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

**Eficiência de fosfatos com solubilidade variável em água em solos com
capacidade de fixação de fósforo induzida**

Graziela Braga

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

**Piracicaba
2006**

**Graziela Braga
Engenheiro Agrônomo**

**Eficiência de fosfatos com solubilidade variável em água em solos com capacidade de
fixação de fósforo induzida**

**Orientador:
Prof. Dr. LUÍS IGNÁCIO PROCHNOW**

**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

Braga, Graziela

Eficiência de fosfatos com solubilidade variável em água em solos com capacidade de fixação de fósforo induzida / Graziela Braga. - - Piracicaba, 2006.
82 p.

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

1. Fertilizante – Eficiência 2. Fertilizante fosfatado 3. Fosfatos 4. Fósforo – Fixação
5. Rocha fosfatada I. Título

CDD 631.41

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

*À Deus por agradecer-me com saúde, paz, uma família maravilhosa
e pela presença constante em minha vida, permitindo-me alcançar
mais uma vitória.*

OFEREÇO

*Aos meus pais, Luiz e Selma, presentes de Deus à minha vida,
pelo exemplo de vida, de tanta coragem e dedicação,
por mostrarem sempre o caminho da verdade,
por tantas vezes que abdicaram de vossos sonhos para realizar os meus,
por todas as alegrias que proporcionaram-me,
pelo amor incondicional e incentivo nos momentos mais difíceis.*

*E à minha irmã Vivian, pela amizade, compreensão
e companheirismo em todas as situações.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela oportunidade de realização do curso.

Ao meu orientador, Luís Ignácio Prochnow, por sua amizade e confiança que possibilitaram a oportunidade de iniciar este trabalho; pela paciência e compreensão durante todos os momentos e pelo incentivo e apoio nas dificuldades que surgiram no decorrer do curso.

À FAPESP pela concessão da Bolsa de Estudos e recursos financeiros.

À Comissão de Pós-Graduação do curso de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP pela oportunidade concedida e pelos recursos financeiros fornecidos para realização deste trabalho.

Aos químicos José Aurélio Bonassi, responsável pelo Laboratório de Isótopos Estáveis - CENA/USP, e Luiz Silva, responsável pelo Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas – ESALQ/USP pelo apoio na execução do projeto de filtragem do gel de ferro.

Aos técnicos de laboratório do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas Luis Fernando Baldesin e João Álvaro Ramos Granja pelo apoio durante o desenvolvimento do projeto.

Ao amigo, Adilson de Oliveira Junior, pela amizade, incentivo, conselhos e auxílio no desenvolvimento deste trabalho, além de seu companheirismo em todos os momentos.

Aos amigos Gean, Ana Carolina, José Geraldo, Jack, José Olímpio, Fernanda, Francirose, Daniela, Eros, Susian e Camila pela amizade, incentivo e companheirismo durante o Curso de Mestrado.

Ao Jonnhy, estagiário do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, pelo auxílio em várias etapas do meu trabalho.

À Maria do Rosário Soler pelo constante apoio e incentivo no decorrer deste trabalho, e pela amizade em todos os momentos da minha vida.

Às queridas colegas e funcionárias do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Jakeline Campos da Silva e Flávia Morales, pelo apoio durante o Curso de Mestrado, sempre prestativas e dispostas a cooperar no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais funcionários do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Karina, Chico, Hudson, Martinha, Nancy, Dorival, Leandro, Juruna e todos os outros, que de uma forma ou de outra sempre auxiliaram na condução do meu trabalho.

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

"É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfo e glória, mesmo expondo-se à derrota, do que formar fila com os pobres de espírito, que não gozam muito e nem sofrem muito, porque vivem na penumbra cinzenta que não conhece nem vitória nem derrota."

