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

**Efeito do superfosfato triplo (^{32}P) na absorção do fósforo do fosfato natural
pelas plantas de milho e soja**

Vinícius Ide Franzini

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

**Piracicaba
2006**

Vinícius Ide Franzini
Engenheiro Agrônomo

Efeito do superfosfato triplo (^{32}P) na absorção do fósforo do fosfato natural pelas plantas de milho e soja

Orientador:
Prof. Dr. TAKASHI MURAOKA

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

Piracicaba
2006

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Franzini, Vinícius Ide

Efeito do superfosfato triplo (^{32}P) na absorção do fósforo do fosfato natural pelas plantas de milho e soja / Vinícius Ide Franzini. - - Piracicaba, 2006.
76 p.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.
Bibliografia.

1. Fertilizantes fosfatados 2. Fosfatos – Patos de Minas (MG) 3. Fosfatos – Tunísia
4. Milho 5. Radioisótopos 6. Soja I. Título

CDD 633.15

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

À Deus, por me conceder saúde e uma família maravilhosa.

*Aos meus pais, José Carlos e Luzia,
pelo amor e exemplo de vida,
por sempre mostrarem o caminho da verdade,
por tantas vezes que abdicaram de vossos sonhos para realizar os meus.*

*E à minha irmã, Patrícia,
pelo incentivo e apoio .*

OFEREÇO

*À minha namorada, Roberta, pelo amor, carinho,
companheirismo, compreensão e incentivo.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Takashi Muraoka por sua amizade, confiança, apoio, incentivo e valiosos ensinamentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (USP), pela oportunidade de realização do curso.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo (USP), por permitir o uso das instalações do laboratório de Fertilidade do Solo para realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos para o curso de mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Aos professores do CENA/USP Dr. Antonio Enedi Boaretto e Dr. Cássio Hamilton Abreu Junior pela amizade e ensinamentos científicos.

Às funcionárias do Laboratório de Fertilidade do Solo do CENA/USP Marileusa A. Bassi e Sandra Tereza Pereira pela amizade e auxílio na realização das análises laboratoriais.

Aos funcionários do CENA/USP Fernanda Meucci, João Salvador e Henriqueta pela amizade e ensinamentos.

À secretária da Pós-Graduação do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas Nancy C. Amaral pela amizade e contribuição para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Denis, Tatiana, Fernanda, Felipe, Freddy, Anderson, Edson, Zaqueu, Raul e Carlos pelo companheirismo e colaboração.

Ao Héctor Manuel Coraspe-Léon pela distinta amizade, companheirismo e auxílio no desenvolvimento dos experimentos, além das “aulas” de espanhol.

À minha família pelo amor e compreensão em todos momentos nesta fase da minha vida.

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“As invenções são, sobretudo, o resultado de um trabalho teimoso”.

Alberto Santos Dumont

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 DESENVOLVIMENTO	12
2.1 Revisão Bibliográfica	12
2.1.1 Fósforo no sistema solo-planta	12
2.1.2 Fontes de fósforo e aplicação direta de fosfato natural	13
2.1.3 Modos para melhorar a eficiência dos fosfatos naturais	17
2.1.4 Técnica da diluição isotópica de ^{32}P	19
2.2 Material e Métodos	21
2.2.1 Caracterização do solo utilizado nos experimentos	21
2.2.2 Caracterização das fontes de P	22
2.2.3 Diluição isotópica de ^{32}P	22
2.2.4 Eficiência agrônômica relativa	25
2.2.5 Experimentos	25
2.2.5.1 Experimento 1: Efeito dos modos de aplicação do superfosfato triplo e do fosfato natural no aproveitamento do fósforo do FN pelo milho e soja	25
2.2.5.2 Experimento 2: Efeito das doses e das proporções das misturas de superfosfato triplo com fosfato natural de Patos no aproveitamento do fósforo do FN pelo milho	29
2.2.5.3 Experimento 3 - Efeito das proporções das misturas de superfosfato triplo com fosfatos naturais de Patos ou de Gafsa no aproveitamento do fósforo do FN pela soja	33
2.2.5.4 Experimento 4 - Efeito das doses da mistura de superfosfato triplo com fosfatos naturais no aproveitamento do P do FN pela soja	35
2.3 Resultados e Discussão	38
2.3.1 Experimento 1: Efeito dos modos de aplicação do superfosfato triplo e do fosfato natural no aproveitamento do fósforo do FN pelo milho e soja	38
2.3.2 Experimento 2: Efeito das doses e das proporções das misturas de superfosfato triplo com fosfato natural de Patos no aproveitamento do fósforo do FN pelo milho	43

2.3.3 Experimento 3 - Efeito das proporções das misturas de superfosfato triplo com fosfatos naturais de Patos ou de Gafsa no aproveitamento do fósforo do FN pela soja	50
2.3.4 Experimento 4 - Efeito das doses da mistura de superfosfato triplo com fosfatos naturais no aproveitamento do P do FN pela soja.....	56
3 CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS	64
APÊNDICES	72

RESUMO

Efeito do superfosfato triplo (^{32}P) na absorção do fósforo do fosfato natural pelas plantas de milho e soja

A eficiência do fosfato natural (FN) pode ser melhorada se aplicado junto com uma fonte de elevada solubilidade em água. O presente trabalho constou de quatro experimentos realizados em casa-de-vegetação do Laboratório de Fertilidade do Solo do CENA/USP, nos quais cultivaram-se plantas de milho (*Zea mays* L.) e de soja [*Glycine max* (L.) Merr.] em amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico utilizando-se o método da diluição isotópica de ^{32}P para: a) verificar se o efeito de uma fonte de P de elevada solubilidade em água no aumento da disponibilidade do P do FN é fisiológico (disponibilidade inicial de P) ou químico (acidificação), b) avaliar o efeito das doses e das proporções das misturas de superfosfato triplo com fosfatos naturais, e c) comparar a eficiência do fosfato natural de Patos de Minas com o de Gafsa aplicados com o SFT. As fontes de P usadas foram o superfosfato triplo (SFT) como fonte padrão e fosfatos naturais (FNs) de Patos de Minas e de Gafsa. A aplicação de uma fonte de P solúvel em água juntamente com fosfato natural melhorou o aproveitamento do fósforo do FN tanto pelo milho como pela soja, embora esse efeito seja pequeno para o fosfato natural de Patos. Para o milho, a simples presença de P na forma solúvel em água na fase inicial de desenvolvimento não melhorou o aproveitamento do P da fonte natural, provavelmente por causa do menor período de tempo de desenvolvimento das plantas em relação à soja, no qual efeito foi significativo. A compactação do FN de Gafsa com SFT aumentou o aproveitamento do P do FN para o milho comparado à aplicação deste localizado no solo e na soja esse efeito foi maior obtendo aproveitamento superior ao do FN de Gafsa misturado ao solo. Assim, a maior utilização do P do FN pela soja ocorreu tanto pelo efeito químico quanto fisiológico. A aplicação localizada do SFT proporcionou resultado melhor do que quando este fertilizante foi misturado ao solo, ocorrendo o contrário para o fosfato natural. As doses de fósforo aplicadas com as misturas de superfosfato triplo com os FNs não afetaram o aproveitamento do P do fosfato natural pelo milho e pela soja, enquanto que o aumento do SFT nas proporções das misturas aumentaram significativamente o aproveitamento do P dos fosfatos naturais. Ao contrário do FN de Patos, o aproveitamento de P do FN de Gafsa quando misturado na proporção 80 SFT: 20 FN, na soja, foi tão eficiente quanto o SFT aplicado sozinho.

Palavras-chave: fertilizantes fosfatados, fosfato natural de Patos de Minas, fosfato natural de Gafsa, radioisótopo, técnica isotópica de ^{32}P , eficiência agrônômica

ABSTRACT

Effect of triple superphosphate (^{32}P) on phosphate rock phosphorus uptake by maize and soybean plants

The efficiency of phosphate rock (PR) can be improved applying it together with water-soluble P fertilizer. Four experiments were carried out in the greenhouse of the Soil Fertility Laboratory, CENA/USP (Centro de Energia Nuclear na Agricultura - Universidade de São Paulo), with maize (*Zea mays* L.) and soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] grown in a dystrophic Typic Haplustox using ^{32}P dilution technique to: a) verify if the increasing effect of water-soluble P source on PR phosphorus availability is physiological (initial higher P availability) or chemical (acidification), b) evaluate the effect of rate and proportion of triple superphosphate (TSP) mixed with PR, and c) compare the efficiency of Patos de Minas with of Gafsa PR applied with TSP. The P sources utilized were the TSP as standard P source and Patos de Minas and Gafsa PR. The application of a water-soluble P source improved the PR phosphorus utilization efficiency by maize and soybean, although this effect was small for the Patos PR. For maize, the simple presence of P in water-soluble form at initial stage of plant growth did not increase the PR phosphorus utilization, probably due to the short growing period in relation to soybean, in which the effect was significant. The compaction of Gafsa PR with TSP increased the absorption of PR P by maize plants. Compared to its localized application in the soil this effect was bigger in soybean plants, obtaining better efficiency than the Gafsa PR mixed in the soil. Therefore, the increased PR P utilization by soybean plants occurred by both chemical and physiological effect. The localized application of TSP promoted better results than when this fertilizer was mixed in the soil, unlike with PR. The increasing rate of P applied in mixed form (TSP and PR) did not affect the PR P utilization by the crops, while the increasing proportion of TSP in the mixture increased the absorption of PR P. The Gafsa PR, when mixed with TSP in proportion 80 TSP: 20 PR, was as efficient as the TSP applied sole.

Keywords: phosphate fertilizers, Patos de Minas phosphate rock, Gafsa phosphate rock, ^{32}P isotopic technique, agronomic effectiveness

1 INTRODUÇÃO

A expectativa de aumento da população mundial que era de 6 bilhões de habitantes em 1999 é de 8,5 bilhões para 2025. Para alcançar a demanda de alimentos no mundo neste ano, cerca de 4 bilhões de toneladas de cereais em grãos de acordo com a FAO, seria necessário pelo menos dobrar a produtividade atual das culturas (para $4,5 \text{ t ha}^{-1}$).

A soja é a oleaginosa mais importante cultivada no mundo e de maior expressão econômica no planeta, enquanto que dentre as principais culturas de cereais dos trópicos sub-úmidos e semi-áridos, o milho tem a mais alta produtividade em condições adequadas de água, luz e nutrientes minerais. No Brasil, essa soja e o milho são respectivamente, a primeira e a segunda cultura em maior quantidade produzida e valor de produção entre os grãos.

A maioria dos solos agricultáveis do mundo é deficiente em um ou outro nutriente de plantas (BALIGAR; FAGERIA; HE, 2001) e o P é considerado um nutriente que limita a produção em aproximadamente 5,7 bilhões de hectares desses solos (HINSIGER, 2001). No Brasil, particularmente na região sob Cerrados, cerca de 90% das análises químicas de amostra de terra coletadas apresentaram teor de P disponível (Mehlich-1) inferior a 2 mg dm^{-3} (LOPES; COX, 1977).

O uso de fertilizantes fosfatados acidulados solúveis em água, como superfosfato triplo ou simples, pelos agricultores de baixa renda é limitado nos países em desenvolvimento, principalmente pelo seu custo. Uma alternativa seria a utilização, pelo menos em parte, de fosfatos naturais (FN), de menor custo. Não obstante, embora o Brasil apresente inúmeras reservas de FN, eles são pouco utilizados, devido à baixa eficiência que eles apresentam.

Pesquisas mais recentes têm demonstrado que uma maneira de melhorar a eficiência de FN é sua aplicação juntamente com uma fonte de P solúvel em água em solos ácidos ou mesmo em solos ligeiramente alcalinos. A maioria desses estudos tem sido realizados em condições de solos, assim como de fontes naturais de fósforo distintas às do Brasil. Além disso, estes trabalhos têm utilizado a proporção de 50:50 nas misturas dessas fontes e o efeito das proporções não tem sido relatado.

Os objetivos deste estudo foram usar o ^{32}P como traçador para:

- Avaliar se o efeito no aumento da disponibilidade do P do FN é químico ou fisiológico.

- Avaliar e quantificar o efeito de doses e proporções das misturas de uma fonte de fósforo de elevada solubilidade em água com fosfatos naturais (FNs) no aumento da disponibilidade do P dos FNs.
- Comparar a eficiência de utilização (aproveitamento) do P de um fosfato natural reativo com um Brasileiro de baixa reatividade aplicados em misturas com uma fonte de P solúvel em água pelas culturas do milho e da soja.

As hipóteses testadas foram:

- A aplicação de uma fonte de P de elevada solubilidade em água pode melhorar a eficiência de fosfato natural quanto ao aproveitamento do P pelas plantas e esse efeito depende das proporções e das doses das misturas dessas fontes de P.
- Esse efeito não deve ser pela simples presença de uma forma solúvel de P no solo no estágio inicial de desenvolvimento da planta. O efeito deve ser a solubilização parcial do FN pela acidez residual da fonte solúvel e para que isso ocorra, as duas fontes devem ser aplicadas em contato íntimo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Fósforo no sistema solo-planta

O nutriente fósforo (P) é menos abundante que o nitrogênio e o potássio nos solos e o total de P na superfície dos solos varia de 0,005 a 0,15% (HAVLIN et al., 2005). Esse nutriente é considerado o fator mais limitante do desenvolvimento de plantas em solos altamente intemperizados de regiões tropicais (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996). No Brasil é o nutriente mais utilizado como fertilizante, embora seja exigido em menor quantidade que o nitrogênio e o potássio pelas plantas, e isto se explica pelo baixo teor do elemento nos solos e a forte interação deste nutriente com o solo (RAIJ, 1991).

A fixação de fósforo no solo, em formas lábeis ou não, ocorre pela precipitação do P em solução com formas iônicas de Fe, Al e Ca, e principalmente, de maneira mais significativa, pela sua adsorção pelos oxidróxidos de Fe e de Al, geralmente presentes em maiores quantidades em solos tropicais (NOVAIS; SMYTH, 1999).

O P está associado a diversas funções vitais no metabolismo das plantas como armazenamento e transferência de energia (ATP) e de natureza estrutural em macromoléculas como o DNA; esse nutriente é absorvido principalmente durante o estágio vegetativo de desenvolvimento das plantas e posteriormente, mais do que absorvido, o P é retranslocado para frutos e sementes durante os estágios reprodutivos (MARSCHNER, 1995).

Sintomas característicos de deficiência de fósforo incluem crescimento reduzido em plantas jovens e uma coloração verde escura das folhas, as quais podem encontrar-se malformadas e conter pequenas manchas de tecido morto, chamadas manchas necróticas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

2.1.2 Fontes de fósforo e aplicação direta de fosfato natural

Dentre os minerais contendo fósforo, as apatitas, de fórmula geral $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_6(\text{F}, \text{OH})_2]$, são as de maior ocorrência e de maior uso para a produção de fertilizantes fosfatados.

Dentre as várias fontes minerais e orgânicas de P disponíveis para o uso na agricultura, os fosfatos totalmente acidulados, como os superfosfatos, são as fontes de P mais utilizadas no mundo para a correção dos baixos teores de fósforo no solo (BARBOSA FILHO, 1984). Um benefício desses fertilizantes fosfatados é a facilidade de aplicação localizada por se tratar de produtos granulados. Entretanto, em solos ácidos intemperizados, imediatamente após a aplicação de fontes de P de elevada solubilidade em água uma parte do fósforo aplicado pode tornar-se imediatamente indisponível pelos processos de adsorção nas superfícies de óxidos de Fe/Al e minerais de argila e/ou precipitação como minerais secundários de fósforo ligado a ferro e a alumínio (HAVLIN et al., 2005).

