relatado respostas das culturas à aplicação de S, que ocorre principalmente devido o uso crescente de adubos concentrados que contém pouco ou nenhum S e da natural limitação deste nutriente nos solos, onde após alguns anos de cultivo declina seu suprimento a partir da matéria orgânica (FURTINI NETO et al., 2000; CAIRES et al., 2002; SFREDO et al., 2003).

Existem poucos estudos no Brasil com relação à aplicação de FNs associados ao S^0 , e pouco se sabe sobre as interações de doses dos fertilizantes a serem utilizadas.

Com base no exposto, objetivou-se com esse trabalho avaliar o efeito de doses de P de fertilizantes fosfatados associados a doses de S do enxofre elementar, no fornecimento de P e S para a cultura do feijão.

4.2 Material e métodos

O experimento, utilizando como cultura teste o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris*, L.), cultivar Pérola, foi conduzido em casa de vegetação com temperatura máxima e mínima de 35 e 22 °C, respectivamente, localizada em Piracicaba, SP.

O solo utilizado foi coletado na camada de 0 a 0,2 m no município de Piracicaba-SP, sendo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2006). As amostras de terra foram secas ao ar, peneiradas em malha de 2 mm e determinadas as propriedades químicas (Tabela 4.1) de acordo com o sistema IAC de análises de solo (RAIJ et al., 2001). A caracterização granulométrica apresentou respectivamente, 251, 43 e 706 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, sendo o solo classificado como de textura médio-argilosa conforme Camargo et al. (1986).

Tabela 4.1 - Características químicas das amostras de solo utilizadas no experimento

pH	MO	P	S	K⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	Al³⁺	H+Al	SB	T	V	m
CaCl ₂	g dm ⁻³	— mg dm ⁻³ —	—	—	—	—	mmol _c dm ⁻³	—	—	—	%	—
4,5	32	5	3	0,9	12	6	2	47	19,1	66	29	11
B		Cu		Fe		Mn		Zn				
				mg dm ⁻³								
0,13		0,9		109		4,7		1,6				

Para a instalação do experimento foram utilizados vasos plásticos, revestidos com sacos plásticos e com capacidade de 2,5 L, que foram preenchidos com 2,0 kg de terra peneirada. Com base na análise química do solo foi realizada calagem, aplicando-se calcário com PRNT 95 % (27,50 % CaO e 18,5 % MgO) com objetivo em elevar a saturação por bases a 70 %, recomendada para a cultura do feijão (RAIJ et al., 1997). Após a aplicação do calcário o solo foi incubado por 30 dias mantendo a umidade em aproximadamente 70 % da capacidade máxima de retenção de água.

O experimento foi instalado em delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições, em esquema fatorial 3 x 5 x 4, sendo 3 fontes de fósforo (P): superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo de Gafsa (FNG) e fosfato natural de Patos de Minas (FNP), 5 doses de P (0, 30, 60, 90 e 120 mg kg⁻¹) e 4 doses de S provenientes do enxofre elementar (S⁰) (0, 30, 60, 90 mg kg⁻¹) (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Tratamentos (fontes e doses de P e doses de S) do experimento

Tratamento	Fonte de P ⁽¹⁾	Dose de P ---mg kg ⁻¹ ---	Dose de S ---mg kg ⁻¹ ---	Tratamento	Fonte de P	Dose de P ---mg kg ⁻¹ ---	Dose de S ---mg kg ⁻¹ ---
1	SFT	0	0	31	FNG	60	60
2	SFT	0	25	32	FNG	60	90
3	SFT	0	50	33	FNG	90	0
4	SFT	0	75	34	FNG	90	30
5	SFT	30	0	35	FNG	90	60
6	SFT	30	30	36	FNG	90	90
7	SFT	30	60	37	FNG	120	0
8	SFT	30	90	38	FNG	120	30
9	SFT	60	0	39	FNG	120	60
10	SFT	60	30	40	FNG	120	90
11	SFT	60	60	41	FNP	0	0
12	SFT	60	90	42	FNP	0	30
13	SFT	90	0	43	FNP	0	60
14	SFT	90	30	44	FNP	0	90
15	SFT	90	60	45	FNP	30	0
16	SFT	90	90	46	FNP	30	30
17	SFT	120	0	47	FNP	30	60
18	SFT	120	30	48	FNP	30	90
19	SFT	120	60	49	FNP	60	0
20	SFT	120	90	50	FNP	60	30
21	FNG	0	0	51	FNP	60	60
22	FNG	0	30	52	FNP	60	90
23	FNG	0	60	53	FNP	90	0
24	FNG	0	90	54	FNP	90	30
25	FNG	30	0	55	FNP	90	60
26	FNG	30	30	56	FNP	90	90
27	FNG	30	60	57	FNP	120	0
28	FNG	30	90	58	FNP	120	30
29	FNG	60	0	59	FNP	120	60
30	FNG	60	30	60	FNP	120	90

⁽¹⁾ SFT: Superfosfato triplo; FNG: Fosfato natural reativo de Gafsa; FNP: Fosfato natural de Patos de Minas.

Os fertilizantes foram caracterizados segundo metodologia oficial de análises de fertilizantes, corretivos, inoculantes, substratos e contaminantes do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2007) (Tabela 4.3).

As fontes de P e o S⁰ foram aplicados, respectivamente, com base no P e S total das fontes. Todos os fertilizantes dos tratamentos foram utilizados na forma de pó, exceto o SFT que foi utilizado na forma granulada. A aplicação dos fertilizantes foi realizada na mesma

época da semeadura, sendo aplicados de forma localizada no solo a cerca de 5 cm de profundidade em sulco.

Tabela 4.3 - Caracterização dos fertilizantes

Fertilizante	Teor de P_2O_5			P total
	(1) Total	(2) AC	(3) CNA+H ₂ O	
	%			
Superfosfato triplo	44,6	-	43,2	19,5
Fosfato natural reativo de Gafsa	27,2	10,1	-	11,9
Fosfato natural de Patos de Minas	24,1	4,1	-	10,5

(1) Solubilizado com ácido clorídrico;

(2) Fração solúvel em ácido cítrico (2%);

(3) Fração solúvel em citrato neutro de amônio + água (9:1);

- Não analisado

Para a quantificação do P absorvido pelas plantas, proveniente do SFT, FNG e FNP, foi utilizado no experimento o método da diluição isotópica com ^{32}P marcando o solo (método indireto). A marcação do solo foi realizada através de 25 g de areia lavada, que receberam 9,54 MBq de ^{32}P livre de carregador. A areia foi adicionada em cada saco plástico contendo os 2,0 kg de solo e posteriormente homogeneizada com o solo, por meio de uma agitação vigorosa. A aplicação foi realizada após os 30 dias de incubação da calagem, e em seguida a aplicação da areia o solo foi novamente mantido incubado por 10 dias para que ocorresse o equilíbrio isotópico entre o ^{32}P e ^{31}P .

A partir da interpretação da análise de solo verificou-se que apenas o B dos micronutrientes e o K dos macronutrientes¹ estavam abaixo dos teores adequados no solo, sendo assim, antes da semeadura foi realizada uma adubação básica na forma de solução com 150 mg kg⁻¹ de K (cloreto de potássio) e aplicação de micronutrientes também na forma de solução nas doses de 2,0 mg kg⁻¹ de B (ácido bórico) e 1 mg kg⁻¹ de Mo (molibdato de amônio tetra hidratado).