Theodore Roosevelt

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Reação do fósforo nos solos.....	12
2.2 Capacidade de fixação de fósforo dos solos tropicais	13
2.3 Fertilizantes fosfatados.....	17
2.4 Eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados	21
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1 Caracterização do solo utilizado no experimento em casa de vegetação	27
3.2 Caracterização das fontes de fósforo	28
3.3 Preparo do gel de ferro	29
3.4 Avaliação da capacidade de adsorção de fósforo	31
3.5 Experimentos.....	31
3.5.1 Experimento 1: Liberação de P pelas fontes	31
3.5.2 Experimento 2: Eficiência agrônômica relativa das fontes de P	34
3.6 Análise dos dados	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Capacidade de adsorção de fósforo dos solos	41
4.2 Experimento 1: Liberação de P pelas fontes	42
4.3 Experimento 2: Eficiência agrônômica relativa das fontes de P	50
5 CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICES	78

RESUMO

Eficiência de fosfatos com solubilidade variável em água em solos com capacidade de fixação de fósforo induzida

O presente trabalho constou de dois experimentos, ambos realizados em casa de vegetação do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP com delineamento experimental de blocos ao acaso, nos quais utilizaram-se amostras de um Latossolo Amarelo adicionando-se ou não um gel de ferro (Fe), estabelecendo assim condições distintas de capacidade de fixação de fósforo (CFF) para um mesmo solo. As fontes de P testadas foram: (i) fosfato monocalcário p.a. (FMC), que foi utilizado como fonte padrão, (ii) superfosfato simples com baixa solubilidade em água ("low-grade SSP", LG SSP), (iii) multifosfato magnésiano (MFM), (iv) termofosfato (TERMO), e (v) fosfato natural de Arad (FN). A hipótese central estudada foi a de que "algumas fontes de fósforo com baixa solubilidade em água utilizadas no Brasil possuem maior eficiência agrônômica relativa em solos de elevada capacidade de fixação de P". O experimento 1 teve como objetivo comparar e avaliar a liberação de P das fontes em diferentes situações de acidez e fixação de P. Neste estudo não foi utilizada planta. Os tratamentos envolveram cinco fontes de P (FMC; LG SSP; MFM; TERMO; FN), seis doses (0, 12,5; 25; 50; 100 e 200 mg kg⁻¹ P), duas condições de solo (sem e com aplicação de gel de Fe) e dois níveis de acidez (pH_{CaCl2} 4,6 e 5,6). O número total de tratamentos foi de 120 (5 fontes x 6 doses x 2 condições de CFF x 2 níveis de acidez), com três repetições, totalizando assim, 360 unidades experimentais. Amostras de terra foram coletadas 30 dias após a montagem do experimento para avaliar o teor de fósforo no solo, utilizando a resina trocadora de íons como extrator. De forma geral observaram-se maiores valores do índice de eficiência relativa das fontes de baixa solubilidade em água nos solos com indução da CFF. No experimento 2 o objetivo principal foi avaliar a eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes de P. Realizaram-se dois cultivos de milho que seguiram o esquema [(2 x 5) + 2], ou seja, duas condições de solo (sem e com gel de Fe), cinco fontes de P (FMC; LG SSP; MFM; TERMO; FN), duas testemunhas sem P e três repetições (36 unidades experimentais). Nos dois cultivos observou-se um decréscimo na produção de matéria seca, e P acumulado, com o FMC na condição de alta CFF, além disso, ocorreu o aumento da EAR das fontes de baixa solubilidade em água com a indução da CFF. Os resultados dos dois estudos sugerem que geralmente as fontes com baixa solubilidade em água apresentam maiores valores de eficiência relativa quando se induziu o aumento da CFF. Esta informação, adaptada através de experimentação regional adequada de campo, poderá levar a um melhor manejo das fontes de fósforo e ainda auxiliar na tomada de decisão por parte dos empresários rurais com relação a fontes disponíveis de P.

Palavras-chave: Eficiência agrônômica de fertilizantes, fertilizantes fosfatados, fixação de fósforo em solos agrícolas, fontes de fósforo na agricultura, rochas fosfáticas.

ABSTRACT

Effectiveness of phosphates varying in water solubility in soils with induced phosphorus fixation capacity