Além disso, o uso de fertilizantes fosfatados acidulados solúveis em água, como superfosfato triplo ou simples, pelos agricultores de baixa renda é limitado nos países em desenvolvimento principalmente pelo seu elevado custo (CHIEN; MENON; BILLINGHAM, 1996).

Somado a esses fatores, Vance, Uhde-Stone e Allan (2003) estimam que as reservas de fósforo no mundo economicamente viáveis para exploração podem ser suficientes até 2050, indicando a necessidade de estudar a eficiência de fontes alternativas de P para as culturas.

Em alternativa às fontes totalmente aciduladas podem-se utilizar diretamente os fosfatos naturais, que são grupos minerais de ocorrência natural contendo elevado teor de minerais fosfáticos, que podem ser tanto minérios não beneficiados como a produtos concentrados (McCLELLAN; VAN KAUWENBERGH, 2004). A concentração desses minerais pode ser realizada por processos físicos como lavagem e/ou flotação para separá-los dos outros minerais com os quais estão misturados nos depósitos naturais (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

Do total de fosfato natural produzido no ano de 1999, aproximadamente 145,5 milhões de toneladas, os Estados Unidos da América com 28,1% desse total foram o maior produtor e o Brasil o oitavo, produzindo mais de 4 milhões de toneladas (MEW, 2000).

As reservas totais de FN no Brasil estão distribuídas principalmente nos Estados de Minas Gerais (73,8%), Goiás (8,3%) e São Paulo (7,3%), correspondendo a quase 90% do total existente no país (DNPM/ DIRIN, 2001).

Quanto à mineralogia dos fosfatos brasileiros, constata-se que a fluorapatita é largamente predominante, sendo o mineral primário das rochas ígneas, ocorrendo também presença significativa de carbonato-fluorapatita e carbonato-apatita (BORN; KAHN, 1990). Fosfatos naturais de origem magmática são de baixa eficiência no curto prazo para culturas anuais e bianuais. Apresentam em torno 24% de P_2O_5 total, mínimo de 4% solúvel em ácido cítrico e 23 a 27% de Ca. Por outro lado, os fosfatos de origem sedimentar apresentam 28% de P_2O_5 total, mínimo de 9% solúvel em ácido cítrico e 30 a 34% de Ca, sendo produtos excelentes, comparáveis às fontes de fósforo solúveis em água, em algumas situações.

Marciano, Rodriguez e Araújo (1990) constataram que o fosfato predominante no depósito sedimentar de Patos de Minas é a flúor-carbonato-apatita ou uma mistura de fluorapatita e carbonato-apatita. Já no manto de intemperismo de Araxá, a carbonato apatita é encontrada subordinadamente na interface rocha são/ manto intemperizado.

Trabalhos que procuram estudar essa complexa interação fertilizante fosfatado- acidez do solo, particularmente quando se utiliza planta como indicadora do processo, têm esbarrado em algumas dificuldades metodológicas. Assim, as condições ácidas de solo, que podem trazer algum efeito benéfico sobre a recuperação do P aplicado, particularmente quando na forma de fosfatos naturais, são, para a maioria das plantas, prejudiciais ao seu crescimento e desenvolvimento. A condição ácida tida, de modo geral, como favorável à solubilização de fosfato natural, está associada, normalmente, baixos teores de Ca e Mg e altos teores de Al

trocável, condições que limitariam o crescimento da planta, (KUNISHI, 1982). Como via de regra a calagem é uma prática imprescindível na maioria dos nossos solos, pouco poderia esperar que ocorresse solubilização de um fosfato natural a ponto de poder suprir a demanda de P para a cultura pelos simples efeito do próprio solo.

Bolland, Gilkes e Brennan (2001), estudando a efetividade das fontes naturais de P [Carolina do Norte e Sechura (Bayovar) RPRs] em dezoito solos da Austrália, relativo a superfosfato, concluíram que a efetividade agrônômica de fertilizantes de fosfato natural é uma consequência de interações complexas desses fosfatos com o solo e que não pode ser predita adequadamente por medidas de uma única propriedade do solo.

A eficiência dos fosfatos naturais está intimamente relacionada com o grau de substituição de carbonato (CO_3^{2-}) por fosfato (PO_4^{3-}), que gera instabilidade na estrutura cristalina da rocha (LEHR; McCLELLAN, 1972). A dureza da estrutura cristalina é tão importante que rochas fosfáticas de origem ígnea, como a maioria das rochas nacionais, são reconhecidas por sua menor reatividade para aplicação direta como fertilizante. As rochas de origem sedimentar podem ser reativas ou não, dependendo do grau de substituição isomórfica.

Diamond (1979) propôs um sistema de classificação dos fosfatos naturais para aplicação direta em três categorias (baixa, média e alta reatividade) de acordo com o teor de P_2O_5 solúvel dos materiais em citrato neutro de amônio, ácidos cítrico e fórmico. Já Hammond e Leon (1983) propuseram um sistema com quatro categorias (alta, média, baixa e muito baixa) baseado na eficiência agrônômica relativa (EAR) e no teor de P_2O_5 (%) solúvel em citrato neutro de amônio.

Assim sendo, os fosfatos naturais podem ser divididas em rochas de alta, média, baixa e muito baixa reatividade, fazendo parte do grupo das rochas de alta eficiência aquelas provenientes da Tunísia (Gafsa), Israel (Arad), Peru (Sechura, Bayovar) e Carolina do Norte (EUA), as do segundo grupo são as rochas vindas do Centro da Flórida e Tennessee (EUA), Pesca e Huila (Colômbia); as de baixa eficiência são a de Patos de Minas, Abaeté e as de muito baixa são a de Jacupiranga, Catalão e Tapira (LEON; FENSTER; HAMMOND, 1986).

Segundo Lehr e McClellan (1972) podem-se obter maiores ganhos com a adubação fosfatada, caso se utilizasse um fosfato natural com eficiência agrônômica superior à apresentada pelos fosfatos naturais brasileiros, visto serem estes, por natureza geológica, de baixa reatividade, variando de 23 a 42 %, em comparação com o valor de 100% dos fosfatos naturais Argélia e

Marrocos. A utilização, portanto, dos fosfatos naturais brasileiros, apesar de terem sido, na década de 70, bastante aventados para fosfatagem do solo, não teve resultado esperado.

Outros três fatores são de significativa importância para a obtenção de bons resultados na aplicação direta dos fosfatos naturais: superfície específica, granulometria e a presença de outros minerais na estrutura cristalina da rocha. O uso de fosfatos naturais, mesmo com inúmeras restrições, apresenta como vantagem seu maior efeito residual devido à sua mais lenta solubilização no solo (COUTINHO et al, 1991; SMYTH; SANCHEZ, 1982).

Os depósitos sedimentares, com fornecimento cerca de 80-90% da produção mundial de fosfato natural no período de 1994 a 2004, são encontrados principalmente no Marrocos e outros países Africanos, Estados Unidos da América e na China (McCLELLAN; VAN KAUWENBERGH, 2004). A maioria desses depósitos contém um carbonato-fluorapatita denominado francolita (McCONNELL, 1938); francolitas com alta substituição de carbonato por fosfato são altamente reativas e a maioria é satisfatória para aplicação direta como fertilizantes ou corretivos de solo (McCLELLAN; VAN KAUWENBERGH, 2004).

Os depósitos ígneos, com 10-20% do total produzido no mundo, são encontrados em países como a Rússia, Canadá, África do Sul, Finlândia e Brasil. Esses depósitos geralmente contem tipos de fluorapatitas relativamente de baixa reatividade e menos satisfatório para aplicação direta. Os produtos intemperizados de apatitas de origem ígnea e sedimentar (fosfatos de ferro e alumínio) não são recomendados para aplicação direta na agricultura em seu estado natural (McCLELLAN; VAN KAUWENBERGH, 2004).

Embora o Brasil apresente inúmeras reservas de fosfatos naturais cuja aplicação de forma direta reduza consideravelmente os gastos em relação a fontes solúveis, são pouco utilizados devido à baixa eficiência que apresentam, segundo foi constatado por diferentes pesquisadores no Brasil (TANAKA, 1978; BRAGA; MASCARENHAS; FEITOSA, 1980; SMITH; SANCHES, 1982; GOEDERT; LOBATO, 1984; DYNIA, 1977; FEITOSA et al., 1978; GOEDERT; REIN; SOUZA, 1990; COUTINHO et al., 1991).

Algumas estimativas indicam que o consumo de fosfato natural para aplicação direta teve uma queda de 5,6% para 1,4% do total de P_2O_5 consumido, o que equivale a aproximadamente 1,5 milhões de toneladas de uma fonte de P com 30% de P_2O_5 (VAN KAUWENBERGH, 2003), ou segundo Maene (2003), entre os anos de 1980 a 1998, houve uma redução de 1,66 para 0,57 milhões de toneladas nesse consumo.

Apesar da incorporação de novas áreas à agricultura Brasileira, a baixa disponibilidade de P desses solos e a existência de grandes jazidas de FN no Brasil, a utilização desses fosfatos naturais têm ocorrido mais como fosfatagem corretiva, isso principalmente por causa da baixa reatividade dos fosfatos brasileiros (NOVAIS; SMITH, 1999).

A eficiência agronômica de fosfatos naturais aplicados diretamente como fontes de P depende das suas propriedades físicas e químicas, do clima, das propriedades do solo, das espécies de plantas e sistema de cultivo, das práticas de manejo e das interações desses fatores (KHASAWNEH; DOLL, 1978; CHIEN; MENON, 1995a; RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996).

A aplicação direta de fosfatos naturais freqüentemente não dá resultados satisfatórios quando esses são de baixa reatividade, aplicados em solos com pH elevado ou em período de tempo curto de desenvolvimento de uma cultura (CHIEN; MENON, 1995a).

2.1.3 Modos para melhorar a eficiência dos fosfatos naturais

Segundo Rajan (2004), nos casos em que as aplicações diretas dos fosfatos naturais não são eficientes existem vários meios para aumentar a eficiência, que podem ser divididos em biológicos, químicos e físicos.

Os meios biológicos de aumento da eficiência agronômica dos fosfatos naturais são: (i) aplicação do FN com resíduos de compostos orgânicos denominados fosfo-composto, (ii) inoculação de sementes ou plântulas com microorganismos solubilizadores de fósforo e (iii) uso de genótipos de culturas com maior sistema radicular, conseqüentemente maior exploração do solo, aumento na liberação de prótons e ácidos orgânicos e na produção de enzimas fosfatases que transformam formas orgânicas de fósforo em inorgânicas (RAJAN, 2004).

A acidulação parcial do fosfato natural é um método químico para aumentar a eficiência agronômica de fosfatos naturais que não são recomendadas para aplicação direta, além disso, apresentam um menor custo do que os totalmente acidulados devido a menor quantidade de ácidos, geralmente sulfúrico ou fosfórico para fabricar os superfosfatos simples e triplo, respectivamente (RAJAN, 2004). Por esses motivos essa prática foi estudada internacionalmente (HAMMOND; CHIEN; MOKWUNYE, 1986; RAJAN; MARWAHA, 1993; CHIEN; MENON, 1995b) e também no Brasil (FREIRE; BRAGA; MARTIN FILHO, 1983; GOEDERT; REIN;

SOUZA, 1990). Apesar disso, não teve aqui aceitação como em alguns países como a Venezuela onde os fosfatos parcialmente acidulados são bastante usados (CASANOVA, 1995).

Casanova, Salas e Toro (2002), avaliando a eficiência de fertilizantes fosfatados em solos da Venezuela com auxílio da técnica da diluição isotópica de ^{32}P , constataram maior aproveitamento do P do superfosfato triplo, seguido do fosfato de Riecito parcialmente acidulado (40%) e do fosfato natural de Riecito por plantas de capim *Agrostis* sp.

Os métodos físicos que podem aumentar a eficiência dos fosfatos naturais são: (i) aplicação do FN junto com enxofre elementar, (ii) FN compactado com fontes fosfatadas de elevada solubilidade em água e (iii) mistura seca de FN com fertilizantes fosfatados de elevada solubilidade em água (RAJAN, 2004).

O princípio do uso de fosfato natural junto com enxofre elementar é a oxidação do S a H_2SO_4 pelas bactérias do solo e este ácido auxilia na dissolução do FN.

Fontes de P de composição química similar aos fosfatos parcialmente acidulados podem ser preparadas pela compactação seca, sob pressão, de fosfatos naturais com fertilizantes solúveis, como os superfosfatos simples ou triplo (CHIEN et al, 1987; CHIEN; MENON, 1995b; MENON; CHIEN; GADALLA, 1991).

A tecnologia da compactação oferece a vantagem de usar fosfatos naturais que não são satisfatórios para acidulação parcial direta por causa do seu alto conteúdo de sesquióxidos de Al e Fe (RAJAN, 2004). Estudos comprovam que a eficiência dos fosfatos naturais, mesmo daqueles de baixa reatividade, é aumentada após a compactação com uma fonte de P de elevada solubilidade (CHIEN et al., 1987; KPOMBLEKOU et al., 1991; PROCHNOW et al., 2004), isto porque a acidez produzida pela hidrólise do fosfato monocálcico dos superfosfatos para H_3PO_4 no solo pode aumentar a dissolução do FN, melhorando assim a disponibilidade do P do FN para as plantas (MOKWUNYE; CHIEN, 1980).

Outra prática que tem sido relatada que aumenta consideravelmente a eficiência dos fosfatos naturais de baixa ou média reatividade para as culturas é atender a necessidade inicial da planta em P com fertilizantes solúveis em água. Assim, a planta desenvolveria melhor o sistema radicular e, por sua vez, poderia utilizar o P do FN mais efetivamente que planta tratada somente com FN (CHIEN; HAMMOND, 1988; CHIEN; MENON; BILLINGHAM, 1996; ZAPATA; ZAHARAH, 2002). Outra explicação para o aumento da disponibilidade de P do FN é o P proveniente do SFT reagiria preferencialmente com o FN, diminuindo assim a formação dos

compostos de P-Fe e P-Al o que resulta no aumento dos teores de P em solução (McLEAN; LOGAN, 1970).

Zapata e Zaharah (2002), cultivando plantas de trigo em um estudo em casa-de-vegetação, verificaram aumento na absorção de P de um fosfato natural (Centro da Flórida) das misturas com superfosfato triplo e atribuíram este efeito principalmente ao melhor desenvolvimento do sistema radicular no estágio inicial de desenvolvimento das plantas, pois as fontes foram aplicadas separadamente no solo e a interação química entre essas fontes de P provavelmente foi insignificante. Por outro lado, Xiong et al. (2002) não observaram aumento na eficiência de um fosfato natural de média reatividade da China (Jiangxi) aplicado sozinho ou com superfosfato simples para as culturas do amendoim e do trigo-sarraceno (“buckwheat”).

A maioria desses estudos foram feitos com fosfatos naturais de alta ou média reatividade, diferentemente do FN brasileiro que é de baixa reatividade.

Existem no Brasil poucos trabalhos nesse sentido. Assim, Nachtigall et al. (1989) avaliaram a EAR de misturas de cinco proporções de SFT com um fosfato natural do Brasil de baixa reatividade (Jacupiranga), aplicadas no mesmo grânulo ou separados no solo, para cultura do milho em casa-de-vegetação, e verificaram que a EAR das misturas foi muito menor do que a do superfosfato triplo e também concluíram que a presença da fonte de P de elevada solubilidade em água não aumentou o aproveitamento do P do FN, pois o aumento na EAR foi diretamente proporcional ao aumento da proporção do SFT nas misturas.