Foram semeadas cinco sementes por vaso a aproximadamente 1,5 cm de profundidade e desbastadas para duas plantas cinco dias após a emergência (DAE). Aos 10 e 25 DAE foram realizadas adubações de cobertura com 50 mg kg⁻¹ de N (ureia). Durante a condução do experimento a umidade do solo foi mantida a aproximadamente 70% da capacidade máxima de retenção de água.

¹ Os nutrientes P e S, também estavam abaixo dos teores considerados adequados no solo. Entretanto, foram os objetivos do estudo, sendo fornecidos pelos tratamentos.

A colheita foi realizada aos 42 dias após a semeadura. As plantas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 60° C por três dias, pesadas, obtendo-se massa seca da parte aérea (MSPA) e moídas em moinho tipo Willey. As amostras foram submetidas à digestão nitroperclórica e no extrato foi determinada a atividade do ^{32}P , por meio do contador de cintilação em meio líquido, por efeito Cerenkov (VOSE, 1980). A concentração de P foi determinada pelo método colorimétrico do metavanadato e molibdato, seguindo os procedimentos descritos por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) e o enxofre determinado pelo método da turbidimetria do cloreto de bário (BATAGLIA et al., 1983).

O acúmulo de P e de S nas plantas foram determinados considerando-se a concentração de P e S e MSPA. O P na planta proveniente do FNP, FNG e SFT e o aproveitamento do P dessas fontes, foram calculados de acordo com o método da diluição isotópica do ^{32}P , descrito por Chien et al., (1996) e Franzini et al., (2009) conforme as equações a seguir:

Atividade específica de ^{32}P nas plantas:

$$AE = \frac{{}^{32}\text{P}}{{}^{31}\text{P}} \quad (1)$$

Em que:

AE = É a atividade específica (DPM μgP^{-1});

^{32}P = É a atividade do radioisótopo ^{32}P na planta (DPM);

^{31}P = É o conteúdo de P na planta (μg de P planta $^{-1}$).

Fração, percentagem e total de P absorvido dos fertilizantes (FNP, FNG ou SFT):

$$F_{\text{FPF}} = 1 - \left[\frac{AE_{\text{P(FNP, FNG ou SFT) + (solo)}}}{AE_{\text{P(solo)}}} \right] \quad (2)$$

$$\%P_{\text{PPF}} = 100 F_{\text{FPF}} \quad (3)$$

$$P_{\text{F}} = P_{\text{(FNP, FNG ou SFT) + (Solo)}} F_{\text{FPF}} \quad (4)$$

Em que:

F_{FPF} = fração do P absorvido do fertilizante (FNP, FNG ou SFT);

$AE_{\text{P(FN, FNR ou SFT + solo)}}$ = Atividade específica do P na planta absorvido do (FNP, FNG ou SFT) + (solo);

$AE_{P(solo)}$ = Atividade específica do P na planta absorvido do solo;

P_F = P absorvido do fertilizante (FNP, FNG ou SFT);

$P_{(FN, FNR \text{ ou } SFT + solo)}$ = P absorvido do (FNP, FNG ou SFT) + (solo);

$\%P_{PPF}$ = % de P na planta proveniente do fertilizante (FNP, FNG ou SFT).

O aproveitamento (APpf (%)) do P dos fertilizantes (FNP, FNG ou SFT), ou eficiência da fonte fosfatada para as plantas foi determinada pela eq. (5):

Aproveitamento:

$$APpf (\%) = \frac{P_{PPF}}{P_{aplicado}} 100 \quad (5)$$

Em que:

P_{PPF} = É quantidade de P na planta proveniente do fertilizante (FNP, FNG ou SFT) (mg);

$P_{aplicado}$ = É quantidade de P aplicado ao solo proveniente do fertilizante (FN, FNG ou SFT) (mg).

Os resultados dos parâmetros avaliados foram submetidos a análise de variância, procedendo com o desdobramento das interações significativas, com comparação das médias pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade, utilizando os pacotes estatísticos SAS[®] - “Statistical Analysis System” (SAS INSTITUTE, 1996) e SISVAR[®] versão 4.0 (FERREIRA, 2000). Ajustou-se modelos de regressão para as doses de P e S, com auxílio do pacote estatístico SigmaPlot[®] versão 10 (SYSTAT SOFTWARE Inc, 2006), sendo os modelos definidos de acordo com a significância, coeficiente de determinação (R^2) e do comportamento biológico.

4.3 Resultados e discussão

Na Tabela 4.4 é apresentado o resumo da análise de variância para os parâmetros: MSPA, P acumulado e S acumulado e na Tabela 4.5 para o fósforo na planta proveniente do fertilizante (Pppf) e aproveitamento do P aplicado (APpf). Por não possuir o tratamento controle (0 mg kg⁻¹ de P) do fator dose de P, para o Pppf e APpf, pois, os mesmos são dependentes dos fertilizantes aplicados, houve com isso redução nos graus de liberdade do fator dose de P e consequentemente das interações, resíduo e do total para esses parâmetros (Tabela 4.5).

Tabela 4.4 – Quadrados médios, graus de liberdade (GL) e coeficiente de variação (CV), referentes à análise de variância da massa seca da parte aérea (MSPA), fósforo acumulado na MSPA (P acumulado) e enxofre acumulado na MSPA (S acumulado) em função das fontes de P, doses de P e doses de S

Causa de Variação	GL	----- Quadrado médio -----		
		MSPA	P acumulado	S acumulado
Fonte de P	2	38660,3**	3808524,6**	2068,2**
Dose de P	4	9452,3**	571275,7**	2455,3**
Dose de S	3	2317,3**	48812,0**	3310,9**
Fonte de P x Dose de P	8	2553,1**	291286,5**	308,2**
Fonte de P x Dose de S	6	496,1**	6863,5**	72,6 ^{n.s.}
Dose de P x Dose de S	12	87,9 ^{n.s.}	1044,1 ^{n.s.}	37,2 ^{n.s.}
Fonte de P x Dose de P x Dose de S	24	55,9 ^{n.s.}	949,8 ^{n.s.}	75,1*
Resíduo	120	61,6	1925,2	44,1
Total	179			
CV (%)		13,3	14,5	13,9

^{ns}, * e ** referem-se a não significativo e significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Tabela 4.5 – Quadrados médios, graus de liberdade (GL) e coeficiente de variação (CV), referentes à análise de variância do fósforo na planta proveniente do fertilizante (Pppf) e aproveitamento do P aplicado (APpf) em função das fontes de fósforo, doses de fósforo e doses de enxofre

Causa de Variação	GL	----- Quadrado médio -----	
		Pppf	APpf
Fonte de P	2	5314616,8**	316286,4**
Dose de P	3	148381,7**	36782,2**
Dose de S	3	49518,2**	3034,0**
Fonte de P x Dose de P	6	72106,9**	10270,8**
Fonte de P x Dose de S	6	12103,7**	741,8**
Dose de P x Dose de S	9	1423,9 ^{n.s.}	155,2 ^{n.s.}
Fonte de P x Dose de P x Dose de S	18	661,6 ^{n.s.}	66,4 ^{n.s.}
Resíduo	96	2204,7	167,3
Total	143		
CV (%)		14,6	16,2

^{ns}, * e ** referem-se a não significativo e significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Para todos os parâmetros avaliados foram verificados efeitos dos tratamentos, fontes e doses de P e doses de S e interações entre eles. Dentre as interações estudadas, só foram discutidos os desdobramentos das que apresentaram finalidade prática. Assim, das interações com efeitos significativos somente a interação tripla sobre a variável S acumulado: Fonte de P x Dose de P x Dose de S não foi discutida.