The study was carried out through two experiments conducted at the greenhouse of the Soil and Plant Nutrition Department, ESALQ/USP, utilizing experimental outline as blocks and a Yellow Latossol, with the addition or not of an iron gel to vary the soil phosphorus (P) fixation capacity (PFC). The P sources tested were: (i) reagent grade monocalcium phosphate (MCP), used as the standard source of P, (ii) low-grade single superphosphate with medium water solubility (LG SSP), (iii) magnesium multiphosphate (MMP), (iv) termophosphate (TERMO), and (v) Arad phosphate rock (PR). The hypothesis tested was that "some P sources, with low water solubility, may have higher relative agronomic effectiveness (RAE) in soils with high PFC". Experiment 1 aimed to evaluate and compare the P released from the sources in different scenarios of soil acidity and PFC. In this study plants were not used as indicators but an extractor of bioavailable P. The treatments consisted of five P sources, six rates of P (0, 12,5; 25; 50; 100 e 200 mg P Kg⁻¹ of soil), two soil conditions as related to PFC (without and with the addition of an iron gel) and two soil pH levels. The total number of treatments was 120, with three replicates, totalizing 360 experimental units. Soil samples were collected 30 days after soil incubation with the P sources and analyzed following the exchange resin as the extractor. In general, higher relative index were observed for the alternative sources of P (low water solubility) in the soil with induced PFC. Experiment 2 was designed to provide information related to the RAE utilizing two short corn plant crops as indicator. The experimental outline was of two soil condition as related to PFC (without and with addition of the iron gel), five P sources, two controls, and three replicates, totalizing 36 experimental units. Only one soil pH condition was tested in this case (with lime added to pH CaCl₂ 5.6). Both corn crops showed a decrease in dry-matter yield and P uptake by the plants with the MCP applied in the soil with higher PFC. The RAE was in general higher for the lower water soluble P sources in the soil with induced PFC. The results of both experiments suggested that, in general, P sources with lower water solubility present higher relative effectiveness when the soil PFC was induced by the addition of the iron gel. The information, once adapted to local field experimentation, can lead to a more adequate management of the P sources, as well may serve to guide farmers in taking decisions as related to sources to be utilized in their agricultural fields.

Key words: Agronomic effectiveness of fertilizers, phosphate fertilizers, soil phosphorus fixation capacity, phosphorus sources in agriculture, phosphate rock.

1 INTRODUÇÃO

Os solos brasileiros são normalmente deficientes em fósforo (P) e, por isso, os fertilizantes fosfatados são bastante utilizados na agricultura. Dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos mostram que o consumo médio anual de matéria-prima para fertilizantes fosfatados é de aproximadamente 2,7 milhões de toneladas (ANDA, 2004), com tendência a aumento nos próximos anos.

A baixa recuperação do P aplicado como fertilizante fosfatado pelas culturas se deve a forte interação dos produtos da reação deste com o solo (fenômeno genericamente chamado de *fixação*¹).

Os solos brasileiros apresentam em sua grande maioria elevada capacidade de fixação de P. Logo, estudos devem ser realizados no sentido de aprimorar a eficiência das fontes de P disponíveis no mercado brasileiro. É possível que para solos de elevada capacidade de fixação de P algumas fontes com menor solubilidade em água possam ao longo do tempo (cultivo único de culturas de ciclo médio a longo ou cultivos sucessivos de culturas de ciclo curto) tornarem-se alternativas viáveis sob o ponto de vista agrônômico e econômico em comparação às fontes de elevada solubilidade em água.

A compreensão dos mecanismos que influem na fixação de fósforo nos solos é fundamental no sentido de se manejar corretamente as diferentes opções de fertilizantes contendo P. Alguns resultados experimentais indicam que fontes de P com baixa solubilidade em água foram mais eficientes que fontes de elevada solubilidade em água em solos de elevada capacidade de fixação de P (MCLEAN; BALAM, 1967; MCLEAN; LOGAN, 1970; MCLEAN; WHEELER, 1964; MCLEAN et al., 1965). Resultados opostos foram obtidos por outros autores (TERMAN; ALLEN, 1967; TERMAN et al., 1964; HAMMOND et al., 1980).

Muito embora os mecanismos que influem na eficiência agrônômica de fontes de P tenham sido bastante estudados e já sejam inclusive tema de livros importantes (HAVLIN et al., 1999; KHASAWNEH et al., 1980; RAIJ, 1991; TISDALE et al., 1985), dados compreensivos relacionando a eficiência agrônômica relativa de fontes de P de baixa solubilidade em água em solos com capacidades distintas de fixação de P são deficientes na literatura mundial, e em

¹ Fixação: conceito divergente entre autores; neste texto o termo é empregado referindo-se aos fenômenos que levam a diminuição da biodisponibilidade de P às plantas, como, principalmente, os de *adsorção específica* e de *precipitação*.

especial no Brasil. Os estudos realizados normalmente se referem a eficiência das fontes em situação específica de solo e não possibilitam verificar a eficiência relativa das fontes em função da capacidade de fixação de P dos solos.