Prochnow et al. (2004), porém, observaram que o fosfato natural de Patos de Minas (baixa reatividade) quando aplicado isoladamente ou em misturas com superfosfato simples (SSP), na proporção 50:50, tanto na forma granulada (compactada) quanto em pó, a EAR do FN compactado, sob pressão, com o SSP foi estatisticamente equivalente à utilização do superfosfato simples só. Além disso, a partir das equações de regressão, estimaram aumento na absorção do P do FN de Patos pelas culturas do trigo e do azevém (“ryegrass”) na presença do SFS em relação ao FN aplicado sozinho.

2.1.4 Técnica da diluição isotópica de ^{32}P

Segundo Muraoka (1991) o uso das técnicas isotópicas apresentam duas vantagens inerentes: (i) extrema sensibilidade, com possibilidade de detecção do elemento na ordem de

grandeza de 10^{-15} g e (ii) possibilidade de separar, por exemplo, na planta o elemento proveniente do fertilizante, do solo ou de outra fonte.

O fósforo possui dois radioisótopos que podem ser utilizados como traçadores em estudos de fertilidade do solo e nutrição de plantas, o ^{32}P e o ^{33}P . Uma característica de grande importância desses isótopos radioativos é a meia-vida, definida como o tempo necessário para que a atividade de uma amostra se reduza a metade da atividade inicial. O ^{33}P possui meia-vida (25,3 dias) maior que a do ^{32}P (14,3 dias) e apesar do seu uso ser mais interessante, no Brasil praticamente utiliza-se somente o ^{32}P nos estudos com planta e solo devido os custos e dificuldade de importação do outro radioisótopo. A atividade do radioisótopo ^{32}P é determinada pelo efeito Cerenkov em detector de cintilação em meio líquido, que é produzido quando as partículas β^- com energia superior a 0,263 MeV passam por meio aquoso e essas partículas carregadas adquirem velocidade maior que a velocidade da luz naquele meio (VOSE, 1980).

O ^{32}P tem permitido estudos relacionados à fertilidade do solo e nutrição de plantas no Brasil (NEPTUNE; MURAOKA; SFTEWART, 1979; VOSE, 1980; SCIVITTARO; BOARETTO; MURAOKA, 1997; FERNANDES; MURAOKA, 2002; VILLANUEVA et al., 2002; VILLANUEVA et al., 2006) e em outros países (CHIEN; MENON; BILLINGHAM, 1996; XIONG; ZHOU; LU, 1996; CASANOVA; SALAS; TORO, 2002; MONTENEGRO; ZAPATA, 2002; RODRIGUEZ; HERRERA, 2002; ZAPATA; ZAHARAH, 2002).

Inúmeras têm sido as informações obtidas com o uso de metodologia isotópica, graças a disponibilidade de ^{32}P , sobre a dinâmica do fósforo no sistema solo-planta e principalmente nos estudos da eficiência de fertilizantes fosfatos solúveis como o superfosfato triplo e simples, inclusive no Brasil (NEPTUNE; MURAOKA; SFTEWART, 1979; MURAOKA, 1983; FAQUIN; MALAVOLTA; MURAOKA, 1990; SALCEDO; BERTINO; SAMPAIO, 1990; SCIVITTARO; BOARETTO; MURAOKA, 1997). Os autores constataram que raramente a eficiência dos fosfatos, mesmo os solúveis em água, passava de 10%, contrariando a eficiência teórica normalmente considerada nos cálculos de adubação. Entretanto, poucos têm sido trabalhos usando esta metodologia para avaliação dos fosfatos naturais, em virtude de um problema na marcação do P durante o bombardeamento com nêutrons no reator nuclear, que é a produção simultânea de outros radioisótopos de elementos presentes nas rochas fosfáticas, alguns com meia-vida de longa duração (FRIED; MACKENZIE, 1949).

Assim, uma pequena amostra de um fosfato natural, que experimentalmente foi bombardeado no reator da IPEN há mais de 35 anos continua ainda radioativo no CENA (NASCIMENTO FILHO¹ comunicação pessoal).

A alternativa é a utilização da técnica conhecida como: “Extensão do Valor A ou L”, ou método da diluição isotópica inversa (ZAPATA; AXMANN, 1995). Consiste essencialmente em marcar o solo com solução isotopicamente marcada (^{32}P) e mede-se a razão isotópica na planta (atividade específica do P) do P fornecido pelo solo marcado. A razão isotópica do tratamento (no caso com fosfato natural) decrescerá em consequência da absorção do P dessa fonte. Um tratamento padrão (sem aplicação da fonte não marcada) é necessário como referência.

Alguns autores, entre eles Kucey e Bole (1984), utilizaram esse método (marcação do P do solo) para comparação da eficiência de diversos fosfatos naturais, demonstrando a sua eficácia.

De acordo com o Chien, Menon e Billingham (1996), o uso de ^{32}P é imprescindível quando se pretende avaliar a eficiência de fosfatos naturais aplicados na presença de uma fonte solúvel de P, por causa das interações (efeito “priming”) entre P da fonte de elevada solubilidade em água, do fosfato natural e do solo. A enorme vantagem do uso de ^{32}P é a possibilidade de distinguir na planta o P proveniente do solo, da fonte solúvel e do fosfato natural.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Caracterização do solo utilizado nos experimentos

O solo utilizado nos experimentos, classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (EMBRAPA, 1999), foi coletado à profundidade de 0 a 0,2 m no município de Piracicaba-SP. As amostras de terra contendo respectivamente 280, 70 e 650 g kg⁻¹ de argila, silte e areia (CAMARGO; MONIZ; VALADARES, 1986), foram secas ao ar, posteriormente passadas em peneira de malha 4 mm e as propriedades químicas (Tabela 1) foram determinadas de acordo com os métodos analíticos descritos por Raij et al. (2001).

¹ NASCIMENTO FILHO, L.F. Professor do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP).

Tabela 1 - Características químicas do solo utilizado nos experimentos

pH	MO	P	K	Ca	Mg	H + Al	SB	CTC	V
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³				-----%		
4,7	20	6	0,8	12,9	6,4	31,2	20,1	51,3	39,2

2.2.2 Caracterização das fontes de P

As fontes de P utilizadas neste estudo foram: (i) superfosfato triplo (SFT) como fonte de P padrão, (ii) fosfato natural de Patos de Minas, (iii) fosfato natural de Gafsa e (iv) misturas de SFT com fosfato natural de Patos ou de Gafsa.

Os teores de P totais e solúveis em água, em CNA + H₂O e em AC 2 % estão apresentados na Tabela 2 e foram determinados de acordo com a metodologia oficial do Ministério da Agricultura (Brasil, 1983). De acordo com esta metodologia, o teor total indica o potencial de fósforo em qualquer fertilizante, enquanto que os teores solúveis em CNA + água e em ácido cítrico são utilizados para avaliar o P disponível respectivamente, dos fertilizantes acidulados e dos fosfatos naturais.

Tabela 2 - Teores de P total, solúvel em CNA + água e solúvel em ácido cítrico a 2 % das fontes de P utilizadas nos experimentos

Fonte de P	Teor de P		
	Total	⁽³⁾ CNA + água	⁽⁴⁾ AC
	%		
⁽¹⁾ SFT	19,2	19	-
⁽²⁾ FN de Patos	10,6	-	2,1
⁽²⁾ FN de Gafsa	12,3	-	4,6

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural.

⁽³⁾ Citrato neutro de amônio.

⁽⁴⁾ Ácido cítrico a 2%.

2.2.3 Diluição isotópica de ³²P

O fósforo na planta proveniente do superfosfato triplo, dos fosfatos naturais e o aproveitamento do P dessas fontes foram calculados de acordo com Chien, Menon e Billingham, (1996), conforme as equações a seguir:

FN + Solo

$$F_{FN} = 1 - \left[\frac{AE_{P(FN + Solo)}}{AE_{P(Solo)}} \right] \quad (1)$$

$$P_{FN} = P_{(FN + Solo)} F_{FN} \quad (2)$$

$$\%P_{PPFN} = 100 F_{FN} \quad (3)$$

onde:

F_{FN} = fração do P absorvido do FN

$AE_{P(FN + Solo)}$ = Atividade específica do P na planta absorvido do (FN + solo)

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

P_{FN} = P absorvido do fosfato natural

$P_{(FN + Solo)}$ = P absorvido do (FN + Solo)

$\%P_{PPFN}$ = % de P na planta proveniente do fosfato natural

SFT + Solo

$$F_{SFT} = \frac{AE_{P(SFT + Solo)}}{AE_{P(SFT)}} \quad (4)$$

$$P_{SFT} = P_{(SFT + Solo)} - F_{SFT} \quad (5)$$

$$P_{Solo(SFT)} = P_{(SFT + Solo)} - P_{(SFT)} \quad (6)$$

$$\%P_{SFT} = 100 F_{SFT} \quad (7)$$

onde:

F_{SFT} = fração de P absorvido do SFT

$AE_{P(SFT + Solo)}$ = Atividade específica do P absorvido do (SFT + Solo)

$AE_{P(SFT)}$ = Atividade específica do SFT

$P_{(SFT + Solo)}$ = P absorvido do (SFT + Solo)

P_{SFT} = P absorvido do SFT

$P_{Solo(SFT)}$ = P absorvido do solo na presença do SFT

$\%P_{PPSFT}$ = % de P planta proveniente do superfosfato triplo

FN + SFT + Solo

$$F_{SFT(FN)} = \frac{AE_{P(FN + SFT + Solo)}}{AE_{P(SFT)}} \quad (8)$$

$$P_{SFT(FN)} = P_{(FN+SFT+Solo)} - P_{SFT(FN)} \quad (9)$$

$$P_{(FN+Solo)(SFT)} = P_{(FN+SFT+Solo)} - P_{SFT(FN)} \quad (10)$$

$$P_{FN(SFT)} = P_{(FN+Solo)(SFT)} - P_{Solo(FN+SFT)} \quad (11)$$

$$\%P_{PPSFT(FN)} = 100 F_{SFT(FN)} \quad (12)$$

onde:

$F_{SFT(FN)}$ = fração do P absorvido do SFT na presença do FN

$AE_{P(FN+SFT+Solo)}$ = Atividade específica do P absorvido do (FN+SFT+Solo)

$AE_{P(SFT)}$ = Atividade específica do fertilizante SFT

$P_{SFT(FN)}$ = P absorvido do SFT na presença do FN

$P_{(FN+SFT+Solo)}$ = P absorvido do (FN+SFT+Solo)

$P_{(FN+Solo)(SFT)}$ = P absorvido da (FN+Solo) na presença do SFT

$P_{Solo(FN+SFT)}$ = P absorvido do solo na presença do (FN+SFT)

$P_{FN(SFT)}$ = P absorvido do FN na presença do SFT

$\%P_{PPSFT(FN)}$ = % P na planta proveniente do superfosfato triplo na presença do FN

Aproveitamento

$$Ap(\%) = \frac{P_{PPF}}{P_{aplicado}} 100 \quad (13)$$

onde:

P_{PPF} = quantidade de P na planta proveniente do fertilizante (FN ou SFT)

$P_{aplicado}$ = quantidade de P aplicado

2.2.4 Eficiência agronômica relativa

A eficiência agronômica relativa foi calculada com os dados de produção de matéria seca e P acumulado conforme a seguinte equação:

$$EAR(\%) = \frac{Y_1 - Y_o}{Y_2 - Y_o} 100 \quad (14)$$

onde:

Y_0 é a produção de massa seca ou P acumulado no tratamento testemunha (sem aplicação P)

Y_1 é a produção de massa seca ou P acumulado nos tratamentos FN ou (SFT + FN)

Y_2 é a produção de massa seca ou P acumulado no tratamento SFT

2.2.5 Experimentos

Os experimentos com as culturas do milho (*Zea mays* L.) e da soja [*Glycine max* (L.) Merr.] foram desenvolvidos em casa-de-vegetação do Laboratório de Fertilidade do Solo do CENA/USP.

2.2.5.1 Experimento 1: Efeito dos modos de aplicação do superfosfato triplo e do fosfato natural no aproveitamento do fósforo do FN pelo milho e soja

Dois experimentos com as culturas do milho e da soja foram desenvolvidos em vasos plásticos revestidos com sacos plásticos contendo respectivamente 2 kg e 2,5 kg de terra (Tabela 1). A acidez do solo foi corrigida, de acordo com Raij et al. (1996), para elevar a saturação por bases a 70% (milho) e 60% (soja). Após a correção com calcário dolomítico (PRNT = 90,4%), o solo foi incubado por trinta dias mantendo a umidade em aproximadamente 70 % da capacidade de campo para permitir a reação desse corretivo de acidez. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso com quatro repetições.

As fontes de P utilizadas foram o superfosfato triplo e o fosfato natural de Gafsa (pó) na dose de 90 mg kg⁻¹ de P, aplicadas nos seguintes modos: sozinhas localizadas ou misturadas ao solo, ambas localizadas (juntas em contato físico), uma fonte localizada e a outra misturada, ambas misturas no solo e a mistura compactada (Tabelas 3 e 4). A proporção utilizada nos tratamentos em que as duas fontes foram aplicadas foi de 50:50 considerando o teor total de P dessas fontes.

Para a determinação do P absorvido pela planta do fosfato natural empregaram-se tratamentos com o solo marcado com ^{32}P (método indireto) e tratamentos adicionais com o SFT marcado com ^{32}P (método direto) conforme apresentado nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Tratamentos com o solo marcado com ^{32}P e tratamentos adicionais com o SFT marcado com ^{32}P no experimento com a cultura do milho

Tratamentos Solo- ^{32}P	Tratamentos adicionais SFT- ^{32}P
Testemunha	-
⁽¹⁾ SFT ⁽³⁾ (loc)	SFT- ^{32}P (m)
SFT ⁽⁴⁾ (m)	-
⁽²⁾ FN (loc)	SFT- ^{32}P (loc)
FN (m)	-
SFT (loc) + FN (loc)	SFT- ^{32}P (loc) + FN (loc)
SFT (loc) + FN (m)	SFT- ^{32}P (loc) + FN (m)
SFT (m) + FN (loc)	SFT- ^{32}P (m) + FN (loc)
SFT (m) + FN (m)	SFT- ^{32}P (m) + FN (m)
(SFT + FN) compactado	(SFT- ^{32}P + FN) compactado

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Gafsa.

⁽³⁾ Localizado no solo.

⁽⁴⁾ Misturado ao solo.

Tabela 4 - Tratamentos com o solo marcado com ^{32}P e tratamentos adicionais com o SFT marcado com ^{32}P no experimento com a cultura de soja

Tratamentos Solo- ^{32}P	Tratamentos adicionais SFT- ^{32}P
Testemunha	-
⁽¹⁾ SFT ⁽³⁾ (loc)	SFT- ^{32}P (m)
⁽²⁾ FN ⁽⁴⁾ (m)	-
SFT (loc) + FN (loc)	SFT- ^{32}P (loc) + FN (loc)
SFT (loc) + FN (m)	SFT- ^{32}P (loc) + FN (m)
(SFT + FN) compactado	(SFT- ^{32}P + FN) compactado

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Gafsa.

⁽³⁾ Localizado no solo.

⁽⁴⁾ Misturado ao solo.