Para facilitar a compreensão e a organização dos resultados, o desdobramento das interações com efeitos significativos: Fonte de P x Dose de P e Fonte de P x Dose e S, serão apresentadas e discutidas separadamente, assim como os parâmetros avaliados. Os resultados serão apresentados com o desdobramento da interação pelo teste de Tukey na forma de tabela, e com seu respectivo gráfico com os ajustes de regressão, por se tratar de fatores quantitativos envolvidos (Doses de P e S). Além disso, por isolar um terceiro fator (dose de P ou dose de S) nas interações que serão discutidas, também serão apresentados gráficos com as tendências considerando cada dose de P ou S dependendo da interação em estudo.

4.3.1 Estudo da interação: Fonte de P x Dose de P (isolando o fator ‘doses de S’)

4.3.1.1 *Massa seca da parte aérea (MSPA), P acumulado e S acumulado*

Na Tabela 4.6 e Figura 4.1 (a) estão apresentados o desdobramento sobre a produção de MSPA. Houve resposta da MSPA de todas as fontes e doses de P, com exceção do FNP que pouco respondeu as doses de P, nas quais só houve diferença apenas da dose² de 0 mg kg⁻¹ de P para a dose de 120 mg kg⁻¹ de P. A maior produção de MSPA (10,70 g vaso⁻¹) foi obtida pelo superfosfato triplo (SFT) e na maior dose de P (120 mg kg⁻¹), entretanto não diferindo das doses de 60 e 90 mg kg⁻¹. Após o SFT, o FNG, foi à fonte que proporcionou maiores produções de MSPA, obtendo 6,36 g vaso⁻¹ também na maior dose de P (120 mg kg⁻¹), porém não diferindo das doses de 60 e 90 mg kg⁻¹ de P.

Com base nas curvas de resposta e equações de regressão ajustadas (Figura 4.1 (a)), foi verificado para o SFT que a partir da dose de 30 mg kg⁻¹ de P a produção de MSPA tendeu a estabilizar, não respondendo mais a adição de P. Com o FNG verificou-se aumento na produção da MSPA até a dose de 60 mg kg⁻¹ de P e pequenos acréscimos a partir dessa dose. O FNP a partir da dose de 30 mg kg⁻¹ de P, apresentou comportamento estabilizado em relação as demais doses de P.

Nas Figuras 4.1 (b), (c) e (d), estão apresentados resultados de MSPA de cada fonte de P, considerando cada dose de S. Pode-se observar que praticamente não há diferença na produção de MSPA, entre as doses de S, para o FNP e SFT. Entretanto, para o FNG observa-se que houve clara diferença nos tratamentos que receberam S⁰ do tratamento controle (dose de 0 mg kg⁻¹ de S) na produção de MSPA (Figura 4.1 (c)).

² Os tratamentos controle dos fatores Doses de P e Doses de S, serão citados no texto em algumas ocasiões como dose 0 mg kg⁻¹ de P e 0 mg kg⁻¹ de S, respectivamente. Embora não sendo necessariamente doses, pois não houve aplicação dos respectivos nutrientes, adotou-se essa terminologia para facilitar a compreensão dos resultados

A partir do desdobramento sobre o P acumulado (Tabela 4.7 e Figura 4.2), observou-se assim como para a MSPA, que o P acumulado atingiu maior valor ($27,25 \text{ mg vaso}^{-1}$) com o SFT na maior dose de P (120 mg kg^{-1}), seguido do FNG e FNP com maiores valores 7,32 e $4,75 \text{ mg vaso}^{-1}$, respectivamente, também na maior dose de P. O SFT proporcionou acúmulo crescente de P com aumento das doses de P. Para o FNG esse efeito foi verificado até a dose de 60 mg kg^{-1} de P, com pequenos acréscimos a partir dessa dose, porém não diferindo estatisticamente das doses de 90 e 120 mg kg^{-1} de P, comportamento similar ao obtido para a produção de MSPA. Com o FNP verificou-se diferença no acúmulo de P apenas da dose de 0 mg kg^{-1} de P para a dose com 120 mg kg^{-1} de P, o mesmo verificado para a MSPA.

Com relação aos efeitos das fontes de P sobre o P acumulado, considerando cada dose de S (Figura 4.2 (b), (c) e (d)), observou-se comportamento semelhante de todas as doses de S sobre o SFT e também sobre o FNP. Entretanto, houve maior acúmulo de P do FNG com a aplicação de S (30, 60 e 90 mg kg^{-1}) em relação ao controle (dose 0 mg kg^{-1} de S), efeito também observado para a MSPA.

A produção de MSPA estabilizou-se a partir da dose de 30 mg kg^{-1} de P do SFT, enquanto que o P acumulado continuou aumentando até a dose máxima de P utilizada (120 mg kg^{-1}). Esse acúmulo crescente de P com a dose de P, o que não ocorreu com a MSPA, pode ser devido ao “consumo de luxo” do P do SFT pela cultura do feijão, considerando o período de condução do experimento (42 dias).

Tabela 4.6 - Desdobramento da interação entre fontes e doses de fósforo, sobre a produção de massa seca de parte aérea (MSPA) de feijão, considerando a média das doses de enxofre⁽¹⁾

Fonte de P ⁽²⁾	Dose de P (mg kg ⁻¹)					Média
	0	30	60	90	120	
	MSPA (g / vaso)					
SFT	3,08 Ac	9,72 Ab	9,90 Aab	10,2 Aab	10,70 Aa	8,72 A
FNG	3,08 Ac	4,57 Bb	5,93 Ba	5,99 Ba	6,36 Ba	5,19 B
FNP	3,08 Ab	3,91 Bab	3,95 Cab	3,74 Cab	4,28 Ca	3,79 C
Média	3,08 d	6,07 c	6,59 b	6,65 ab	7,11 a	5,90 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

⁽³⁾ Média geral.

Figura 4.1 – Efeito de fontes e doses de fósforo na produção de massa seca da parte aérea (MSPA) de feijão, a) considerando a média das doses de enxofre, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de enxofre, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de enxofre e d) superfosfato triplo considerando cada dose de enxofre

Tabela 4.7 - Desdobramento da interação entre fontes e doses de fósforo, sobre o fósforo acumulado (P acumulado) na massa seca de parte aérea de feijão, considerando a média das doses de enxofre⁽¹⁾

Fonte de P ⁽²⁾	Dose de P (mg kg ⁻¹)										Média	
	0		30		60		90		120			
	P acumulado (mg / vaso)											
SFT	3,13	Ae	16,09	Ad	22,30	Ac	24,68	Ab	27,25	Aa	18,68	A
FNG	3,13	Ac	5,18	Bb	6,72	Bab	7,28	Ba	7,32	Ba	5,93	B
FNP	3,13	Ab	3,99	Bab	4,22	Cab	4,10	Cab	4,75	Ca	4,04	C
Média	3,13	e	8,45	d	11,08	c	12,02	b	13,09	a	9,55	⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

⁽³⁾ Média geral.