Esta proposta foi idealizada no sentido de averiguar o assunto abordado e fornecer resultados que poderão levar a um melhor aproveitamento de algumas das fontes de P atualmente disponíveis no mercado brasileiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reação do fósforo nos solos

O fósforo (P) é o nutriente mais limitante da produtividade de biomassa em solos tropicais (NOVAIS; SMYTH, 1999). Conseqüentemente, é o mais utilizado na adubação no Brasil e esta situação pode ser explicada tendo em vista a pobreza natural dos solos e a forte interação deste nutriente com o solo (RAIJ, 1991).

Apesar do suprimento natural de P ser insatisfatório ao adequado crescimento das plantas, seu teor total no solo pode variar de 200 a 3.000 mg kg⁻¹, segundo Novais e Smith (1999). Essas grandes variações na quantidade de P total dos solos das regiões tropicais são devidas ao material de origem, ao processo de gênese e às condições climáticas. No Brasil, grande parte do P total encontra-se na forma de P-não lábil, por isso, solos com 200 a 300 mg dm⁻³ de P total podem ser extremamente deficientes para as culturas, pois menos de 0,1 % desse total está presente na solução do solo (GOEDERT et al., 1987; FARDEAU, 1996).

A concentração média do P em solução é aproximadamente de 0,05 mg L⁻¹, mas varia largamente entre os diversos tipos de solos. As plantas exigem uma concentração de 0,003 a 0,3 mg L⁻¹ de P na solução do solo para desenvolverem-se, no entanto estes valores dependem da espécie cultivada e do nível de produtividade (HAVLIN et al., 1999).

O fósforo encontra-se na solução do solo como íon ortofosfato, forma derivada do ácido ortofosfórico (H₃PO₄), estando diretamente relacionado com o pH e suas formas podem dissociar-se de acordo com as reações apresentadas por Lindsay (1979):

Em decorrência dessas reações de equilíbrio, a forma H₂PO₄⁻ predominantemente ocorre em solos ácidos, ou seja, na faixa de pH de 3 a 6 que, naturalmente, ocorre nos solos tropicais (MALAVOLTA, 1985). A forma HPO₄²⁻ passa a predominar em situações de pH mais elevado (acima de 7,0).

As formas de fósforo podem, conceitualmente, ser separadas em: P-solução, P-lábil e P-não lábil, conforme o esquema proposto por Larsen (1967):

Este modelo pressupõe a existência de um equilíbrio rápido estabelecido entre o P-solução e o P-lábil, enquanto que a passagem de P-lábil para P-não lábil ocorre de forma bastante lenta. Como dito anteriormente, os teores de fósforo na solução do solo são geralmente baixos devido a baixa solubilidade dos compostos de fósforo existentes e da alta capacidade de adsorção do elemento pelos constituintes sólidos do solo (RAIJ, 1991).

Os solos da região tropical caracterizam-se pela elevada intemperização, lixiviação de bases e formação de óxi-hidróxidos de alumínio e ferro (ALLEONI, 2003). Nestas situações, aliadas a elevada acidez, as combinações de fósforo mais importantes são com ferro (P-Fe) e alumínio (P-Al). Os óxi-hidróxidos de Al e Fe apresentam-se preferencialmente com carga positiva, sendo assim capazes de reter em sua superfície vários tipos de ânions, predominantemente os íons fosfatos (HEDLEY et al., 1990; NOVAIS et al., 1991). Em solos do Estado de São Paulo, após o fracionamento químico, o P foi encontrado predominantemente na forma de P-Fe (FASSBENDER, 1978; RAIJ, 2003).

A reação do fósforo pode se dar na solução do solo ou pode ocorrer na superfície das partículas sólidas de argila, óxidos de Fe e Al ou de carbonato de cálcio em solos calcários. Quando a retenção ocasiona a formação de compostos insolúveis, o processo é denominado precipitação, tornando o fósforo indisponível às plantas (ALCARDE et al., 1991; FALCÃO; SILVA, 2004).

Com o passar do tempo, o fosfato adsorvido à constituintes específicos de um solo, como óxidos de Fe e Al e minerais de argila, em condições de elevada acidez, pode ser recoberto por mais óxidos ou então tornar-se parte de um óxido cristalino (THOMAS; PEASLEE, 1973; FONTES; WEED, 1996). A adsorção de fosfatos ao solo se estabelece através de ligações covalentes de alta energia, sendo denominada de troca de ligantes (RAIJ, 1991, FONTES; WEED, 1996).