No experimento com a cultura do milho, para verificar se o efeito no aumento da disponibilidade do fósforo do fosfato natural aplicado com uma fonte P de elevada solubilidade em água é químico ou fisiológico comparou-se o aproveitamento do P do FN pelas plantas dos tratamentos em que esta fonte foi aplicada sozinha com aqueles em que foi aplicado com o SFT, fixando-se o modo de aplicação (localizado ou misturado ao solo), conforme o representado a seguir:

$\text{FN}^2 (\text{loc}^3) \rightarrow [\text{SFT}^4 (\text{loc}) + \text{FN} (\text{loc})], [\text{SFT} (\text{m}) + \text{FN} (\text{loc})] \text{ e } [(\text{SFT} + \text{FN}) \text{ compactado}].$

$\text{FN} (\text{m}^5) \rightarrow [\text{SFT} (\text{loc}) + \text{FN} (\text{m})] \text{ e } [\text{SFT} (\text{m}) + \text{FN} (\text{m})].$

No experimento com a cultura da soja, utilizaram-se os modos de aplicação com maior aproveitamento do P do SFT e do FN de Gafsa pelas plantas de milho. Assim, utilizou-se somente o tratamento em que o fosfato natural foi misturado ao solo [FN (m)] para comparar com o aproveitamento do P dos tratamentos em que essa fonte de P foi aplicada com o SFT nos diferentes modos.

As fontes fosfatadas foram misturadas agitando-se os sacos plásticos com o solo após a aplicação dos fertilizantes na superfície da mesma. Para a aplicação localizada, o fertilizante foi colocado no solo a cerca de 5 cm de profundidade em faixa.

O fertilizante SFT foi moído e peneirado (peneira 0,5 mm) tanto para o preparo das misturas compactadas como para aplicação sozinha. Neste caso o SFT foi umedecido com água deionizada, seco em estufa à temperatura de 90 °C por 24 horas e quebrado em grânulos de tamanho similar ao original dessa fonte de P para a aplicação localizada ou novamente moído para ser misturado ao solo. Esse processo foi realizado do mesmo modo para o fertilizante superfosfato triplo marcado (^{32}P) e não marcado.

A mistura compactada constituiu-se da fonte de P obtida ao misturar o SFT com o FN e água deionizada, processo denominado compactação úmida e foi realizada para comparar com o tratamento em que as fontes de P foram aplicadas juntas localizadas em contato físico, verificando assim se a interação química entre essas duas fontes de P aumenta o aproveitamento do P do FN (efeito químico). Para o preparo dessa mistura o FN de Gafsa, em pó, foi peneirado

² Fosfato natural de Gafsa.

³ Localizado.

⁴ Superfosfato triplo.

⁵ Misturado ao solo.

(peneira de 0,5 mm), foram pesadas as quantidades correspondentes de SFT e FN, misturadas e umedecidas com água deionizada obtendo-se misturas homogêneas. Estas foram secas em estufa com circulação de ar a 90 °C por 24 horas e após esse período as misturas foram fragmentadas em pedaços de tamanho semelhante ao do fertilizante superfosfato triplo. A mistura compactada de SFT- ^{32}P , com atividade de 55KBq ^{32}P mg $^{-1}$ de P, com o FN foi preparada da mesma maneira. Essas misturas foram aplicadas de modo localizado no solo.

A marcação do solo com ^{32}P foi feita com 20 g de areia fina que inicialmente receberam 7,4 MBq de ^{32}P livre de carregador. Após 24 horas, a areia foi homogeneizada e cada copinho foi aplicado no saco com o solo marcando-o uniformemente mediante uma agitação vigorosa.

Três sementes de milho (híbrido Pioneer 30F33) foram semeadas por vaso e desbastadas para uma planta 6 dias após a emergência. Cinco sementes de soja (cultivar IAC 18) foram semeadas por vaso e desbastadas para duas plantas 5 dias após a emergência. Nitrogênio e potássio foram aplicados nas doses de 150 mg kg $^{-1}$ de N como sulfato de amônio e 150 mg kg $^{-1}$ de K como cloreto de potássio nos dois experimentos e a adubação com micronutrientes (B, Cu, Zn e Mo) foi realizada com aplicação de 10 mL vaso $^{-1}$ da solução de uma solução nutritiva (SARRUGE, 1975). O solo dos vasos foi umedecido com água deionizada para manter a umidade a aproximadamente 70% da capacidade campo durante todo o experimento.

As plantas dos experimentos foram pulverizadas com inseticida (Deltamethrin) para evitar possíveis infestações de pragas e na cultura da soja realizou-se uma pulverização com fungicida (Pyra-clostrobin/ Epoxiconazole) para prevenção de doenças fúngicas foliares, principalmente a ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi*).

As partes aéreas das plantas de milho e soja foram cortadas, respectivamente aos 42 e 53 dias após a semeadura, secas em estufa a 60 °C, pesadas para determinação da matéria seca e moídas em moinho tipo Willey. Após a digestão com ácidos nítrico-perclórico, a atividade do ^{32}P foi determinada em contador de cintilação em meio líquido por efeito Cerenkov (VOSE, 1980) e a concentração de P foi determinada pela metodologia descrita por Sarruge e Haag (1974).

As quantidades de P na planta do superfosfato triplo, do fosfato natural e o aproveitamento do P desses fertilizantes foram calculados baseando-se no método da diluição isotópica.

Os dados de produção de matéria seca, P acumulado na parte aérea das plantas, aproveitamento do fósforo do FN e SFT foram submetidos à ANOVA e médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) utilizando-se o programa SAS (SAS Institute, 1996).

2.2.5.2 Experimento 2: Efeito das doses e das proporções das misturas de superfosfato triplo com fosfato natural de Patos no aproveitamento do fósforo do FN pelo milho

Dois experimentos foram desenvolvidos em vasos para: a) verificar o efeito da proporção das misturas de superfosfato triplo (SFT) com o fosfato natural de Patos de Minas (FN) na eficiência do FN e b) verificar o efeito das doses de P aplicadas como misturas dessas fontes de P. Os vasos plásticos foram revestidos com sacos plásticos contendo 2,5 kg de terra (Tabela 1), que recebeu calcário dolomítico (PRNT = 90,4%) um mês antes da aplicação dos tratamentos para elevar a saturação por bases a 70% (RAIJ et al., 1996).

As fontes de fósforo utilizadas foram o superfosfato triplo e o fosfato natural de Patos de Minas. No experimento de proporções, essas fontes de P, na dose de 90 mg kg⁻¹ de P, foram aplicadas sozinhas ou em misturas compactadas nas seguintes proporções: 80% SFT + 20% FN, 60% SFT + 40% FN, 50% SFT + 50% FN, 40% SFT + 60% FN, 20% SFT + 80% FN calculadas com base no teor de P total dessas fontes (Tabela 5). No outro experimento, as doses de P utilizadas foram: 0, 15, 30, 60, 90 mg kg⁻¹ fornecidas como superfosfato triplo (SFT) ou misturas desta fonte com o fosfato natural de Patos (FN) na proporção de 50:50 (7,5 SFT + 7,5 FN, 15 SFT + 15 FN, 30 SFT + 30 FN, 45 SFT + 45 FN), e a aplicação do FN sozinho na dose de 90 mg kg⁻¹ (Tabela 6).

Tabela 5 - Tratamentos do experimento de misturas de proporções de SFT: FN de Patos

Tratamentos	Proporção SFT: FN	
	⁽¹⁾ SFT	⁽²⁾ FN
	-----%-----	
T ₁ (testemunha)	-	-
T ₂	100	-
T ₃	80	20
T ₄	60	40
T ₅	50	50
T ₆	40	60
T ₇	20	80
T ₈	-	100

Nota: Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos.

Tabela 6 - Tratamentos do experimento de doses de P aplicadas como SFT, FN e SFT + FN

Tratamentos	Fontes	Dose P (mg kg ⁻¹)
T ₁ (testemunha)	..	-
T ₂	⁽¹⁾ SFT	15
T ₃	SFT	30
T ₄	SFT	60
T ₅	SFT	90
T ₇	⁽²⁾ FN	90
T ₈	SFT + ⁽²⁾ FN	15 (7,5 + 7,5)
T ₉	SFT + FN	30 (15 + 15)
T ₁₀	SFT + FN	60 (30 + 30)
T ₁₁	SFT + FN	90 (45 + 45)

Nota: Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

.. Não se aplica dado numérico.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos.

Em ambos experimentos utilizaram-se tratamentos adicionais (Tabelas 7 e 8) com superfosfato triplo marcado com ³²P para a determinação do P na planta proveniente SFT, possibilitando assim os cálculos do P na planta proveniente do FN das misturas conforme as equações descritas por Chien, Menon e Billingham, (1996).

Tabela 7 - Tratamentos adicionais com SFT marcado com ^{32}P

Tratamentos adicionais	Proporção SFT: FN	
	(¹) SFT- ^{32}P	(²) FN
	----- % -----	
T _{2a}	100	-
T _{3a}	80	20
T _{4a}	60	40
T _{5a}	50	50
T _{6a}	40	60
T _{7a}	20	80

Nota: Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

(¹) Superfosfato triplo marcado com ^{32}P .

(²) Fosfato natural de Patos.

Tabela 8 - Tratamentos adicionais do experimento de doses de P com SFT marcado com ^{32}P .

Tratamentos adicionais (SFT- ^{32}P)	Fontes	Dose P (mg kg ⁻¹)
T _{8a}	(¹) SFT- ^{32}P + (²) FN	15 (7,5 + 7,5)
T _{9a}	SFT- ^{32}P + FN	30 (15 + 15)
T _{10a}	SFT- ^{32}P + FN	60 (30 + 30)
T _{11a}	SFT- ^{32}P + FN	90 (45 + 45)

(¹) Superfosfato triplo marcado com ^{32}P .

(²) Fosfato natural de Patos.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso com quatro repetições. Além dos tratamentos com as fontes de P, um tratamento testemunha (sem adição de P) com aplicação no solo de somente uma solução de ^{32}P livre de carregador (7,4 MBq vaso⁻¹) foi utilizado como referência do método isotópico indireto (solo marcado com ^{32}P).

O fertilizante SFT foi moído e peneirado (peneira de 0,5 mm) tanto para o preparo das misturas compactadas como para aplicação sozinha. Neste caso o SFT foi umedecido com água deionizada, seco em estufa à temperatura de 90 °C por 24 horas e quebrado em pedaços (grânulos) similar ao tamanho original desse adubo.

O fosfato natural de Patos de Minas, em pó, também foi peneirado (peneira de 0,5 mm) para o preparo das misturas compactadas com água. As quantidades de SFT e do FN foram pesadas de acordo com as proporções, misturadas e umedecidas com água deionizada obtendo-se misturas homogêneas. Estas foram secas em estufa com circulação de ar a 90 °C por 24 horas. Após esse período as misturas foram fragmentadas em pedaços de tamanho semelhante ao do

fertilizante superfosfato triplo. As misturas compactadas de SFT- ^{32}P (55 KBq ^{32}P mg^{-1} de P) com o FN foram preparadas da mesma maneira, diferenciando apenas pela utilização do SFT marcado com ^{32}P .

A marcação do solo com ^{32}P foi feita utilizando-se copos plásticos contendo 20 g de areia fina que receberam 7,4 MBq de ^{32}P livre de carregador. Após 24 horas, a areia foi homogeneizada e aplicada no saco plástico com o solo marcando-o uniformemente mediante uma agitação vigorosa.

As fontes fosfatadas foram aplicadas de maneira localizada em faixa no solo, colocando-as aproximadamente a 5 cm de profundidade, sendo o superfosfato triplo e as misturas compactadas na forma granulada e o fosfato natural em pó.

Três sementes de milho (híbrido Pioneer 30F33) foram semeadas por vaso e desbastadas para uma planta por vaso após a emergência. Nitrogênio e potássio foram aplicados nas doses de 150 mg kg^{-1} de N como $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e 150 mg kg^{-1} de K como KCl e micronutrientes (B, Cu, Mo e Zn) pela adição de 10 mL vaso^{-1} de uma solução nutritiva (Sarruge, 1975). As plantas foram pulverizadas quinzenalmente com inseticida (Deltamethrin) para evitar possíveis infestações de pragas. O solo dos vasos foi umedecido com água deionizada para manter a umidade a aproximadamente 70% da capacidade de campo durante todo o experimento.

As partes aéreas das plantas de milho dos experimentos de proporções e de doses foram colhidas, respectivamente aos 50 e 60 dias após a semeadura, secas em estufa a 60 °C, pesadas para determinação da matéria seca e moídas em moinho tipo Willey.

Após a digestão com ácidos nítrico-perclórico, a atividade do ^{32}P foi contada em contador de cintilação em meio líquido por efeito Cerenkov (VOSE, 1980) e a concentração de P foi determinada pela metodologia descrita por Sarruge e Haag (1974).

Os dados isotópicos obtidos nos tratamentos com o solo marcado com ^{32}P e nos adicionais com o SFT marcado com ^{32}P foram utilizados nos cálculos do fósforo na planta proveniente do fosfato natural e na quantificação do aproveitamento do P desta fonte pelas plantas de milho.

Os dados foram submetidos à análise de variância, comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e análise de regressão ($p \leq 0,05$) utilizando-se o programa SAS (SAS Institute, 1996).

2.2.5.3 Experimento 3 - Efeito das proporções das misturas de superfosfato triplo com fosfatos naturais de Patos ou de Gafsa no aproveitamento do fósforo do FN pela soja

O experimento foi desenvolvido em vasos plásticos revestidos com sacos plásticos contendo 2,5 kg de solo (Tabela 1), que recebeu calcário dolomítico (PRNT = 90,4%) trinta dias antes da aplicação dos tratamentos para elevar a saturação por bases a 60% (RAIJ et al., 1996) e a umidade do solo foi mantida em aproximadamente 70% da capacidade de campo durante esse período de incubação. O delineamento experimental foi de blocos completos ao acaso com três repetições.

As fontes de P utilizadas foram o superfosfato triplo e os fosfatos naturais de Patos de Minas e de Gafsa na dose de 90 mg kg⁻¹ de P, aplicadas sozinhas ou em misturas compactadas, nas seguintes proporções: 80% SFT + 20% FN, 60% SFT + 40% FN, 50% SFT + 50% FN, 40% SFT + 60% FN, 20% SFT + 80% FN calculadas com base no teor de P total dessas fontes (Tabela 9). A testemunha (sem aplicação de P) foi utilizada como tratamento referência do método isotópico.

Tabela 9 - Tratamentos do experimento de proporções de SFT: FN

Tratamentos	Proporção SFT: FN	
	⁽¹⁾ SFT	⁽²⁾ FN
	-----%-----	
T ₁ (testemunha)	-	-
T ₂	100	-
T ₃	80	20
T ₄	60	40
T ₅	50	50
T ₆	40	60
T ₇	20	80
T ₈	0	100

Nota: Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos ou de Gafsa.

Para a determinação do P na planta proveniente dos fosfatos naturais empregaram-se tratamentos com o solo marcado com ³²P (Tabela 9) e tratamentos adicionais com o SFT marcado com ³²P (Tabela 10).

Tabela 10 - Tratamentos adicionais com SFT marcado com ^{32}P

Tratamentos	Proporção SFT- ^{32}P : FN	
	(¹) SFT- ^{32}P	(²) FN
	-----%-----	
T _{2a}	100	-
T _{3a}	80	20
T _{4a}	60	40
T _{5a}	50	50
T _{6a}	40	60
T _{7a}	20	80

Nota: Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

(¹) Superfosfato triplo marcado com ^{32}P .

(²) Fosfato natural de Patos ou de Gafsa.

O superfosfato triplo foi moído e peneirado (peneira de 0,5 mm) tanto para o preparo das misturas compactadas como para aplicação sozinha. Neste caso o SFT foi umedecido com água deionizada, seco em estufa à temperatura de 90 °C por 24 horas e quebrado em pedaços (grânulos) de tamanho similar ao desse fertilizante.