Figura 4.2 – Efeito de fontes e doses de fósforo no P acumulado na massa seca da parte aérea de feijão, a) considerando a média das doses de enxofre, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de enxofre, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de enxofre e d) superfosfato triplo considerando cada dose de enxofre

Verificou-se resposta crescente para o S acumulado nos tratamentos com SFT e FNG em função das doses de P. Porém, para o FNP não foi ajustado modelo de regressão com efeito significativo (Tabela 4.8 e Figura 4.3 (a)). De forma geral o acúmulo de S foi superior no tratamento com SFT, seguido do FNG e FNP. Analisando as tendências das fontes de P sobre o S acumulado, considerando cada dose de S, observou-se comportamento semelhante de todas as doses de S para o SFT e FNP (Figura 4.3 (a) e (c)). Já para o FNG foi verificado maior acúmulo de S nas doses de 30, 60 e 90 mg kg⁻¹ de S em relação ao tratamento controle (0 mg kg⁻¹ de S) (Figura 4.3 (b)).

De forma geral o S acumulado pouco variou entre as fontes e doses de P. O tratamento com SFT proporcionou maior acúmulo de S, seguido do FNG e do FNP. A hipótese formulada para essa diferença entre as fontes de P é que os teores de P disponível mais elevado nos tratamentos com SFT e FNG estimularam a oxidação de S⁰ e a disponibilidade de sulfato para absorção das plantas. Alguns autores relataram efeito positivo do P disponível sobre as taxas de oxidação de S⁰ (JANZEN; BETTANY, 1987; LAWRENCE; GERMIDA, 1988). Tisdale et al. (1985) e Sholeh; Lefroy e Blair (1997) também verificaram aumento da oxidação de S⁰ quando aplicado com fontes de P, e atribuíram efeito ao uso do P como nutriente pelos microorganismos oxidantes do S⁰.

Lefroy; Sholeh e Blair (1997) realizaram trabalho em casa de vegetação com a cultura do milho e utilizaram o S⁰ combinado com fosfato monocalcico. Os autores verificaram que as taxas de oxidação do S⁰ foram maiores quando o mesmo foi misturado e aplicado com o fosfato monocalcico no solo e atribuíram esse efeito a utilização do P como nutriente pelos microorganismos oxidantes do S⁰.

Tabela 4.8 - Desdobramento da interação entre fontes e doses de fósforo, sobre o enxofre acumulado (S acumulado) na massa seca de parte aérea de feijão, considerando a média das doses de enxofre⁽¹⁾

Fonte de P ⁽²⁾	Dose de P (mg kg ⁻¹)					Média
	0	30	60	90	120	
	S acumulado (mg / vaso)					
SFT	3,53 Ad	4,59 Ac	5,60 Ab	6,13 Aab	6,52 Aa	5,27 A
FNG	3,53 Ac	4,67 Ab	5,11 Ab	5,25 Bab	6,00 Aa	4,91 B
FNP	3,53 Ac	4,38 Aab	4,10 Babc	3,81 Cbc	4,82 Ba	4,13 C
Média	3,53 d	4,55 c	4,93 bc	5,06 b	5,78 a	4,77 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

⁽³⁾ Média geral.

Figura 4.3 – Efeito de fontes e doses de fósforo no acúmulo de enxofre na massa seca da parte aérea de feijão, a) considerando a média das doses de enxofre, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de enxofre, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de enxofre e d) superfosfato triplo considerando cada dose de enxofre

4.3.1.2 *P na planta proveniente do fertilizante (Pppf) e aproveitamento do P do fertilizante (APpf)*

O Pppf, obtido com auxílio do ^{32}P , contabiliza a quantidade de P acumulado na planta proveniente do fertilizante e o APpf é a utilização percentual pela planta do fertilizante aplicado. O uso da técnica isotópica apresenta as vantagens de ter extrema sensibilidade e a possibilidade de separar na planta o elemento proveniente do solo e do fertilizante (MURAOKA, 1991). Assim, no presente estudo o uso da técnica serviu para comprovar o efeito dos tratamentos, considerando apenas o P dos fertilizantes.

Na Tabela 4.9 e Figura 4.4 encontra-se o desdobramento para o Pppf. Os resultados do Pppf foram semelhantes aos do P acumulado, os maiores valores foram obtidos com o SFT e na maior dose de P (120 mg kg^{-1}), havendo efeito crescente do Pppf com aumento das doses de P. O FNG alcançou maiores valores também na maior dose de P, porém não diferindo das doses de 60 e 90 mg kg^{-1} de P e foi a fonte que apresentou maior média do Pppf depois do SFT. Com aumento das doses de P, o Pppf do FNP não foi alterado, demonstrando baixo fornecimento de P por este fertilizante, mesmo com aumento das doses.

Na Figura 4.4 (c) verifica-se a tendência do Pppf do FNG para cada dose S, comprovando-se mais uma vez o comportamento diferenciado e menor no fornecimento de P pelo FNG na dose de 0 mg kg^{-1} de S em relação as demais doses. Para o FNP e SFT observa-se a mesma tendência em todas as doses de S (Figura 4.4 (b) e (d)).

Para o APpf (Tabela 4.10 e Figura 4.5), observou-se efeito decrescente com aumento das doses de P. Esse comportamento é esperado, pois, o APpf é dependente e correlacionado com a dose de P aplicada. Ou seja, com aumento das doses de P, relativamente menor será o APpf, apresentando tendência similar a ajuste de regressão exponencial decrescente conforme relatado por Franzini; Muraoka e Mendes (2009).

O maior APpf foi verificado para o SFT na menor dose de P (30 mg kg^{-1}), alcançando 26 %. Para o FNG e FNP o APpf máximo 6,83 % e 3,95 %, respectivamente, foram verificados também para a menor dose de P (30 mg kg^{-1}). Com o FNP só houve diferença do APpf da dose com 30 mg kg^{-1} de P para as demais doses, isso, evidência mais uma vez, a baixa disponibilidade de P a partir dessa fonte, pois, independente da dose de P utilizada pouca alteração foi observada no APpf.

Observando as tendências das fontes de P, para cada dose de S (Figura 4.5 (b), (c) e (d)), observa-se menor APpf do FNG na dose de 0 mg kg^{-1} de S em relação as demais doses. Para o FNP e o SFT o comportamento foi semelhante em todas as doses de S.

Tabela 4.9 - Desdobramento da interação entre fontes e doses de fósforo, sobre o fósforo acumulado na massa seca da parte aérea do feijão proveniente do fertilizante (Pppf), considerando a média das doses de enxofre⁽¹⁾

Fonte de P ⁽²⁾	Dose de P (mg kg ⁻¹)					Média	
	0	30	60	90	120		
	PPF (mg / vaso)						
SFT	-	15,62 Ad	21,87 Ac	24,35 Ab	26,88 Aa	22,18	A
FNG	-	4,10 Bb	5,67 Bab	6,11 Ba	6,26 Ba	5,54	B
FNP	-	2,37 Ca	2,60 Ca	2,70 Ca	3,15 Ca	2,71	C
Média	-	7,37 d	10,05 c	11,05 b	12,10 a	10,14	⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

⁽³⁾ Média geral.