2.2 Capacidade de fixação de fósforo dos solos tropicais

Há uma grande variedade de definições para o termo “fixação de fósforo”. Segundo Sanchez e Uehara (1980) a fixação de fósforo é geralmente entendida como a transformação de

formas solúveis de fósforo em formas menos solúveis após a ocorrência de reações com o solo. A capacidade de fixação de fósforo (CFF) também pode ser similarmente definida como “processo pelo qual os elementos solúveis são transformados em produtos menos solúveis por reações com componentes inorgânicos ou orgânicos resultando em menor mobilidade e disponibilidade” (MALAVOLTA, 1976).

Solos que requerem um valor mínimo de 300 kg ha^{-1} de P para um bom desenvolvimento das plantas são considerados problemáticos no que diz respeito a fixação de P, e necessitam de um manejo diferenciado para se obter uma produção rentável (SANCHEZ; UEHARA 1980). Em certos casos, como os Latossolos argilosos do cerrado brasileiro, o solo pode adsorver mais de 4.000 kg ha^{-1} de P, ou seja, 9.200 kg ha^{-1} de P_2O_5 , incorporado a profundidade de 0-20 cm (ROLIN NETO et al., 2004).

Na América do Sul Tropical, diversos grupos de solos notoriamente possuem elevada capacidade de fixação de fósforo: Oxisolos, Ultissolos, certos Alfisolos óxicos e Inceptissolos, (SANCHEZ; UEHARA 1980).

Os solos brasileiros apresentam em sua maioria elevada capacidade de fixação de P (RAIJ, 1991; LOPES, 1984). Curi et al. (1988), estudando a sorção de P em Latossolos do Sudeste e Sul do Brasil, verificaram ampla variação na adsorção de P, com valores de 495 até 3.400 mg kg^{-1} de solo.

No Estado de São Paulo a retenção pode chegar a 72 % da quantidade de fertilizante aplicado (RODRIGUES, 1980). O principal fator responsável pela fixação de fosfato nos solos paulistas é o conteúdo de óxidos de ferro e alumínio (MELLO, 1968).

Em estudo realizado na região de Piracicaba, determinou-se a necessidade de 2.015 mg kg^{-1} de P em média, para anular o processo de fixação, que ocorria pelo fato dos solos apresentarem textura argilosa e elevados teores de óxido de ferro livre (THOMAZI, 1988).

A fixação de P em solos depende de vários fatores, tais como: pH, teor de Al trocável e tipo de argila e de óxidos (OWUSU – BENNOAH; ACQUAYE, 1989; FALCÃO; SILVA, 2004).

Num trabalho envolvendo mais de 100 solos da América Central obteve-se, em 82 % dos casos, que os principais fatores responsáveis pela fixação de P eram o pH e o conteúdo de óxidos de Fe (FASSBENDER, 1969).

Em estudo com solos do Estado de São Paulo, Rodrigues (1980) observou que o pH do solo apresentava relação direta com a CFF, ou seja, o aumento da acidez do solo acarretava a elevação da fixação de P. Além disso, constatou-se que os principais fatores que influenciaram a capacidade de fixação de fósforo foram o conteúdo de argila, teor de Al trocável e o conteúdo de carbono.

Leal e Velloso (1973) observaram que a prática da calagem em Latossolos ácidos e com alta saturação por Al, promoveu a diminuição na capacidade de fixação de P devido a neutralização do Al trocável. Neste exemplo, a saturação em Al inicial era em torno de 65 % e o pH aproximadamente de 4,2 passando a 5,5 após adição de calcário. Outros trabalhos também apontam que a elevação do pH por meio da calagem trouxe efeitos benéficos na disponibilidade do fósforo (LÊ MARE; LEON, 1989; BRAR; COX, 1991).

Falcão e Silva (2004) estudando oito solos do Estado do Amazonas verificaram o aumento da capacidade de fixação de P à medida que se elevava os teores de Al trocável. Este resultado concorda também com as observações de Syers et al. (1971) em Ultissolos e Oxissolos do Rio Grande do Sul e de Coleman et al. (1960), mas diverge dos dados de Leal e Velloso (1973) que não encontraram relação entre o Al trocável e a fixação de P em solos do cerrado.