Para o preparo das misturas compactadas os fosfatos naturais de Patos de Minas e de Gafsa, ambos em pó, também foram peneirados (peneira de 0,5 mm). As quantidades de SFT e dos FNs foram pesadas de acordo com as proporções, misturadas e umedecidas com água deionizada obtendo-se misturas homogêneas. Estas foram secas em estufa com circulação de ar a 90 °C por 24 horas. Após esse período as misturas foram fragmentadas em pedaços de tamanho semelhante ao do fertilizante superfosfato triplo. As misturas compactadas de SFT- ^{32}P (70 KBq ^{32}P mg⁻¹ de P) com os FNs foram preparadas da mesma maneira.

A marcação do solo com ^{32}P foi feita utilizando-se copos plásticos contendo 20 g de areia fina que receberam 9,25 MBq de ^{32}P livre de carregador. Após 24 horas, a areia foi homogeneizada e aplicada no saco plástico com o solo marcando-o uniformemente mediante uma agitação vigorosa.

As fontes fosfatadas foram aplicadas de maneira localizada em faixa, colocando-se o fertilizante a cerca de 5 cm de profundidade, sendo que o SFT e as misturas compactadas na forma granulada e os fosfatos naturais em pó.

Cinco sementes de soja (cultivar IAC 18) foram semeadas por vaso. A emergência das plântulas ocorreu cinco dias após a semeadura e o desbaste foi realizado deixando-se 2 plantas

por vaso. As adubações com nitrogênio e potássio foram realizadas com aplicação de 150 mg kg^{-1} de N como $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e 150 mg kg^{-1} de K como KCl e micronutrientes (B, Cu, Mo e Zn) pela adição de 10 mL vaso^{-1} de uma solução nutritiva (Sarruge, 1975). As plantas foram pulverizadas quinzenalmente com inseticida (Imidacloprid) para evitar possíveis infestações de pragas e realizou-se uma pulverização com fungicida (Pyra-clostrobin/ Epoxiconazole) para prevenção a doenças fúngicas foliares como a ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi*). As plantas foram regadas com água deionizada mantendo a umidade do solo a aproximadamente 70% da capacidade de campo durante todo o experimento.

As partes aéreas das plantas foram cortadas aos 62 dias após a semeadura, secas em estufa a 60°C por 48 horas, pesadas para determinação da matéria seca, moídas e após a digestão com os ácidos nítrico-perclórico determinaram-se e a atividade do ^{32}P por efeito Cerenkov em contador de cintilação em meio líquido (VOSE, 1980) e a concentração de fósforo (SARRUGE; HAAG, 1974).

As quantidades de P na planta proveniente, do superfosfato triplo, dos fosfatos naturais e o aproveitamento do P desses fertilizantes foram calculados. Os dados de produção de matéria seca, P acumulado na parte aérea das plantas, aproveitamento do fósforo do FN e SFT foram submetidos a análise de variância e médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) utilizando-se o programa SAS (SAS Institute, 1996).

2.2.5.4 Experimento 4 - Efeito das doses da mistura de superfosfato triplo com fosfatos naturais no aproveitamento do P do FN pela soja

O experimento foi desenvolvido em vasos plásticos contendo $2,5 \text{ kg}$ de terra (Tabela 1) com delineamento experimental de blocos completos ao acaso com três repetições. O solo recebeu calcário (PRNT = 90,4%) um mês antes do início do experimento para elevar a saturação por bases a 60%.

O ensaio constituiu de doses de P: 0 (testemunha), 15, 30, 60, 90 e 120 mg kg^{-1} de P na forma de superfosfato triplo (SFT) aplicado sozinho, ou misturado com os fosfatos naturais (FNs) de Patos ou de Gafsa na proporção de 50:50 ($7,5 \text{ SFT} + 7,5 \text{ FNs}$, $15 \text{ SFT} + 15 \text{ FNs}$, $30 \text{ SFT} + 30 \text{ FNs}$, $45 \text{ SFT} + 45 \text{ FNs}$, $60 \text{ SFT} + 60 \text{ FNs}$), e aplicação dos FNs sozinho na dose de 120 mg vaso^{-1} de P conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Tratamentos do experimento de doses de P aplicadas como SFT, FN e SFT + FN

Tratamentos	Fontes	Dose P (mg kg ⁻¹)
T ₁ (testemunha)	..	-
T ₂	⁽¹⁾ SFT	15
T ₃	SFT	30
T ₄	SFT	60
T ₅	SFT	90
T ₆	SFT	120
T ₇	⁽²⁾ FN	120
T ₈	SFT + ⁽²⁾ FN	15 (7,5 + 7,5)
T ₉	SFT + FN	30 (15 + 15)
T ₁₀	SFT + FN	60 (30 + 30)
T ₁₁	SFT + FN	90 (45 + 45)
T ₁₂	SFT + FN	120 (60 + 60)

Nota: Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

.. Não se aplica dado numérico.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos ou de Gafsa.

Tratamentos adicionais com SFT marcado com ³²P foram utilizados conforme o método isotópico (Tabela 12).

Tabela 12 - Tratamentos adicionais do experimento de doses de P com SFT marcado com ³²P

Tratamentos adicionais	Fontes	Dose P (mg kg ⁻¹)
T _{8a}	⁽¹⁾ SFT- ³² P + ⁽²⁾ FN	15 (7,5 + 7,5)
T _{9a}	SFT- ³² P + FN	30 (15 + 15)
T _{10a}	SFT- ³² P + FN	60 (30 + 30)
T _{11a}	SFT- ³² P + FN	90 (45 + 45)
T _{12a}	SFT- ³² P + FN	120 (60 + 60)

⁽¹⁾ Superfosfato triplo marcado com ³²P.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos ou de Gafsa.

O fertilizante SFT foi moído e peneirado (peneira 0,5 mm) tanto para o preparo das misturas compactadas como para aplicação sozinha e neste caso o SFT foi umedecido com água deionizada, seco em estufa à temperatura de 90 °C por 24 horas e quebrado em grânulos similar ao tamanho original desse adubo.

Para o preparo das misturas compactadas os FNs de Patos de Minas e de Gafsa, ambos em pó, também foram peneirados (peneira de 0,5 mm). Foram pesadas as quantidades de SFT e dos FNs de acordo com as doses, misturadas e umedecidas com água deionizada obtendo-se misturas homogêneas. Estas foram secas em estufa com circulação de ar a 90 °C por 24 horas. Após esse período as misturas foram fragmentadas em pedaços de tamanho semelhante ao do fertilizante superfosfato triplo. Prepararam-se as misturas de SFT- ^{32}P (70 KBq ^{32}P mg⁻¹ de P) com os FNs da mesma maneira.

A marcação do solo com ^{32}P foi feita utilizando-se copos plásticos contendo 20 g de areia fina que receberam 9,25 MBq de ^{32}P livre de carregador. Após 24 horas, a areia foi homogeneizada e aplicada no saco plástico com o solo marcando-o uniformemente mediante uma agitação vigorosa.

As fontes de fósforo foram aplicadas de maneira localizada em faixa, colocando-se o fertilizante a cerca de 5 cm de profundidade, sendo que o SFT e as misturas compactadas na forma granulada e os FNs em pó.

Cinco sementes de soja (cultivar IAC 18) foram semeadas por vaso e desbastadas para 2 plantas por vaso sete dias após a semeadura. As adubações com N e K foram realizadas com aplicação de 150 mg kg⁻¹ de N como sulfato de amônio e 150 mg kg⁻¹ de K como cloreto de potássio e micronutrientes (B, Cu, Mo e Zn) pela adição de 10 mL vaso⁻¹ de uma solução nutritiva (SARRUGE, 1975). As plantas foram pulverizadas quinzenalmente com inseticida (Imidacloprid) para evitar possíveis infestações de pragas e realizou-se uma pulverização com fungicida (Pyra-clostrobin/ Epoxiconazole) para prevenção a doenças fúngicas foliares como a ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi*). As plantas foram regadas com água deionizada mantendo a umidade do solo a aproximadamente 70% da capacidade de campo durante todo o experimento.

As partes aéreas das plantas foram cortadas aos 58 dias após a semeadura, secas em estufa a 60 °C por 48 horas, pesadas para determinação da matéria seca e moídas em moinho tipo Willey.

A determinação da concentração de fósforo foi efetuada conforme metodologia descrita por Sarruge e Haag (1974) e a atividade do ^{32}P por efeito Cerenkov em contador de cintilação em meio líquido (VOSE, 1980).

As quantidades de P na planta proveniente do solo, do superfosfato triplo, do fosfato natural e o aproveitamento do P dos fertilizantes foram calculados.

Os dados foram submetidos às análises de variância e de regressão ($p \leq 0,05$) utilizando-se o programa SAS (SAS Institute, 1996).

2.3 Resultados e Discussão

Em vista da metodologia utilizada, os dados de produção de matéria seca e P acumulado na parte aérea das plantas dos tratamentos adicionais (SFT marcado com ^{32}P) são iguais as seus correspondentes dos tratamentos principais diferenciando apenas nas determinações isotópicas. Assim, para a interpretação dos dados não isotópicos foram considerados somente os tratamentos principais.

2.3.1 Experimento 1: Efeito dos modos de aplicação do superfosfato triplo e do fosfato natural no aproveitamento do fósforo do FN pelo milho e soja

Os dados de matéria seca produzida e P acumulado pela parte das plantas de milho e de soja dos tratamentos adicionais, com superfosfato marcado com ^{32}P , estão apresentados respectivamente, nas Tabelas 1 e 2 do apêndice A.

Os dados de matéria seca produzida, P acumulado e seus valores correspondentes de eficiência agrônômica relativa (EAR) estão apresentados nas Tabelas 13 e 14 para a cultura do milho e Tabelas 15 e 16 para a cultura da soja.

Respostas significativas ($p \leq 0,05$) em termos de produção de matéria seca e P acumulado na parte aérea das plantas de milho foram obtidas pela aplicação das fontes de P em relação ao tratamento testemunha, exceto quando o fosfato natural de Gafsa foi aplicado sozinho de modo localizado no solo, tratamento este de menor eficiência agrônômica relativa (EAR). Corrêa et al. (2005), aplicando o FN de Gafsa deste modo no solo como fonte de P para plantas de milho, também não observaram aumento significativo nesses parâmetros comparado com o tratamento sem aplicação de P. A aplicação localizada do SFT proporcionou os maiores valores de matéria seca produzida e P acumulado nos dois experimentos, por isso este foi considerado como tratamento padrão nos cálculos da EAR. Resende et al. (2006), estudando fontes de P como os fosfatos naturais de Arad e de Araxá e modos de aplicação, concluíram que a produtividade de

grãos de milho foi maior quando o fosfato reativo de Arad foi aplicado a lanço em área total e incorporado do que localizado no sulco, fato esse não observado para o fosfato de Araxá.

Tabela 13 - Matéria seca da parte aérea produzida e eficiência agrônômica relativa (EAR) obtida com fontes de P e modos de aplicação para milho

Tratamentos	Matéria Seca g	EAR %
Testemunha	1,95 d	-
⁽¹⁾ SFT ⁽³⁾ (loc)	10,24 a	100
SFT ⁽⁴⁾ (m)	8,20 b	75
⁽²⁾ FN (loc)	3,04 d	13
FN (m)	5,91 c	48
SFT (loc) + FN (loc)	8,69 ab	81
SFT (loc) + FN (m)	9,08 ab	86
SFT (m) + FN (loc)	7,84 b	71
SFT (m) + FN (m)	8,36 b	77
⁽⁵⁾ [(SFT + FN) compactado]	8,32 b	77

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Gafsa.

⁽³⁾ Localizado no solo.

⁽⁴⁾ Misturado ao solo.

⁽⁵⁾ Mistura de superfosfato triplo com fosfato natural de Gafsa no mesmo grânulo.

Observa-se que para o SFT a aplicação localizada foi melhor que quando este fertilizante foi homogeneamente misturado ao solo, ao contrário do fosfato natural. A mistura dessa fonte de P de elevada solubilidade com o solo causou maior indisponibilidade do P por fixação do que na forma localizada, por causa do maior contato do fertilizante com o solo (HAVLIN et al., 2005). Isto é comprovado pelos resultados de aproveitamento, maior quando localizado para o SFT (9,75% contra 7,04%) e menor para FN (0,49% contra 3,80%), apresentados na Tabela 15. No caso do FN provavelmente o maior contato deve ter proporcionado maior solubilização do fósforo.

Este fato é observado mesmo quando as duas fontes são aplicadas conjuntamente em diferentes maneiras, sendo que a EAR é maior quando o SFT é localizado e o FN misturado ao solo, de tal maneira que não houve diferença significativa no P acumulado nas plantas de milho entre tratamentos SFT(m) + SFT (loc) e FN (m).

Resende et al. (2006), estudando fontes e modos de aplicação de fontes fosfatadas para o milho em um experimento em campo, não observaram diferenças na produção total de grãos após três cultivos consecutivos entre a aplicação do superfosfato triplo a lanço em área total e localizado no sulco. Os autores comentam que as condições de fertilidade do solo, antes da instalação do experimento, devem ter contribuído de forma expressiva para não haver diferença entre esses tratamentos.

Tabela 14 - Fósforo acumulado na parte aérea das plantas e eficiência agrônômica relativa (EAR) obtida com fontes de P para milho

Tratamentos	P acumulado mg vaso ⁻¹	EAR %
Testemunha	3,33 d	-
⁽¹⁾ SFT ⁽³⁾ (loc)	19,99 a	100
SFT ⁽⁴⁾ (m)	15,21 b	75
⁽²⁾ FN (loc)	4,83 d	9
FN (m)	12,18 c	53
SFT (loc) + FN (loc)	14,01 bc	64
SFT (loc) + FN (m)	16,24 b	78
SFT (m) + FN (loc)	12,26 c	54
SFT (m) + FN (m)	13,91 bc	64
⁽⁵⁾ [(SFT + FN) compactado]	14,38 bc	66

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Gafsa.

⁽³⁾ Localizado no solo.

⁽⁴⁾ Misturado ao solo.

⁽⁵⁾ Mistura de superfosfato triplo com fosfato natural de Gafsa no mesmo grânulo.

O fosfato natural de Gafsa, de alta reatividade, aplicado misturado ao solo somente foi maior, em termos de matéria seca produzida e P acumulado na parte aérea das plantas de soja, que a testemunha. Corrêa et al. (2005), comparando o SFT com FN de Gafsa como fontes de fósforo para plantas de milho em solos com diferentes capacidades de adsorção de P (CAP), observaram mesma eficiência dessas fontes na produção de massa seca somente no solo com menor CAP.

Tabela 15 - Matéria seca da parte aérea produzida e eficiência agrônômica relativa (EAR) obtida com fontes de P e modos de aplicação para soja

Tratamentos	Matéria Seca g	EAR %
Testemunha	4,89 c	-
SFT (loc)	10,79 a	100
FN (m)	7,30 b	41
SFT (loc) + FN (loc)	9,24 a	74
SFT (loc) + FN (m)	10,59 a	97
⁽⁵⁾ [(SFT + FN) compactado]	10,68 a	98

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfósforo triplo.

⁽²⁾ Fósforo natural de Gafsa.

⁽³⁾ Localizado no solo.

⁽⁴⁾ Misturado ao solo.

⁽⁵⁾ Mistura de superfósforo triplo com fósforo natural de Gafsa no mesmo grânulo.