Figura 4.4 – Efeito de fontes e doses de fósforo sobre o fósforo acumulado na massa seca da parte aérea de feijão proveniente do fertilizante (Pppf), a) considerando a média das doses de enxofre, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de enxofre, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de enxofre e d) superfosfato triplo considerando cada dose de enxofre

Tabela 4.10 - Desdobramento da interação entre fontes e doses de fósforo, sobre o aproveitamento do fósforo proveniente do fertilizante pelo feijoeiro, considerando a média das doses de enxofre⁽¹⁾

Fonte de P ⁽²⁾	Dose de P (mg kg ⁻¹)								Média		
	0		30		60		90			120	
Aproveitamento do P (%)											
SFT	-	26,04	Aa	18,22	Ab	13,52	Ac	11,20	Ad	17,24	A
FNG	-	6,83	Ba	4,72	Bb	3,39	Bbc	2,60	Bc	4,39	B
FNP	-	3,95	Ca	2,17	Cb	1,50	Cb	1,31	Cb	2,23	C
Média	-	12,27	a	8,37	b	6,14	c	5,04	d	7,95	⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

⁽³⁾ Média geral.

Figura 4.5 – Efeito de fontes e doses de fósforo sobre o aproveitamento do fósforo proveniente do fertilizante pelo feijão, a) considerando a média das doses de enxofre, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de enxofre, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de enxofre e d) superfosfato triplo considerando cada dose de enxofre

A partir dos resultados obtidos sobre a produção da MSPA, P acumulado, Pppf e APpf pode-se verificar a elevada eficiência do SFT em fornecer P para a cultura do feijão, comparado ao FNG e FNP. O SFT é uma fonte de comprovada eficiência agrônômica, que possui praticamente todo o P solúvel em água, ou seja, podendo incrementar rapidamente a fração de P disponível do solo, ficando propício a absorção pela planta (PROCHNOW; ALCARDE; CHIEN, 2004).

De forma geral o aumento das doses de P pouco influenciou em reposta no acúmulo de P e produção de MSPA pelo feijão com FNP. Para o FNG houve pequena resposta, porém bastante inferior ao SFT que obteve acúmulo crescente P com aumento das doses de P. Esses resultados foram corroborados pelo Pppf e APpf.

É comprovado em trabalhos na literatura que os fosfatos naturais são fontes de P com eficiência bastante inferior comparados aos fosfatos totalmente acidulados, principalmente quando aplicados localizados no sulco, como no presente estudo. Isso ocorre devido o menor contato do fertilizante com o solo e consequentemente menor reação com prótons (H^+) disponíveis no meio, que agem na solubilização da rocha (CHIEN; MENON, 1995; RAJAN et al., 1996).

Oliveira Junior, Prochnow e Klepker (2008) verificaram para a cultura da soja, no primeiro ano de cultivo, que a aplicação a lanço do fosfato natural reativo Arad resultou em eficiência agrônômica relativa (EAR) de 53 % e 61 %, respectivamente, com base na MSPA e P acumulado, comparado ao SFT. Porém, quando aplicado localizado no solo alcançou EAR de 14 e 17 % somente.

Em trabalho realizado em casa de vegetação com a cultura do milho Franzini et al. (2009) verificaram que a aplicação localizada do fosfato natural reativo de Gafsa alcançou eficiência agrônômica relativa (EAR), com base na MSPA e P acumulado de 13 e 9 % somente, em relação ao SFT.

Motomiya et al. (2004), realizando trabalho a campo com a cultura da soja, verificaram que o índice de eficiência agrônômica (IEA) do fosfato natural reativo de Gafsa aplicado a lanço foi equivalente ao SFT, no segundo ano de cultivo. Entretanto, quando esse fertilizante foi aplicado no sulco de plantio o IEA chegou somente 3 % em relação ao SFT.

4.3.2 Estudo da interação: Fonte de P x Dose de S (isolando o fator ‘doses de P’)

4.3.2.1 *Massa seca da parte aérea (MSPA), P acumulado e S acumulado*

Na tabela 4.11 e Figura 4.6 (a) encontra-se o desdobramento sobre a produção de MSPA. Não houve diferença da MSPA em função das doses de S para o SFT. Para o FNG somente houve diferença da dose 0 mg kg⁻¹ de S para a dose com 30 mg kg⁻¹ de S, porém essa diferença inicial na produção de MSPA é bastante expressiva, passando de 3,21 para 5,72 g vaso⁻¹, respectivamente. Nos tratamentos com FNP houve pequenos acréscimos na produção de MSPA com aumento das doses de S, verificando diferença significativa somente a partir da dose de 60 mg kg⁻¹ de S em relação a dose de 0 mg kg⁻¹ de S. Em todas as doses de S a sequência de maior produção de MSPA foi obtida na seguinte ordem: SFT > FNG > FNP, com exceção da dose de 0 mg kg⁻¹ de S, onde o FNG não diferiu do FNP.

Nas Figuras 4.6 (b), (c) e (d) verifica-se os efeitos de cada fonte de P na produção de MSPA, considerando cada dose de P. Nenhuma influencia do S foi observada sobre o comportamento das doses de P do FNP e SFT na produção de MSPA. Já para o FNG observa-se aumento na produção de MSPA por todas as doses de P, da dose de 0 mg kg⁻¹ de S para a dose com 30 mg kg⁻¹.

Foi verificada diferença no P acumulado do SFT em função do S somente da dose 0 mg kg⁻¹ de S para a dose de 90 mg kg⁻¹ de S não havendo, porém, ajuste de regressão significativo para esse parâmetro (Tabela 4.12 e Figura 4.7 (a)). Com o FNP houve efeito crescente no acúmulo de P em função das doses de S ocorrendo diferença, porém, apenas da dose 0 mg kg⁻¹ para a dose de 90 mg kg⁻¹ de S, com valores de 3,25 para 4,65 mg vaso⁻¹, respectivamente. Com o FNG observou-se acúmulo crescente de P com aumento das doses de S, entretanto diferindo somente a dose 0 mg kg⁻¹ de S das demais doses. Assim como para a MSPA, observou-se expressivo incremento do P acumulado do FNG da dose 0 mg kg⁻¹ para a dose com 30 mg kg⁻¹ de S, alcançando, respectivamente, 3,37 e 6,36 mg vaso⁻¹. Na dose de 0 mg kg⁻¹ de S o FNG não diferiu do FNP no acúmulo de P, comportamento semelhante verificado para a MSPA.

Com base nas tendências de cada fonte de P, considerando as doses de P (Figura 4.7 (b), (c) e (d)) verifica-se comportamento semelhante de todas as doses de P do FNP. Para o SFT há um efeito crescente no acúmulo de P, conforme aumento das doses de P. Já para o FNG observa-se aumento de acúmulo de P na dose 0 mg kg⁻¹ de P até a dose de 60 mg kg⁻¹ de P e essa com comportamento semelhante as demais doses. Verifica-se também, tendência de

aumento no acúmulo de P do FNG da dose 0 mg kg⁻¹ de S para a dose 30 mg kg⁻¹ de S de todas as doses de P (Figura 4.4 (c)).