Diversos trabalhos mostraram que o teor de argila e superfície específica são fatores importantes na CFF do solo (WEAVER, 1974; SPOSITO, 1989; NOVAIS; SMITH, 1999). Os óxidos de Fe apresentam elevada área superficial e grande influência nos fenômenos de geração de sítios favoráveis à adsorção de P (PARFITTI, 1978; FROSSARD et al., 1994).

Vários estudos demonstraram que, em condições tropicais, quanto mais argiloso for o solo maior a quantidade de P fixado (SYERS et al., 1971; LEAL; VELLOSO, 1973; SANCHEZ; UEHARA, 1980). Similarmente, Sá Jr et al. (1968), avaliando 17 solos de Pernambuco, encontraram que a capacidade de fixação de P foram maiores nos solos com textura mais argilosa, enquanto que os com textura mais arenosa apresentaram valores menores.

Valadares et al (2003), estudando solos de diferentes regiões do Brasil, verificaram que o menor valor da capacidade de adsorção de P (417 mg kg^{-1}) foi obtido num Argissolo Amarelo distrófico da região de Capanema (PA) com baixo teor de argila (60 g kg^{-1}). Os maiores valores de capacidade de adsorção de P (1.667 mg kg^{-1}) foram encontrados em solos com 750 e 830 g kg^{-1} de argila, respectivamente classificados como Argissolo Amarelo distrófico (Caldas, MG) e Latossolo Bruno distrófico (Pitanga, PR). No mesmo trabalho, os autores observaram

correlação positiva entre a superfície específica e a capacidade de adsorção de P, sugerindo que tal atributo também contribui para a adsorção do P, sendo este comportamento também verificado em outros estudos (CAMPELLO et al., 1994; BOSCHETTI et al, 1998).

O teor e a constituição mineralógica da fração argila assumem papel importante na caracterização de um solo como dreno (característica de adsorção de P) ou fonte (apresenta-se com reservas favoráveis à planta). Desta forma, solos muito intemperizados com elevado teor de argila, predominância de minerais de argilas silicatadas do tipo 1:1 (caulinita) e elevados teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al exercerão predominantemente a função de drenos, enquanto aqueles poucos intemperizados (ricos em minerais primários silicatados) exercerão papel de fontes (NOVAIS; SMITH, 1999).

O fenômeno de fixação de P não é comum para todos os solos, existindo variações na CFF de diferentes solos com teores semelhantes de argila, isto provavelmente se deve a variações na composição mineralógica da fração argila dos solos (LEAL; VELLOSO, 1973; FALCÃO; SILVA, 2004).

Assim, além do teor, a mineralogia da fração argila tem grande influência na retenção de P nos solos. Diversos trabalhos mostraram que minerais cristalinos possibilitam uma menor capacidade de fixação ao contrário de minerais amorfos ou mal cristalinizados (BORGGARD et al, 1990; SANYAL et al., 1993). Como exemplo, Fox e Benavides (1974) verificaram que em solos com predomínio de montmorilonita e pequenas quantidades de sesquióxidos livres o montante de P fixado é muito baixo.

Rolin Neto et al. (2004), avaliando solos do Alto do Paranaíba em Minas Gerais, observaram que a percentagem e a área superficial dos óxidos de Fe e Al, respectivamente goethita e gibsitita, têm participação no aumento da adsorção de fosfato. Tem sido constatado na literatura que a goethita, pelos seus teores, e principalmente, pela sua área específica mais elevada, assume papel preponderante na adsorção, devido à presença de maior número de grupamentos OH, aumentando as reações da superfície desse mineral com o P (PARFITT, 1989; BARROW, 1990; TORRENT et al. 1992).

Outro fator envolvido na capacidade de fixação segundo Morel et al. (1989) e Lyndsay e Moreno (1960) é a presença de cátions. Estes autores encontraram correlação significativa entre a quantidade de P fixado e de cátions trocáveis como cálcio, ferro trivalente, alumínio e magnésio.

Além disso, complexos de matéria orgânica-Al e óxidos amorfos de Fe tiveram correlação positiva com a capacidade de adsorção de fosfatos (SOON, 1991). O papel desempenhado pela matéria orgânica é ambivalente, já que ela pode tanto adsorver o fósforo como também bloquear os sítios de adsorção que ocorrem nas superfícies das argilas e dos óxidos de Fe e Al (SANYAL; DE DATTA, 1991).

Para quantificar a magnitude dos sistemas de retenção de fósforo pode-se utilizar isotermas de adsorção, que por sua vez, descrevem convenientemente a adsorção de solutos à superfície de sólidos, mostrando a quantidade de adsorvato sorvido em função de uma concentração de equilíbrio (BOHN et al., 1985).