Tabela 16 - Fósforo acumulado na parte aérea das plantas e eficiência agrônômica relativa (EAR) obtida com fontes de P para soja

Tratamentos	P acumulado mg vaso ⁻¹	EAR %
Testemunha	5,11 e	-
⁽¹⁾ SFT ⁽³⁾ (loc)	22,12 a	100
⁽²⁾ FN ⁽⁴⁾ (m)	11,52 d	38
SFT (loc) + FN (loc)	13,79 c	51
SFT (loc) + FN (m)	17,90 b	75
⁽⁵⁾ [(SFT + FN) compactado]	17,29 b	72

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfósforo triplo.

⁽²⁾ Fósforo natural de Gafsa.

⁽³⁾ Localizado no solo.

⁽⁴⁾ Misturado ao solo.

⁽⁵⁾ Mistura de superfósforo triplo com fósforo natural de Gafsa no mesmo grânulo.

Os dados de aproveitamento do fósforo do superfósforo triplo (SFT), do fósforo natural de Gafsa (FN) pelas culturas do milho e da soja estão apresentados, respectivamente nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - Efeito do modo de aplicação de fontes P no aproveitamento do P do superfosfato triplo, do fosfato natural de Gafsa e total dessas fontes pelas plantas de milho

Tratamentos	Aproveitamento		
	Total	⁽¹⁾ SFT	⁽²⁾ FN
	-----%-----		
SFT ⁽³⁾ (loc)	9,75 a	9,75 a	..
SFT ⁽⁴⁾ (m)	7,04 b	7,04 bc	..
FN (loc)	0,49 f	..	0,49 b
FN (m)	3,80 e	..	3,80 a
SFT (loc) + FN (loc)	5,95 c	10,54 a	1,37 b
SFT (loc) + FN (m)	7,22 b	10,25 a	4,18 a
SFT (m) + FN (loc)	4,59 de	8,04 b	1,15 b
SFT (m) + FN (m)	5,01 d	6,78 c	3,24 a
⁽⁵⁾ [(SFT + FN) compactado]	6,20 c	7,89 bc	4,52 a

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

.. Não se aplica dado numérico.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Gafsa.

⁽³⁾ Localizado no solo.

⁽⁴⁾ Misturado ao solo.

⁽⁵⁾ Mistura de superfosfato triplo com fosfato natural de Gafsa no mesmo grânulo.

Tabela 18 - Efeito do modo de aplicação de fontes de fósforo no aproveitamento do P do superfosfato triplo, do fosfato natural de Gafsa e do total dessas fontes pelas plantas de soja

Tratamentos	Aproveitamento		
	Total	⁽¹⁾ SFT	⁽²⁾ FN
	-----%-----		
SFT ⁽³⁾ (loc)	9,62 a	9,62 a	..
FN ⁽⁴⁾ (m)	3,32 d	..	3,32 b
SFT (loc) + FN (loc)	5,91 c	10,16 a	1,65 c
SFT (loc) + FN (m)	7,71 b	10,35 a	5,06 a
⁽⁵⁾ [(SFT + FN) compactado]	7,47 b	10,05 a	4,88 a

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

.. Não se aplica dado numérico.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Gafsa.

⁽³⁾ Localizado no solo.

⁽⁴⁾ Misturado ao solo.

⁽⁵⁾ Mistura de superfosfato triplo com fosfato natural de Gafsa no mesmo grânulo.

Comparando os tratamentos [SFT (loc) + FN (loc)] e a mistura compactada (aplicada localizada) com o FN (loc), observa-se que somente na mistura compactada houve aumento significativo no aproveitamento do P do FN pelas plantas em relação a este tratamento, indicando que a interação química entre essas fontes de P, resultado da compactação, foi responsável pelo aumento da disponibilidade do P do FN (efeito químico), já que esse efeito não observado quando as fontes foram aplicadas em contato físico no solo (Tabela 16).

Esse efeito no aumento da disponibilidade do P do fosfato natural de Gafsa não foi observado entre os tratamentos [SFT(loc) + FN(m)] e FN(m), indicando que não houve efeito fisiológico. No entanto, ao contrário do observado no experimento com a cultura do milho, no da soja observa-se que o aproveitamento do fósforo do FN de Gafsa foi significativamente maior no tratamento [SFT(loc) + FN(m)] que no FN(m) como observado na Tabela 17, constatando o efeito fisiológico, ou seja, provavelmente as plantas desenvolveram maior sistema radicular, característica esta não avaliada nesse experimento, possibilitando maior absorção do P do FN, conforme também constatado por Chien e Hammond (1988), Chien et al. (1996) e Zapata e Zaharah (2002). Essa diferença observada entre as culturas do milho e da soja pode ser atribuída ao tipo de cultura e maior tempo (11 dias) de cultivo das plantas de soja. Zapata e Zaharah (2002) utilizando a técnica da diluição isotópica de ^{32}P , cultivaram plantas de trigo durante 6 semanas e observaram uma pequena contribuição do P do fosfato natural Centro da Flórida na nutrição das plantas atribuindo este efeito à curta duração do experimento.

A compactação úmida do SFT com o FN de Gafsa, como no experimento com milho, também foi eficiente para melhorar a disponibilidade do P desta fonte para a soja. Esse efeito foi principalmente por causa da acidez gerada pela hidrólise do fertilizante de elevada solubilidade em água, que auxiliou na solubilização do P do FN fornecendo P para as plantas (McLEAN; WHEELER, 1964; MOKWUNYE; CHIEN, 1980).

2.3.2 Experimento 2: Efeito das doses e das proporções das misturas de superfosfato triplo com fosfato natural de Patos no aproveitamento do fósforo do FN pelo milho

Os dados de matéria seca produzida e P acumulado pela parte das plantas de milho dos tratamentos adicionais, com superfosfato marcado com ^{32}P , estão apresentados nas Tabelas 3 e 4 do apêndice B.

Efeitos significativos ($p \leq 0,05$) foram obtidos em resposta ao P aplicado. No experimento de proporções, todos tratamentos contendo SFT foram superiores em termos de matéria seca produzida (Tabela 19) e P acumulado (Tabela 20) pelas plantas em relação à testemunha (sem aplicação de P), indicando a baixa disponibilidade de P no solo. Entretanto, não houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) para esses parâmetros entre os tratamentos testemunha e 100% FN de Patos de Minas, confirmando a baixa eficiência agrônômica desse fosfato natural quando aplicado sozinho devido sua baixa reatividade. Prochnow et al. (2004), cultivando trigo e azevém (“ryegrass”) e Villanueva et al. (2006), cultivando eucalipto, também observaram baixa eficiência dessa fonte de P em termos de produção de matéria seca e P acumulado pelas plantas.

Tabela 19 - Matéria seca da parte aérea produzida (g vaso^{-1}) e eficiência agrônômica relativa (EAR) obtida com fontes de P para milho

Fonte de P	Matéria seca g vaso^{-1}	EAR %
100% ⁽¹⁾ SFT	15,25 a	100
80% SFT + 20% ⁽²⁾ FN	13,35 b	83
60% SFT + 40% FN	11,67 c	69
50% SFT + 50% FN	11,24 c	65
40% SFT + 60% FN	10,11 c	55
20% SFT + 80% FN	8,17 d	39
100% FN	4,91 e	10
Testemunha	3,72 e	-

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos de Minas.

Tabela 20 - Fósforo acumulado (mg vaso^{-1}) na parte aérea das plantas e eficiência agronômica relativa (EAR) obtida com fontes de P para milho

Tratamentos	P acumulado mg vaso^{-1}	EAR %
100% ⁽¹⁾ SFT	26,19 a	100
80% SFT + 20% ⁽²⁾ FN	20,17 b	71
60% SFT + 40% FN	16,23 c	52
50% SFT + 50% FN	13,70 cd	39
40% SFT + 60% FN	12,17 de	32
20% SFT + 80% FN	10,25 e	22
100% FN	7,17 f	7
Testemunha	5,67 f	-

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos de Minas.

Os valores de eficiência agronômica relativa calculados com base na matéria seca produzida e o P acumulado pelas plantas de milho mostrou a maior eficiência do fertilizante superfosfato triplo quando aplicado sozinho, enquanto que o FN de Patos, também aplicado sozinho, apresentou a menor eficiência.

As misturas compactadas apresentaram eficiência intermediária, sendo maior nas misturas com maiores proporções de SFT. Esses resultados são similares aos encontrados por Nachtigall et al. (1989) que observaram aumento da EAR com o aumento da proporção do SFT aplicado no mesmo grânulo com várias proporções do fosfato natural de Jacupiranga (FN Brasileiro de baixa reatividade).

Os valores de aproveitamento do P do fosfato natural de Patos, aplicado sozinho em misturas com superfosfato triplo, estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Aproveitamento (%) do fósforo do fosfato natural de Patos de Minas (FN), aplicado sozinho ou em misturas compactadas com superfosfato triplo (SFT + FN), por plantas de milho cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

O aproveitamento de 10,52 % do P do superfosfato triplo (^{32}P -SFT), aplicado sozinho, pelas plantas de milho foi significativamente ($p \leq 0,05$) maior que os aproveitamentos do P do FN de todas misturas indicando a elevada reatividade desse fertilizante e a baixa reatividade do FN de Patos foi verificada pelo aproveitamento de apenas 0,83 % do P aplicado no solo.

A mistura dessas fontes melhorou o aproveitamento do P do FN pelas plantas e esse efeito foi crescente com o aumento da quantidade de SFT na mistura (Figura 1), por causa da maior acidez gerada pela hidrólise do fertilizante fosfatado de alta solubilidade. Como o SFT e o FN de Patos foram aplicados juntos (compactados) no solo, o efeito foi principalmente devido à interação química entre as fontes de P na mistura (MOKWUNYE; CHIEN, 1980). Esse efeito no aumento da disponibilidade do P do FN quando aplicado misturado com uma fonte de P de

elevada solubilidade não foi observado por Nachtigall et al. (1989) e por Xiong et al. (1996) com fosfatos naturais de baixa reatividade do Brasil e da China, respectivamente. Já Prochnow et al. (2004), com auxílio de equações de regressão, estimaram aumento na absorção do P do FN de Patos aplicado em misturas compactadas com superfosfato simples em relação ao FN aplicado sozinho pelas culturas trigo e do azevém (“ryegrass”).

A mistura de superfosfato triplo com o fosfato natural de Patos de Minas aumentou a absorção do P desta fonte pelas plantas de milho, porém, se comparado com o aproveitamento de 10,52% do P do SFT pelas plantas, mesmo na proporção de 80% SFT: 20% FN, o aproveitamento de 2,57% do P do FN é baixo.

A matéria seca produzida e o P acumulado na parte aérea das plantas de milho aumentaram significativamente de forma quadrática em função das doses de P aplicadas como superfosfato triplo (SFT) e misturas de SFT + FN de Patos (Figuras 2-A e 2-B).

Embora a quantidade de P acumulado pelo milho tenha aumentado com o incremento da dose de fósforo aplicada, o aproveitamento relativo do P do superfosfato triplo, aplicado só ou nas misturas com o fosfato natural de Patos, decresceu linearmente com o incremento das doses de fósforo aplicadas (Figura 3), isto porque o aproveitamento é relativo à dose de P aplicada.

Nas misturas de SFT com o FN de Patos observa-se uma redução no aproveitamento do P do SFT comparado com o tratamento no qual esta fonte de P foi aplicada só na mesma quantidade (Figura 3), por exemplo, no tratamento 60 (30 SFT + 30 FN) o aproveitamento do P do SFT foi de 6,97%, enquanto que no de 30 SFT foi de 10,60%. Isso ocorreu, provavelmente, devido à interação química entre essas fontes de P com a formação fosfato de ferro que são compostos insolúveis em água de P ligado a Fe, elemento este presente nas impurezas do fosfato natural de Patos como verificado por Prochnow et al. (2003). Esse efeito deve ser semelhante ao que ocorre em fosfatos naturais de baixa reatividade que não são recomendados para acidulação parcial diretamente por causa dos seus elevados teores de sesquióxidos de Fe e Al (RAJAN, 2004).

Figura 2 - Efeito das doses de fósforo, aplicadas como superfosfato triplo (SFT) ou misturas de SFT com fosfato natural de Patos de Minas (FN), na matéria seca produzida (A) e no P acumulado (B) por plantas de milho cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. *Significativo a 5% de probabilidade

Figura 3 - Aproveitamento do P do superfosfato triplo (SFT), aplicado sozinho em misturas com o fosfato natural de Patos de Minas (FN), pelo milho cultivado em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, em função das doses de P.
*Significativo a 5% de probabilidade

Os dados de aproveitamento do P do FN de Patos, aplicado só ou em misturas com SFT na proporção 50:50, do experimento de doses estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Aproveitamento do fósforo do fosfato natural (FN) de Patos de Minas aplicado sozinho ou em misturas com superfosfato triplo (SFT)

Tratamentos	Aproveitamento do P ⁽²⁾ (FN)
	-----%-----
90 FN	0,54 b
15 (7,5 ⁽¹⁾ SFT + 7,5 FN)	1,66 a
30 (15 SFT + 15 FN)	1,61 a
60 (30 SFT + 30 FN)	1,95 a
90 (45 SFT + 45 FN)	1,96 a

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos de Minas.

As doses de fósforo não influenciaram no aproveitamento do P do fosfato natural de Patos de Minas pelas plantas de milho. No entanto, o aproveitamento do P do fosfato natural de Patos de Minas foi significativamente maior em todas doses quando aplicado em misturas com o superfosfato triplo em relação ao FN aplicado só.

Assim, as misturas de superfosfato triplo com o fosfato natural de Patos de Minas aumentaram a disponibilidade do P desta fonte, mas houve uma redução no aproveitamento do fósforo do SFT pelas plantas de milho.

2.3.3 Experimento 3 - Efeito das proporções das misturas de superfosfato triplo com fosfatos naturais de Patos ou de Gafsa no aproveitamento do fósforo do FN pela soja

Os dados de matéria seca produzida e P acumulado pela parte das plantas de soja dos tratamentos adicionais, com superfosfato marcado com ^{32}P , estão apresentados nas Tabelas 5 e 6 do apêndice C.

Os dados de matéria seca produzida, P acumulado e seus valores correspondentes de eficiência agrônômica relativa (EAR) estão apresentados nas Tabelas 22 e 23 para o fosfato natural de Patos e Tabelas 24 e 25 para o de Gafsa.

Efeitos significativos ($p \leq 0,05$) foram obtidos em resposta a aplicação de P. Todos tratamentos contendo SFT foram superiores a testemunha em termos de matéria seca produzida e P acumulado na parte aérea das plantas de soja. Entretanto, não houve diferença significativa entre os tratamentos 100% FN de Patos (Tabelas 22 e 23) ou de Gafsa (Tabela 24 e 25) com a testemunha (sem adição de P) para essas duas variáveis dependentes, confirmando a baixa eficiência agrônômica do fosfato natural de Patos de Minas quando aplicado sozinho devido sua baixa reatividade e reiterando a baixa eficiência do FN de Gafsa quando aplicado de modo localizado no solo conforme observado por Corrêa et al. (2005) e pelos dados obtidos no experimento 1. Prochnow et al. (2004), cultivando trigo e azevém (“ryegrass”) e Villanueva et al. (2006) cultivando eucalipto também observaram baixa eficiência agrônômica do FN de Patos.

Tabela 22 - Matéria seca da parte aérea produzida (g vaso^{-1}) e eficiência agrônômica relativa (EAR) obtida com fontes de P para soja

Tratamentos	Matéria seca g	EAR %
100% ⁽¹⁾ SFT	15,50 a	100
80% SFT + 20% ⁽²⁾ FN	14,97 ab	94
60% SFT + 40% FN	14,31 ab	86
50% SFT + 50% FN	13,39 abc	76
40% SFT + 60% FN	12,54 bc	66
20% SFT + 80% FN	11,54 c	54
100% FN	6,99 d	2
Testemunha	6,85 d	-

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos de Minas.