Tabela 4.11 - Desdobramento da interação entre fontes de fósforo e doses de enxofre, sobre a produção de massa seca de parte aérea (MSPA) de feijão, considerando a média das doses de fósforo⁽¹⁾

Fonte de P ⁽²⁾	Dose de S (mg kg ⁻¹)				Média
	0	30	60	90	
	MSPA (g / vaso)				
SFT	8,27 Aa	8,95 Aa	8,72 Aa	8,94 Aa	8,72 A
FNG	3,21 Bb	5,72 Ba	5,63 Ba	6,21 Ba	5,19 B
FNP	3,13 Bb	3,72 Cab	3,89 Ca	4,44 Ca	3,79 C
Média	4,87 c	6,13 b	6,08 b	6,53 a	5,90 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfósforo Triplo; FNG: Fósforo Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fósforo Natural [Patos de Minas/MG]

⁽³⁾ Média geral

Figura 4.6 – Efeito de fontes de fósforo e doses de enxofre na produção de massa seca da parte aérea (MSPA) de feijão, a) considerando a média das doses de fósforo, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de fósforo, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de fósforo e d) superfosfato triplo considerando cada dose de fósforo

Tabela 4.12 - Desdobramento da interação entre fontes de fósforo e doses de enxofre, sobre o fósforo acumulado (P acumulado) na massa seca de parte aérea de feijão, considerando a média das doses de fósforo⁽¹⁾

Fonte de P ⁽²⁾	Dose de S (mg kg ⁻¹)								Media
	0		30		60		90		
P acumulado (mg / vaso)									
SFT	17,74	Ab	18,59	Aab	18,71	Aab	19,70	Aa	18,68 A
FNG	3,37	Bb	6,36	Ba	6,58	Ba	7,39	Ba	5,93 B
FNP	3,25	Bb	3,77	Cab	4,49	Cab	4,65	Ca	4,04 C
Média	8,12	c	9,57	b	9,93	ab	10,58	a	9,55 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNG: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FNP: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

⁽³⁾ Média geral

Figura 4.7 –Efeito de fontes de fósforo e doses de enxofre no fósforo acumulado na massa seca da parte aérea de feijão, a) considerando a média das doses de fósforo, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de fósforo, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de fósforo e d) superfosfato triplo considerando cada dose de fósforo

De forma geral, a resposta no acúmulo de P e consequentemente na MSPA para o FNP com o aumento das doses de P e S, foi pouco expressiva. Já para o FNG, o efeito do S^0 no aumento da disponibilidade de P foi bastante significativo, chegando a aumentar em aproximadamente 80 % o acúmulo de P na dose com 30 mg kg^{-1} de S em relação ao tratamento controle (0 mg kg^{-1} de S). Cabe ressaltar que esse efeito não continuou proporcionalmente com aumento das doses de S, pois, na dose mais elevada (90 mg kg^{-1} de S), obteve somente $7,39 \text{ mg vaso}^{-1}$ de P acumulado, acréscimo de aproximadamente 16 % em relação a dose com 30 mg kg^{-1} de S. Para o SFT não se verificou influência do S^0 na disponibilidade de P, fato que já era esperado devido à natureza desse fertilizante, com o P totalmente solúvel, não necessitando de acidez para solubilização do P e consequentemente melhorar seu desempenho.

Com base nesses resultados pode-se inferir que o S^0 foi oxidado por microorganismos presentes no solo e a acidez gerada a partir da oxidação atuou na solubilização dos fosfatos naturais, consequentemente melhorando a disponibilidade de P a partir dessas fontes. Stamford et al. (2003) trabalhando com o fosfato natural reativo de Gafsa com adição de S^0 mais inoculação de *Acidithiobacillus*, na cultura do jacatupé (*Pachyrhizus erosus*), verificaram efeito positivo dessa associação no acúmulo de P na MSPA e no teor de P disponível no solo cultivado. Repostas positivas a adição de S^0 sobre solubilização do fosfato natural reativo de Gafsa também foram constatadas por Frandoloso et al. (2010) em trabalho a campo com a cultura do milho, constataram que o índice de eficiência agrônômica passou de 33 para 43 %, na ausência e presença de 30 kg ha^{-1} do S^0 respectivamente.

Resultados satisfatórios da associação do S^0 com fosfatos naturais também foram verificados em trabalhos realizados na Austrália. Evans; Mcdonald e Price (2006) desenvolveram um estudo a campo em fazenda de produção orgânica, onde os tratamentos foram constituídos pelo FN reativo de Arad (Israel) na dose de 500 kg ha^{-1} , aplicado isoladamente (FN) ou em associação com 500 kg ha^{-1} de S^0 (FN+ S^0), em cultivos sucessivos envolvendo: trigo, azevém, ervilhaca e aveia por quatro anos consecutivos, foram verificados resultados superiores da MSPA e P acumulado das culturas, ao longo dos cultivos, e nos quatro anos do estudo, para o tratamento que recebeu a aplicação do FN + S^0 em relação ao tratamento somente com FN.

O efeito do S^0 sobre o aumento da disponibilidade de P dos fosfatos naturais foi mais expressivo para o FNG, comparado ao FNP. Isso ocorreu devido principalmente à reatividade dessas fontes. O fosfato natural reativo de Gafsa é de origem sedimentar e tido como de alta reatividade (SYERS et al., 1986), sendo indicado para a utilização direta na agricultura. A

natureza da formação dos fosfatos sedimentares, com alto grau de substituições isomórficas do fosfato por carbonato na apatita, resulta em instabilidade da estrutura cristalina da rocha onde ocorreu a substituição, podendo ser facilmente hidrolisado (CHIEN, 1977), advindo assim sua alta reatividade. Já o FNP é reconhecido como de muito baixa reatividade e tem apresentado baixa eficiência, constatada por diversos autores (COUTINHO et al., 1991; PROCHNOW et al., 2004; VILLANUEVA et al., 2006; FRANZINI; MURAOKA; MENDES, 2009). Além disso, o FNP contém elevados teores de óxidos de Fe e Al (PROCHNOW et al., 2004) que podem reduzir a ação da acidez sobre a rocha.

Na ausência de S^0 (dose de 0 mg kg^{-1} de S) a produção de MSPA e P acumulado do FNG respondeu de forma semelhante ao FNP, fonte de menor reatividade. Isso provavelmente ocorreu devido ao modo de aplicação das fontes (localizada no sulco) no presente estudo. Mesmo os fosfatos naturais de origem sedimentar e elevada reatividade como o de Gafsa, apresentam baixa eficiência agrônômica quando aplicado localizado no solo (CORRÊA et al., 2005; FRANZINI et al., 2009). O menor contato do fertilizante com o solo resulta em menor reação do fosfato natural com prótons (H^+), necessários para sua solubilização (NOVAES et al., 2007).

Não foi constatada diferença significativa no acúmulo de S, para a interação fontes de P x doses de S. Entretanto, ajustaram-se modelos de regressão das fontes de P em função das doses de S, sendo verificado acúmulo crescente de S para as três fontes de P (SFT, FNG e FNP) conforme aumento das doses de S (Figura 4.8). Os resultados no acúmulo de S foram similares para todas as doses de P do FNP (Figura 4.8 (b)). Para o FNG e SFT houve menor acúmulo de S, na dose 0 mg kg^{-1} de P (Figura 4.8 (c) e(d)).

Figura 4.8 –Efeito de fontes de fósforo e doses de enxofre no acúmulo de enxofre na massa seca da parte aérea de feijão, a) considerando a média das doses de fósforo, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de fósforo, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de fósforo e d) superfosfato triplo considerando cada dose de fósforo

Como o teor de S disponível no solo antes do plantio e da aplicação dos tratamentos era de 3 mg dm⁻³, valor classificado como baixo (RAIJ et al., 1997), os resultados do acúmulo de S podem ser tomados como evidência da ocorrência da oxidação do S⁰ a sulfato e absorção desse pela planta.

São escassos os estudos no Brasil que abordam da utilização do S⁰ como fonte de nutriente. Czychy et al. (2008) desenvolveram um trabalho a campo com a cultura do milho utilizando diferentes fontes de fertilizantes com formas e concentrações de S e verificaram que a cultura respondeu positivamente a adubação, tendo o S⁰ presente nas formulações dos fertilizantes contribuindo no fornecimento de S para o solo e para a nutrição da cultura.

Horowitz (2003), avaliando a eficiência agronômica de fontes de S em casa de vegetação com quatro cultivos consecutivos de milho, verificou que o SFT com S⁰ incorporado ao grânulo apresentou eficiência agronômica crescente com o decorrer dos cultivos, sendo mais eficiente que o gesso e o superfosfato simples nos dois últimos cultivos. Resende et al. (2011) verificaram que a adubação complementar com S⁰ induziu aumento médio de 22% na produtividade de diferentes cultivares de alho.

Em outros países a utilização do S⁰ como fonte de S já vem sendo estudada há algum tempo e tem apresentado resultados satisfatórios, comparados a fontes com S na forma de sulfato, principalmente quando levado em consideração o efeito residual da fonte (MALHI; HEIER; SOLBERG, 2000; WEN et al., 2003; SOLBERG et al., 2007; KOWALENKO, 2009).

4.3.2.2 *P na planta proveniente do fertilizante (Pppf) e aproveitamento do P do fertilizante (APpf)*

Com auxílio da diluição isotópica com ³²P, foi possível comprovar o efeito da acidez gerada a partir da oxidação do S⁰ sobre a solubilização dos fosfatos naturais e consequentemente no aumento da absorção de P.

Não houve diferença das doses de S sobre o Pppf do FNP, embora tenha apresentado um crescente comportamento com aumento das doses de S (Tablea 4.13 e Figura 4.9). Com o SFT houve diferença entre as doses de S somente o controle (0 mg kg⁻¹ de S) para as demais doses, porém não sendo ajustado modelo de regressão com efeito significativo (Figura 4.8 (a)).

O maior efeito das doses de S sobre o Pppf foi verificado para o FNG, sendo observado aumento Pppf com doses de S. Assim, como para o P acumulado, o maior efeito foi observado da dose 0 mg kg⁻¹ de S para a dose com 30 mg kg⁻¹ de S, passando o Pppf de 2,26 para 6,00 mg vaso⁻¹, respectivamente, aumento de aproximadamente 160 % na absorção de P do FNG. Não foi observada diferença da dose de 30 mg kg⁻¹ de S para as demais. Em todas as doses de S, a sequência do maior Pppf foi a seguinte SFT > FNG > FNP, exceto na dose 0 mg kg⁻¹ de S, onde não houve diferença entre o FNG e o FNP, comprovando a baixa eficiência do FNG quando aplicado localizado no solo.

Com base nos resultados das fontes de P para cada dose de P (Figura 4.9 (b), (c) e (d)), observa-se comportamento semelhante das doses de P para o SFT e FNP, em função das

doses de S. Para o FNG verifica-se aumento do Pppf de todas as doses de P a partir da dose de 0 mg kg^{-1} de S para a dose 30 mg kg^{-1} de S.

A partir do desdobramento para o APpf (Tabela 4.14 e Figura 4.10) comprova-se o efeito do S^0 no aumento da eficiência do FNG, pois, o APpf foi crescente com aumento da dose de S, passando de 1,82 % na dose 0 mg kg^{-1} de S para 4,76 % na dose com 30 mg kg^{-1} de S, chegando ao máximo de 5,88 % na dose com 90 mg kg^{-1} de S, porém não diferindo da dose com 30 mg kg^{-1} de S.

Com aumento das doses de S verificou-se pequeno incremento no APpf do FNP, passando de 1,63 % na dose de 0 mg kg^{-1} de S, chegando ao máximo de 2,77 % na dose com 90 mg kg^{-1} de S, entretanto não havendo diferença significativa entre as doses.

Para o SFT só houve diferença no APpf da dose de 0 mg kg^{-1} de S para as demais doses, porém não foi ajustado modelo de regressão com efeito significativo. Esses resultados corroboram os da produção de MSPA, P acumulado e Pppf, todos sem influencia do S^0 sobre esses parâmetros do SFT, isso, como mencionado anteriormente, já era esperado, devido o SFT conter praticamente todo o P solúvel em água.

Tabela 4.13 - Desdobramento da interação entre fontes de fósforo e doses de enxofre, sobre o fósforo acumulado na massa seca de parte aérea de feijão proveniente do fertilizante (Pppf), considerando a média das doses de fósforo⁽¹⁾

Fonte de P ⁽²⁾	Dose de S (mg kg ⁻¹)								Média	
	0		30		60		90			
	Pppf (mg vaso ⁻¹)									
SFT	21,30	Ab	22,05	Aab	22,07	Aab	23,30	Aa	22,18	A
FNR	2,26	Bb	6,00	Ba	6,40	Ba	7,48	Ba	5,54	B
FN	2,09	Ba	2,40	Ca	3,06	Ca	3,27	Ca	2,71	C
Média	8,55	c	10,15	b	10,50	ab	11,35	a	10,14	⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfósforo Triplo; FNR: Fósforo Natural Reativo [Gafsa]; FN: Fósforo Natural [Patos de Minas/MG]

⁽³⁾ Média geral

Figura 4.9 – Efeito de fontes de fósforo e doses de enxofre no acúmulo de fósforo na massa seca da parte aérea de feijão proveniente do fertilizante, a) considerando a média das doses de fósforo, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de fósforo, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de fósforo e d) superfósforo triplo considerando cada dose de fósforo

Tabela 4.14 - Desdobramento da interação entre fontes de fósforo e doses de enxofre, sobre o aproveitamento do fósforo proveniente do fertilizante pelo feijoeiro, considerando a média das doses de fósforo⁽¹⁾

Fonte de P ⁽²⁾	Dose de S (mg kg ⁻¹)								Média	
	0		30		60		90			
Aproveitamento do P (%)										
SFT	16,66	Ab	17,25	Aab	17,02	Aab	18,05	Aa	17,24	A
FNR	1,82	Bb	4,76	Ba	5,09	Ba	5,88	Ba	4,39	B
FN	1,63	Ba	2,01	Ca	2,51	Ca	2,77	Ca	2,23	C
Média	6,70	c	8,01	b	8,20	ab	8,90	a	7,95	⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ SFT: Superfosfato Triplo; FNR: Fosfato Natural Reativo [Gafsa]; FN: Fosfato Natural [Patos de Minas/MG]

⁽³⁾ Média geral

Figura 4.10 – Efeito de fontes de fósforo e doses de enxofre sobre o aproveitamento do fósforo proveniente do fertilizante pelo feijão, a) considerando a média das doses de fósforo, b) fosfato natural [Patos de Minas] considerando cada dose de fósforo, c) fosfato natural reativo [Gafsa] considerando cada dose de fósforo e d) superfosfato triplo considerando cada dose de fósforo

4.4 Conclusões

A associação com enxofre elementar do fosfato natural reativo de Gafsa e do fosfato natural de Patos de Minas promoveu aumento da solubilização dessas fontes e consequentemente da absorção de P pelo feijoeiro, embora não tenha sido suficiente para atingir eficiência do superfosfato triplo;

O efeito do enxofre elementar na solubilização da rocha foi mais expressivo no fosfato natural reativo de Gafsa, comparado ao fosfato natural de Patos de Minas;

Quando aplicados sem a presença do enxofre elementar o fosfato natural reativo de Gafsa e o fosfato natural de Patos de Minas, são equivalentes em fornecer P para a cultura do feijão aplicados localizados no solo;

A absorção de P do fosfato natural reativo de Gafsa aumentou com as doses de enxofre elementar e esse efeito foi mais expressivo na dose inicial, não mantendo proporcionalidade com as demais doses. O efeito sobre o fosfato natural de Patos de Minas foi pouco expressivo;

As doses de P pouco influenciou a absorção de P do fosfato natural de Patos de Minas, tendo havido, porém, pequeno aumento para o fosfato natural reativo de Gafsa.