Tabela 23 - Fósforo acumulado (mg vaso^{-1}) na parte aérea das plantas e eficiência agrônômica relativa (EAR) obtida com fontes de P para soja

Tratamentos	P acumulado mg vaso^{-1}	EAR %
100% ⁽¹⁾ SFT	28,82 a	100
80% SFT + 20% ⁽²⁾ FN	23,07 b	75
60% SFT + 40% FN	18,88 c	57
50% SFT + 50% FN	16,26 c	46
40% SFT + 60% FN	13,60 d	34
20% SFT + 80% FN	12,14 d	28
100% FN	6,12 e	2
Testemunha	5,61 e	-

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos de Minas.

Nas misturas compactadas de SFT com FN de Patos, observa-se que apesar da matéria seca produzida não diferir estatisticamente entre as misturas nas proporções 50:50, 60:40, 80:20 com o tratamento 100% SFT, neste tratamento o P acumulado na parte aérea das plantas foi significativamente ($p \leq 0,05$) maior que os demais tratamentos. A eficiência agrônômica relativa foi maior e menor, respectivamente quando os fertilizantes superfosfato triplo e o FN de Patos

foram aplicados sozinhos e a EAR foi maior com o aumento da quantidade do SFT nas misturas com o FN de Patos.

Os valores de aproveitamento do fósforo dos fosfatos naturais de Patos de Minas e de Gafsa, aplicados sozinhos ou misturados com superfosfato triplo, estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 4 e 5.

A baixa disponibilidade de P do FN de Patos e a elevada solubilidade do SFT são confirmadas, respectivamente pelos aproveitamentos de 0,76% e de 11,23% do P dessas fontes pelas plantas de soja.

Figura 4 - Aproveitamento (%) do fósforo do fosfato natural de Patos de Minas (FN), aplicado sozinho ou em misturas compactadas com superfosfato triplo (SFT + FN), por plantas de soja cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

O aproveitamento do P do FN de Patos pelas plantas de soja foi significativamente ($p \leq 0,05$) maior quando misturado com SFT e esse efeito foi crescente com o aumento da quantidade

dessa fonte solúvel de P nas misturas (Figura 4), principalmente devido à interação química entre essas fontes de P resultando em maior solubilização do fosfato natural na presença do SFT (MOKWUNYE; CHIEN, 1980). Comparado com o aproveitamento de 11,23% do P do SFT pelas plantas, mesmo na proporção de 80% SFT: 20% FN, o aproveitamento de 2,82% do P do FN de Patos é baixo por causa da sua baixa reatividade.

Nos tratamentos contendo FN de Gafsa, a matéria seca produzida da parte aérea de plantas de soja não diferiu estatisticamente entre os tratamentos 100% SFT e as misturas compactadas, mas para P acumulado esse efeito foi observado somente com as misturas nas proporções 60:40 e 80:20 (Tabelas 24 e 25).

Tabela 24 - Matéria seca da parte aérea produzida (g vaso^{-1}) e eficiência agrônômica relativa (EAR) obtida com fontes de P para soja

Tratamentos	Matéria seca g	EAR %
100% ⁽¹⁾ SFT	15,50 a	100
80% SFT + 20% ⁽²⁾ FN	15,42 a	99
60% SFT + 40% FN	14,39 a	87
50% SFT + 50% FN	15,73 a	103
40% SFT + 60% FN	14,74 a	91
20% SFT + 80% FN	14,68 a	91
100% FN	8,30 b	17
Testemunha	6,85 b	-

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Gafsa.

Como observado nas misturas de SFT com FN de Patos, os valores de eficiência agrônômica relativa, calculados com base na matéria seca produzida e o P acumulado pelas plantas de soja, foram maiores com o aumento da proporção do SFT nas misturas com FN de Gafsa (Tabelas 24 e 25). No entanto, neste caso os valores de EAR foram superiores aos das misturas com FN de Patos, comparando as mesmas proporções, e próximos a eficiência agrônômica da fonte de P padrão (SFT).

Tabela 25 - Fósforo acumulado (mg vaso⁻¹) na parte aérea das plantas e eficiência agronômica relativa (EAR) obtida com fontes de P para soja

Tratamentos	P acumulado mg vaso ⁻¹	EAR %
100% ⁽¹⁾ SFT	28,82 a	100
80% SFT + 20% ⁽²⁾ FN	28,59 a	99
60% SFT + 40% FN	24,89 ab	83
50% SFT + 50% FN	23,45 bc	77
40% SFT + 60% FN	19,90 cd	62
20% SFT + 80% FN	16,85 d	48
100% FN	7,71 e	9
Testemunha	5,61 e	-

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Gafsa.

Apesar do FN de Gafsa ser de alta reatividade, a aplicação localizada no solo resultou em baixa eficiência, com aproveitamento de apenas 0,83% do P pelas plantas.

Figura 5 - Aproveitamento (%) do fósforo do fosfato natural de Gafsa (FN), aplicado sozinho ou em misturas compactadas com superfosfato triplo (SFT + FN), por plantas de soja cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

Semelhante ao FN de Patos, o aproveitamento do P do FN de Gafsa na parte aérea das plantas de soja foi significativamente ($p \leq 0,05$) maior nas misturas compactadas e esse efeito foi crescente com o aumento da quantidade do SFT nas misturas (Figura 5), principalmente devido à interação química entre essas fontes de P (MOKWUNYE; CHIEN, 1980). Os valores superiores de aproveitamento nas misturas com FN de Gafsa, nas mesmas proporções, foram obtidos por causa da maior reatividade deste fosfato.

Ao contrário do FN de Patos, o aproveitamento da mistura de proporção 80% SFT: 20% FN foi estatisticamente ($p \leq 0,05$) igual ao do SFT, sendo essa mistura tão eficiente quanto o superfosfato triplo aplicado sozinho.

2.3.4 Experimento 4 - Efeito das doses da mistura de superfosfato triplo com fosfatos naturais no aproveitamento do P do FN pela soja

Os dados de matéria seca produzida e P acumulado pela parte das plantas de soja dos tratamentos adicionais, com superfosfato marcado com ^{32}P , estão apresentados nas Tabelas 7 e 8 do apêndice D.

A aplicação das doses P com as misturas de superfosfato triplo com fosfato natural de Patos influenciou significativamente ($p \leq 0,05$) a produção de matéria (Figura 6), mas este parâmetro não foi afetado pelas doses de P aplicadas como SFT e misturas compactadas de SFT com FN de Gafsa, provavelmente por causa do estiolamento excessivo das plantas de soja, que não desenvolveram ramos laterais, cultivadas em casa-de-vegetação.

Os valores de eficiência agrônômica relativa (EAR) foram calculados baseando-se nos dados obtidos com a dose de 120 mg kg^{-1} de P e estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Matéria seca produzida, P acumulado (mg vaso^{-1}) na parte aérea das plantas e eficiência agrônômica relativa (EAR) obtida com fontes de P, na dose de 120 mg kg^{-1} de P, para soja

Tratamentos	Matéria Seca g	EAR %	P acumulado mg vaso^{-1}	EAR %
Testemunha	5,45	-	4,43	-
FN de Patos	6,46	11	6,43	7
FN de Gafsa	6,37	10	7,25	10
⁽¹⁾ SFT + FN de Patos	13,69	91	19,26	55
SFT + FN de Gafsa	13,98	94	31,19	99
SFT	14,53	100	31,53	100

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sinal convencional utilizado:

- Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento.

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos ou de Gafsa.

Conforme já observado com a cultura de milho, a eficiência do FN de Patos foi baixa, com EAR de 7%, em termos de P acumulado, e aproveitamento de apenas 0,50% do total de P aplicado com a dose 120 mg kg^{-1} de P (Tabela 26). A eficiência das fontes de P nos tratamentos

com o fosfato natural de Patos de Minas, em termos de P acumulado, seguiu a ordem de SFT > (SFT + FN de Patos) > FN de Patos.

Embora ainda baixo, o aproveitamento do P do FN foi ligeiramente melhor com a cultura da soja que com o milho, chegando a 1,85%.

Figura 6 - Efeito das doses de fósforo, aplicadas como superfosfato triplo (SFT) ou misturas de SFT com fosfato natural de Patos de Minas (FN), na matéria seca produzida pela soja cultivada em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. * Significativo a 5% de probabilidade

As plantas de soja aproveitaram somente 0,72% do P do fosfato natural de Gafsa aplicado no solo (Tabela 27) e apresentaram EAR de 10%, reiterando a baixa eficiência deste fosfato de alta reatividade quando aplicado localizado no solo.

A eficiência das fontes de P em termos de P acumulado, nos tratamentos com o fosfato natural de Gafsa, seguiu a ordem de $SFT \geq (SFT + FN \text{ de Gafsa}) > FN \text{ de Gafsa}$. Chien, Menon e Billingham (1996), observaram um resultado similar usando um fosfato natural de média reatividade (Centro da Flórida, EUA) aplicado sozinho ou misturado com SFT para as culturas do milho e do feijão caupi.

O P acumulado na parte aérea das plantas de soja aumentou de forma quadrática em função das doses de P aplicadas como SFT, SFT + FN de Patos e SFT + FN de Gafsa (Figuras 7 e 8).

Figura 7 - Efeito das doses de fósforo, aplicadas como superfosfato triplo (SFT) ou misturas de SFT com fosfato natural de Patos de Minas (FN), no P acumulado por plantas de soja cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo. *Significativo a 5% de probabilidade

Figura 8 - Efeito das doses de fósforo, aplicadas como superfosfato triplo (SFT) ou misturas de SFT com fosfato natural de Gafsa (FN), no P acumulado por plantas de soja cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo. *Significativo a 5% de probabilidade

Embora a quantidade de P acumulado pela soja tenha aumentado com o incremento da dose de fósforo aplicada, o aproveitamento relativo do P do superfosfato triplo, aplicado só ou nas misturas com os fosfatos naturais de Patos e de Gafsa, decresceu com o incremento das doses de fósforo aplicadas (Figuras 9 e 10), isto porque o aproveitamento é relativo à dose de P aplicada.

Nas misturas de SFT com o FN de Patos observa-se uma redução no aproveitamento do P do SFT comparado com o tratamento no qual esta fonte de P foi aplicada só na mesma quantidade (Figura 9). Assim, por exemplo, no tratamento 60 (30 SFT + 30 FN) o aproveitamento do P do SFT foi de 10,79%, enquanto que no de 30 SFT foi de 20,39%. Isso ocorreu, provavelmente, devido à interação química entre essas fontes de P resultando na formação de compostos insolúveis em água de P com Fe (P-Fe), elemento este presente nas impurezas do fosfato natural de Patos, como verificado por Prochnow et al. (2003). Esse efeito deve ser semelhante ao que ocorre em fosfatos naturais de baixa reatividade que não são recomendados para acidulação parcial diretamente por causa dos seus elevados teores de sesquióxidos de Fe e Al (RAJAN, 2004).

Figura 9 - Aproveitamento do P do superfosfato triplo (SFT), aplicado sozinho ou em misturas com o fosfato natural de Patos de Minas (FN), pela soja, em função das doses de P

Ao contrário do observado com o FN de Patos, nas misturas com Gafsa o aproveitamento do P do SFT pelas plantas de soja não alterou (Figura 10). Assim, por exemplo, na mistura de dose 60 mg kg^{-1} de P (30 SFT + 30 FN) o aproveitamento do P do fertilizante SFT foi de 19,64%, praticamente igual ao do SFT na dose de 30 mg kg^{-1} , que foi de 20,39%.

A mistura do SFT com FN Gafsa é vantajosa, pois aumentou consideravelmente a eficiência do fosfato natural, sem diminuir o aproveitamento de SFT.

Figura 10 - Aproveitamento do P do superfosfato triplo (SFT), aplicado sozinho em misturas com o fosfato natural de Gafsa (FN), pela soja, em função das doses de P

Os dados de aproveitamento do fósforo do fosfato natural, aplicado sozinho ou nas misturas com o SFT estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Aproveitamento do fósforo dos fosfatos naturais (FN) de Patos de Minas e de Gafsa, aplicados sozinho em misturas com superfosfato triplo (SFT)

Tratamentos	Aproveitamento do P ⁽²⁾ (FN)	
	Patos de Minas	Gafsa
	-----%-----	
120 FN	0,50 b	0,72 d
15 (7,5 ⁽¹⁾ SFT + 7,5 FN)	1,61 a	3,12 c
30 (15 SFT + 15 FN)	1,85 a	4,78 b
60 (30 SFT + 30 FN)	1,19 a	4,95 ab
90 (45 SFT + 45 FN)	1,49 a	5,67 a
120 (60 SFT + 60 FN)	1,69 a	5,45 ab

Notas: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

⁽¹⁾ Superfosfato triplo.

⁽²⁾ Fosfato natural de Patos ou de Gafsa.

Embora as doses de fósforo não influenciaram no aproveitamento do P dos fosfatos naturais (FNs) de Patos de Minas e de Gafsa, observa-se um aumento no aproveitamento no P destas fontes quando aplicadas em misturas com o superfosfato triplo em relação aos FNs aplicados só.

3 CONCLUSÕES

- A aplicação de uma fonte de fósforo de elevada solubilidade em água, como o superfosfato triplo, juntamente com um fosfato natural melhora o aproveitamento do P desta fonte tanto pelo milho como pela soja e esse efeito é maior para o fosfato de Gafsa em relação ao de Patos de Minas.
- O efeito no aumento da disponibilidade do fósforo do fosfato natural é dependente das proporções das misturas, sendo crescente com o aumento da quantidade de superfosfato na mistura, enquanto que as doses de P não influenciam no aproveitamento do P pelas culturas testadas.
- Ao contrário do fosfato natural de Patos, o aproveitamento de P do FN de Gafsa quando misturado com a máxima proporção de SFT (80: 20) pela soja foi igual ao do superfosfato triplo desta mistura e tão eficiente quanto o SFT aplicado só.
- Para o milho, a simples presença de P na forma solúvel na fase inicial de desenvolvimento das plantas não melhorou o aproveitamento do P do fosfato natural, provavelmente pelo menor tempo de desenvolvimento das plantas. Para a soja, porém, esse efeito foi significativo confirmando o efeito fisiológico.
- A mistura do superfosfato triplo com os fosfatos naturais de Patos de Minas ou de Gafsa no mesmo grânulo (compactação com água) melhora o aproveitamento do fósforo desses fosfatos tanto para o milho como para a soja.
- A mistura compactada do superfosfato triplo com o fosfato natural de Patos de Minas aumenta o aproveitamento do FN, mas diminui o do superfosfato triplo. Nas misturas com o fosfato de Gafsa, porém, este efeito com o SFT não é observado.

- A aplicação localizada do superfosfato triplo proporciona maior aproveitamento do fósforo em relação a este fertilizante misturado ao solo, ocorrendo o contrário para o fosfato natural de Gafsa.
- A aplicação dessas fontes de P no mesmo grânulo (compactação com água) é uma alternativa em relação aos métodos que melhoram a eficiência dos fosfatos naturais, como a compactação sob pressão ou a aplicação da mistura dessas fontes de P separadas no solo. As vantagens práticas da compactação com água seria o modo preparo da mistura pelas indústrias de fertilizantes e o modo de aplicação dessa mistura no campo pelos os agricultores, podendo ser realizada da mesma maneira empregada atualmente na aplicação dos fertilizantes fosfatados. No entanto, para determinar a viabilidade comercial desse método, novos estudos são necessários para avaliar a produtividade das culturas no campo e os custos de produção dessa mistura de fontes de P.
- A técnica da diluição isotópica de ^{32}P foi uma eficiente ferramenta para determinar efeito no aumento da eficiência dos fosfatos naturais quando aplicado junto com superfosfato triplo e quantificar o aproveitamento dessas fontes de P pelas culturas do milho e da soja.