Referências

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).

BRASIL Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa para fertilizantes minerais, N° 05, de 23 de fevereiro de 2007**. Brasília, 2007. 72 p.

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p. 357-364, 2002.

CAMARGO, A.O.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico).

CHIEN, S.H. Dissolution rates of phosphate rocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 656-657, 1977.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, p. 227-234, 1995.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G.; BILLINGHAM, K.S. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1173-1177, 1996.

COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira – Grãos Safra 2011/2012**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_04_11_15_04_18_boletim_abril_2012.pdf. Acesso em: 20 abr. 2012.

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; SOUZA, S.K.S; FREIRE, F.J.; SILVA, G.B. Gafsa rock phosphate and triple superphosphate for dry matter production and p uptake by corn. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 159-164, 2005.

COUTINHO, E.L.M.; NATALE, W.; VILLA NOVA, A.S.; SITTA, D.S.X. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, p. 1393-1399, 1991.

CZYCZA, R.V.; FONTANIVA, S.; LANA, M.C.; FRANDOLOSO, J.F.; VALE, F. Eficiência agrônômica de diferentes fertilizantes contendo enxofre para a cultura do milho. In: FERTBIO, 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: Embrapa Soja; SBCS; IAPAR; UEL, 2008. 1 CD ROM.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EVANS, J.; PRICE, A. Influence of rates of reactive phosphate rock and sulphur on potentially available phosphorous in organically managed soils in the south-eastern near-Mediterranean cropping region of Australia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 84, p. 105-118, 2009.

EVANS, J.; MCDONALD, L.; PRICE, A. Application of reactive phosphate rock and sulphur fertilisers to enhance the availability of soil phosphate in organic farming. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 75, p. 233-246, 2006.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0 In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., São Carlos, 2000. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FRANDOLOSO, J.F.; LANA, M.C.; FONTANIVA, S.; CZYCZA, R.V. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, p. 686-694, 2010.

FRANZINI, V.I.; MURAOKA, T.; MENDES, F.L. Ratio and rate effects of ^{32}P triple superphosphate and phosphate rock mixtures on corn growth. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 71-76, 2009.

FRANZINI, V.I.; MURAOKA, T.; CORASPE-LEON, H.M.; MENDES, F.L. Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 1092-1099, 2009.

FURTINI NETO, A.E.; FERNANDES, L.A.; FAQUIM, V.; DA SILVA, I.R.; ACCIOLY, A.M.A. Resposta de cultivares de feijoeiro ao S. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 3, p.567-573, 2000.

HOROWITZ, N. **Oxidação e eficiência agronômica do enxofre elementar em solos do Brasil**. 2003. 111 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

JANZEN, H.H.; BETTANY, J.R. Measurement of sulfur oxidation in soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 143, n. 6, p. 444-452, 1987.

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 159-206, 1978.

KOWALENKO, C.G. Availability of spring applications of three sulphur fertilizer sources to grass under humid weather conditions. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 89, p. 511-519, 2009.

LAWRENCE, J.R.; GERMIDA, J.J. Relationship between microbial biomass and elemental sulfur oxidation in agricultural soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 52, p. 672-677, 1988.

LEFROY, R.D.B.; SHOLEH; BLAIR, G. Influence of sulfur and phosphorus placement, and sulfur particle size, on elemental sulfur oxidation and the growth response of maize (*Zea mays*). **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 48, p. 485-495, 1997.

LÉON, L.A.; FENSTER, W.E.; HAMMOND, L.L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Perú and Venezuela. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 798-802, 1986.

MALHI, S.S.; HEIER, K.; SOLBERG, E. Effectiveness of elemental S fertilizers on forage grass. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 80, p. 105-112, 2000.

MOTOMIYA, W.R.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; GONÇALVES, M.C.; ROBAINA, A.D.; NOVELINO, J.O. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 307-312, 2004.

MURAOKA, T. Uso de técnicas isotópicas em fertilidade do solo. In: OLIVEIRA, A. J.; GARRIDO, W.E.; ARAUJO, J.D. de; LOURENÇO, S. (Coord.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA, SEA, 1991. p. 255-273.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 8, p. 471-550.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; PROCHNOW, L.I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 623-631, 2008.

PROCHNOW, L.I.; CHIEN, S.H.; CARMONA, G.; HENAO, J. Greenhouse evaluation of phosphorus sources produced from a low-reactive Brazilian phosphate rock. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 761-768, 2004.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAJAN, S.S.S. Effect of sulfur-content of phosphate rock sulfur granules on the availability of phosphate to plants. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 4, p. 287-296, 1983.

_____. Ways of improving the agronomic effectiveness of phosphate rocks, In: ZAPATA, F.; ROY, R.N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004. p. 85-97.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 57, p. 77-159, 1996.

RESENDE, J.T.V.; MORALES, R.G.F.; RESENDE, F.V.; CARMINATTI, R.; BERTUZZO, L.L.C.; FIGUEIREDO, A.S.T. Aplicação complementar de enxofre em diferentes doses na cultura do alho. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 29, p. 217-221, 2011.

SAIK, R.D. The evolution of a sulphur bentonite fertilizer: one company's perspective. **Sulphur in Agriculture**, Washington, v. 19, p. 74-77, 1995.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. 4th ed. Cary, 1996.

SFREDO, G.J.; KLEPKER, D. Resposta da soja à aplicação de enxofre nos cerrados do Piauí. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA NA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 2003, Uberaba. **Resumos...** Londrina: Embrapa Soja, 2003. p. 136-137.

SHOLEH; LEFROY, R.D.B.; BLAIR, G.J. Effect of nutrients and elemental sulfur particle size on elemental sulfur oxidation and the growth of *Thiobacillus thiooxidans*. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 48, p. 497-501, 1997.

SOLBERG, E.D.; MALHI, S.S.; NYBORG, M.; HENRIQUEZ, B.; GILL, K.S. Crop Response to elemental S and sulfate-S sources on S-deficient soils in the Parkland Region of Alberta and Saskatchewan. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 30, p. 321-333, 2007.

STAMFORD, N.P.; MOURA, A.M.M.F.; SANTOS, K.S.; SANTOS, P.R. Atuação de *Acidithiobacillus* na solubilização de fosfato natural em solo de tabuleiro cultivado com Jacatupé (*Pachyrhizus erosus*). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 75-83, 2004.

SYERS, J.K.; MACKAY, A.D.; BROWN, M.W.; CURRIE, L.D. Chemical and physical characteristics of phosphate rock materials of varying reactivity. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Barking, v.37, p.1057-1064, 1986.

SYSTAT SOFTWARE. **Sigmaplot for Windows, version 10**. 2006. Disponível em: <<http://www.systat.com/products/sigmaplot/>>. Acesso em: 20 mar. 2012.

WEN, G.; SCHOENAU, J.J.; MOOLEKI, S. P.; INAGA, S.; YAMAMOTO, T.; HAMAMURA, K.; INOUE, M.; AN, P. Effectiveness of an elemental sulfur fertilizer in an oilseed-cereal-legume rotation on the Canadian prairies. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 166, p. 54-60, 2003.