REFERÊNCIAS

BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; HE, Z.L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, p. 921-950, 2001.

BARBOSA FILHO, M.P. Utilização de fosfatos naturais em solos de cerrado. **Informações Agronômicas**, n. 28, Piracicaba-SP, p.12, 1984.

BOLLAND, M.D.A.; GILKES, R.J.; BRENNAN, R.F. The influence of soil properties on the effectiveness of phosphate rock fertilizers. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 39, p. 773-798, 2001.

BORN, H.; KAHN, H. Caracterização geológica e mineralógica voltada ao aproveitamento de jazimentos fosfáticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1990, p. 213-233.

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

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Análise de corretivos fertilizantes e inoculantes: métodos oficiais**. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, 1983. 104 p.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 78).

CASANOVA, E.F. Agronomic evaluation of fertilizers with special reference to natural and modified phosphate rock. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, p. 211-218, 1995.

CASANOVA, E.F.; SALAS, A.M.; TORO, M. Evaluating the effectiveness of phosphate fertilizers in some Venezuelan soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, p. 13-20, 2002.

CHIEN, S.H.; ADAMS F.; KHASAWNEH, F.E.; HENAO, J. Effects of combinations of triple superphosphate and a reactive phosphate rock on yield and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1656-1658, 1987.

CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. **Agronomic evaluation of partially acidulated phosphate rocks in the tropics**. Muscle Shoals: International Fertilizer Development Center, 1988. 10 p. (Paper series, P7).

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, 1995a.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Agronomic evaluation of modified phosphate rock products. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, p. 197-209, 1995b.

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.

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.; SFTUPIELLO, J.J.; CARNIER, P.E. Avaliação da eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados para a cultura do milho. **Científica**, São Paulo, v. 19, p. 93-104, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Brasília: DNPM/DIRIN, 2001. 1 v. (Texto Fosfato).

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. (Special Publication SP-1).

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 Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Solos, 1999. 412p.

FAQUIN, V.; MALAVOLTA, E.; MURAOKA, T. Cinética da absorção de fosfato em soja sob influência de micorriza vesíco-arbuscular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 41-48, 1990.

FEITOSA, C.T.; RAIJ, B.V.; DECHEN, A.R.; ALCARDE, J.C. Determinação preliminar da eficiência relativa de fosfatos, para trigo em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 2, p. 193-198, 1978.

FERNANDES, C.; MURAOKA, T. Absorção de fósforo por híbridos de milho cultivados em solo de Cerrado. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p. 781-787, 2002.

FREIRE, M.; BRAGA, J.M.; MARTIN FILHO, S.C.A. Valor fertilizante de fosfatos solúveis, Araxá e parcialmente acidulado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 65-68, 1983.

FRIED, M.; MACKENZIE, A J. Rock phosphate studies with neutron irradiated rock phosphate. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 14, p. 226-231, 1949.

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

GOEDERT, W.J.; REIN, T.A.; SOUZA, D.M.G. Eficiência agronômica de fosfatos naturais, fosfatos parcialmente acidulados e termofosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.25, p. 521-530, 1990.

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.; MOKWUNYE, A.U. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 40, p. 89-140, 1986.

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, 2005. 515 p.

HINSIGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, p. 173-195, 2001.

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. 31p. (Boletim Técnico).

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.

KPOMBLEKOU, K.; CHIEN, S.H.; HENAO, J.; HILL, W.A. Greenhouse evaluation of phosphate fertilizers produced from Togo phosphate rock. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 22, p. 63-73, 1991.

KUCEY, R.M.N.; BOLE, J.B. Availability of phosphorus from 17 rock phosphate in moderately and weakly acidic soils as determined by ^{32}P dilution, A value, and total P uptake methods. **Soil Science**, New Brunswick, v. 138, p. 180-188, 1984.

KUNISHI, H.M. Combined effects: of lime, phosphate fertilizer and aluminium on plant yield from an acid soil of the South eastern United States. **Soil Science**, New Brunswick, v. 134, p. 233-238, 1982.

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. 36p. (Bulletin Y-43).

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

LOPES, A.S.; COX, F.R. A survey of the fertility status of surface soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 41, p. 742-747, 1977.

MAENE, L.M. Direct application of phosphate rock: a global perspective of the past, present, and future, 2003. In: RAJAN, S.S.S.; CHIEN, S.H. Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences. Muscle Shoals: IFDC, 2001. 441 p.

MARCIANO, A.; RODRIGUEZ, A.J.; ARAÚJO, A.C. Caracterização tecnológica do fosfato de Patos de Minas. In: SIMPÓSIO EPUSP DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA NA ENGENHARIA E INDÚSTRIA MINERAL, 1990. São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1990. p. 281-991.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889p.

McLEAN, E.O.; WHEELER, R.W.C. Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants. I. Growth chamber studies. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 28, p. 545-550, 1970a.

McLEAN, E.O.; LOGAN, T.J. Sources of phosphorus for plants grown in soils of differing phosphorus fixation tendencies. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 34, p. 907-911, 1970b.

McCLELLAN, G.H.; VAN KAUWENBERGH, S.J. Characterization of phosphate rocks. In: ZAPATA, F.; ROY, R.N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO 2004, chap. 3, p. 17-26.

McCONNELL, D. A structural investigation of the isomorphism of the apatite group. **American Mineralogist**, Tucson, v. 54, p. 1379-1391, 1938.

MENON, R.G.; CHIEN, S.H.; GADALLA, A.N. Phosphate rock compacted with superphosphates vs. partially acidulated rocks for bean and rice. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, p.1480-1484, 1991.

MEW, M. Phosphate rock. In: MORGAN, R. Metals and mineral annual review. London: The Mining Journal, 2000. p. 110-122.

MOKWUNYE, A.U.; CHIEN, S.H. Reactions of partially acidulated phosphate rock with soils from the tropics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 477-482, 1980.

MONTENEGRO, A.; ZAPATA, F. Rape genotypic differences in P uptake and utilization from phosphate rocks in an Andisol of Chile. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, p. 27-33, 2002.

MURAOKA, T. Efeito de fontes de nitrogênio na absorção de fósforo pelo trigo. **Energia Nuclear na Agricultura**, Piracicaba, v. 5, p. 31-40, 1983.

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.

NACHTIGALL, G. R.; BRAUNER, J. L.; ZOLEZZI, M.; TAPIA, F. Mistura de superfosfato triplo com fosfato de Jacupiranga no mesmo grânulo na eficiência do fosfato natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 269-273, 1989.

NEPTUNE, A.M.L.; MURAOKA, T.; SFTEWART, J.W.B. Efficiency of fertilizer phosphorus utilization by common bean under different methods of applying phosphatic fertilizer. **Turrialba**, San José, v. 29, p. 29-34, 1979.

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

PROCHNOW, L.I.; CHIEN, S.H.; TAYLOR, R.W.; CARMONA, G.; HENAO, J.; DILLARD, E.F. Characterization and agronomic evaluation of single superphosphates varying in iron phosphate impurities. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 293-302, 2003.

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. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A; FURLANI, A.M.C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundação IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

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

RAJAN, S.S.S.; MARWAHA, B.C. Use of partially acidulated phosphate rocks as phosphate fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 33, p. 47-59, 1993.

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

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, chap. 9, p. 85-97.

RESENDE, A.V. de; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C; MUNIZ, J.A.; CURI, N.; FAQUIN, V., KIMPARGA, D.I.; SANTOS, J.Z.L.; CARNEIRO, L.F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 453-466, 2006.

RODRIGUEZ, R.; HERRERA, J. Field evaluation of partially acidulated phosphate rocks in a Ferralsol from Cuba. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, p. 21-26, 2002.

SALCEDO, I.H.; BERTINO, F.; SAMPAIO, E.V.S.B. Reactivity of phosphorus in northeastern Brazilian soils assessed by isotopic dilution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 140-145, 1990.

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Química, 1974. 57 p.

SARRUGE, J.R. Soluções nutritivas. **Summa Phytopatologica**, Piracicaba, v. 1, p. 231-233, 1975.

SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). **The SAS-system for Windows release 6.11** (software). Cary, 1996. 1 CD-ROM.

SCIVITTARO, W. B.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados fluidos e sólidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 505-511, 1997.

SMYTH, T.J.; SANCHEZ, P.A. Phosphate rock and superphosphate combinations for soybean in a Cerrado Oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 730-735, 1982.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TANAKA, R.T. **Disponibilidade de fósforo do fosfato de Patos para a cultura de milho (*Zea mays* L.) em Latossolo Roxo Distrófico sob condições de casa de vegetação**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 1978. 68p.

VANCE, C. P.; UHDE-STONNE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Lancaster, v. 157, p. 423-447, 2003.

VAN KAUWENBERGH. Overview of world phosphate rock production. In: RAJAN, S.S.S.; CHIEN, S.H. Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences. Muscle Shoals: IFDC, 2001. 441 p.

VILLANUEVA, F.C.A.; DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; DUETE, W. L. C.; ABREU JUNIOR, C. H. Utilização de fósforo do solo e do fertilizante por tomateiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p. 167-172, 2002.

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. 391p.

XIONG, L.M.; ZHOU, Z.G.; LU, R.K. Enhanced plant growth by uniform placement of superphosphate with rock phosphate in acidic soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 27, p. 2837-2850, 1996.

XIONG, L.M.; ZHOU, Z.G.; FARDEAU, J.C.; FENG, G.L.; LU, R.K. Isotopic assessment of soil phosphorus fertility and evaluation of rock phosphates as phosphorus sources for plants in subtropical China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, p. 91-98, 2002.

ZAPATA, F.; AXMANN, H. ^{32}P isotopic techniques for evaluating the agronomic effectiveness of rock phosphate materials. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, p. 189-195, 1995.

ZAPATA, F.; ZAHARAH, A.R. Phosphorus availability from phosphate rock and sewage sludge as influence by the addition of water soluble phosphate fertilizer. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, p. 43-48, 2002.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 1 - Efeito do modo de aplicação de fontes P na matéria seca produzida e na quantidade de P acumulado pela parte aérea de plantas de milho cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

Tratamentos ^(1,2,3,4)	Matéria Seca g	P acumulado mg vaso ⁻¹
SFT (loc)	9,45	20,47
SFT (m)	7,29	15,69
SFT (loc) + FN (loc)	8,41	13,58
SFT (loc) + FN (m)	9,64	16,29
SFT (m) + FN (loc)	7,49	11,83
SFT (m) + FN (m)	7,51	14,19
[(SFT + FN) compactado]	8,15	14,12

¹SFT-³²P: superfosfato triplo.

²FN: fosfato natural de Gafsa

³m: misturado ao solo.

⁴loc: localizado no solo.

Tabela 2 - Efeito do modo de aplicação de fontes P na matéria seca produzida e na quantidade de P acumulado pela parte aérea de plantas de soja cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

Tratamentos ^(1,2,3,4)	Matéria Seca g	P acumulado mg vaso ⁻¹
SFT (loc)	10,86	21,87
SFT (loc) + FN (loc)	9,05	13,38
SFT (loc) + FN (m)	10,99	17,47
[(SFT + FN) compactado]	10,46	17,26

¹SFT-³²P: superfosfato triplo.

²FN: fosfato natural de Gafsa.

³m: misturado ao solo.

⁴loc: localizado no solo.

APÊNDICE B

Tabela 3 - Efeito das misturas de proporções de superfosfato triplo (^{32}P) com fosfato natural de Patos na matéria seca produzida e na quantidade de P acumulado pela parte aérea de plantas de milho cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

Fonte de P ^(1,2)	Matéria seca g vaso ⁻¹	P acumulado mg vaso ⁻¹
100% SFT	15,68	26,74
80% SFT + 20% FN	13,84	20,31
60% SFT + 40% FN	12,03	16,48
50% SFT + 50% FN	11,91	13,58
40% SFT + 60% FN	10,45	11,66
20% SFT + 80% FN	9,03	10,14

¹SFT- ^{32}P : superfosfato triplo.

²FN: fosfato natural de Patos.

Tabela 4 - Efeito de doses P aplicadas como misturas de superfosfato triplo (^{32}P) com fosfato natural de Patos na matéria seca produzida e na quantidade de P acumulado pela parte aérea de plantas de milho cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

Dose de P ^(1,2) mg kg ⁻¹	Matéria seca g vaso ⁻¹	P acumulado mg vaso ⁻¹
15 (SFT + FN)	3,25	5,18
30 (SFT + FN)	5,82	8,48
60 (SFT + FN)	8,53	12,39
90 (SFT + FN)	9,10	14,10

¹SFT- ^{32}P : superfosfato triplo.

²FN: fosfato natural de Patos.

APÊNDICE C

Tabela 5 - Efeito das misturas de proporções de superfosfato triplo (^{32}P) com fosfato natural de Patos na matéria seca produzida e na quantidade de P acumulado pela parte aérea de plantas de soja cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

Tratamentos ^(1,2)	Matéria seca g	P acumulado mg vaso ⁻¹
100% SFT	15,62	28,57
80% SFT + 20% FN	14,89	23,23
60% SFT + 40% FN	14,33	18,99
50% SFT + 50% FN	13,86	16,35
40% SFT + 60% FN	13,11	13,54
20% SFT + 80% FN	11,68	12,53

¹SFT- ^{32}P : superfosfato triplo.

²FN: fosfato natural de Patos.

Tabela 6 - Efeito das misturas de proporções de superfosfato triplo (^{32}P) com fosfato natural de Gafsa na matéria seca produzida e na quantidade de P acumulado pela parte aérea de plantas de soja cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

Tratamentos	Matéria seca g	P acumulado mg vaso ⁻¹
100% ⁽¹⁾ SFT	15,62	28,57
80% SFT + 20% ⁽²⁾ FN	15,11	28,15
60% SFT + 40% FN	14,94	26,43
50% SFT + 50% FN	14,98	23,70
40% SFT + 60% FN	14,92	20,04
20% SFT + 80% FN	14,13	16,67

¹SFT- ^{32}P : superfosfato triplo.

²FN: fosfato natural de Gafsa.

APÊNDICE D

Tabela 7 - Efeito de doses P aplicadas como misturas de superfosfato triplo com fosfato natural de Patos na matéria seca produzida e na quantidade de P acumulado pela parte aérea de plantas de soja cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

Dose de P ^(1,2) mg kg ⁻¹	Matéria seca g	P acumulado mg vaso ⁻¹
15 (SFT+ FN)	8,39	8,07
30 (SFT+ FN)	10,60	11,54
60 (SFT+ FN)	11,25	12,33
90 (SFT+ FN)	12,59	16,10
120 (SFT + FN)	13,25	19,09

¹SFT-³²P: superfosfato triplo.

²FN: fosfato natural de Patos.

Tabela 8 - Efeito de doses P aplicadas como misturas de superfosfato triplo com fosfato natural de Gafsa na matéria seca produzida e na quantidade de P acumulado pela parte aérea de plantas de soja cultivadas em amostras de terra de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

Dose de P ^(1,2) mg kg ⁻¹	Matéria seca g	P acumulado mg vaso ⁻¹
15 (SFT+ FN)	10,44	10,05
30 (SFT+ FN)	13,26	15,04
60 (SFT+ FN)	12,80	22,00
90 (SFT+ FN)	13,52	27,39
120 (SFT + FN)	13,80	31,05

¹SFT-³²P: superfosfato triplo.

²FN: fosfato natural de Gafsa.