Inúmeros trabalhos avaliam a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) nos solos por meio do método da Isoterma de Langmuir e, alguns estudos correlacionam a adsorção máxima de P com a quantidade de adubo fosfatado que deve ser adicionada ao solo para um ótimo desenvolvimento das culturas (HOLANDA; MEDEIROS, 1984; BERTON; PRATT, 1997).

Segundo Woodruff e Kamprath (1965), o valor da CMAP de solos tem sido usado como uma estimativa da quantidade desse nutriente requerida pelos solos para condicionar o crescimento máximo das plantas.

A quantidade fixada na concentração padrão varia de 0 a 2.800 mg L⁻¹ de P, que implica na necessidade de 0 a 5.600 kg ha⁻¹ de P para possibilitar um crescimento adequado às plantas. Solos que requerem concentração de no mínimo 150 mg L⁻¹ P para suprir 0,2 mg L⁻¹ P na solução apresentam elevada fixação de P (SANCHEZ; UEHARA 1980).

2.3 Fertilizantes fosfatados

As principais fontes de fósforo podem ser divididas em: (i) fosfatos naturais (rocha fosfática moída; reatividade/eficiência agronômica variável dependendo de fatores ligados a mineralogia da rocha); (ii) termofosfatos (processo térmico; consumo de elevada quantidade de energia), (iii) fosfatos totalmente acidulados (acidulação total) e (IV) fosfatos alternativos (parcialmente acidulados, compactados, entre outros) (PROCHNOW, 2003).

Outra classificação importante dos fertilizantes fosfatados é quanto a sua solubilidade em água ou extratores que visam avaliar a biodisponibilidade do P, sendo normalmente utilizado o ácido cítrico a 2 % (AC 2 %) e o citrato neutro de amônio + água (CNA + H₂O) (BRASIL, 1982).

Os fosfatos naturais e os termofosfatos possuem baixa solubilidade em água, enquanto os totalmente acidulados devem conter elevada solubilidade em água. Como exemplo tem-se que o superfosfato simples (SFS), que é um fosfato totalmente acidulado, deve apresentar 18 % de P_2O_5 solúvel em CNA + H_2O e 15 % de P_2O_5 solúvel em água, ou seja, aproximadamente 90 % do P_2O_5 solúvel em CNA + H_2O deve ser solúvel em H_2O (RAIJ, 1991).

Os fosfatos naturais são concentrados apatíticos obtidos a partir de minérios fosfáticos ocorrentes em jazimentos localizados, os quais podem ou não, passar por processos físicos de concentração como lavagem e/ou flotação para separá-los dos outros minerais com os quais estão misturados na jazida (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

As reservas totais de rocha fosfática no Brasil estão distribuídas principalmente nos Estados de Minas Gerais com 73,8 %, Goiás com 8,3 % e São Paulo com 7,3 %, que juntos somam 89,4 % do total existente no país, seguido dos Estados de Santa Catarina, Ceará, Pernambuco, Bahia e Paraíba, com os 10,6 % restantes (DNPM / DIRIN, 2001).

As fontes naturais de fósforo são encontradas em três tipos de depósitos quanto a presença de cátions acompanhantes: fosfatos de ferro – alumínio, fosfatos de cálcio – ferro - alumínio e fosfatos de cálcio (MCCLELLAN; GREMILLION, 1980; LEHR, 1980). Os depósitos mais abundantes, em termos globais, são os de origem ígnea e sedimentar. Os fosfatos de origem ígnea representam, aproximadamente, 17 % das reservas mundiais e cerca de 50 % das reservas brasileiras, que são encontradas nas minas de: Jacupiranga e Juquiá (SP), Catalão (GO) e Tapira e Araxá (MG). Assim, quase todo o concentrado fosfático para indústria, no Brasil, vem dos materiais de origem primária ígnea (KAMINSKI; PERUZZO, 1997; BRASIL, 2004 a).

As principais fontes dos fosfatos naturais podem ainda ser divididas em grupo das apatitas e das fosforitas. As primeiras são originárias de minerais primários de baixa solubilidade e baixo teor de fósforo assimilável (aproximadamente 3 %); já as fosforitas são minerais amorfos de origem secundária, sua solubilidade em citrato de amônio está em torno de 5 % (TISDALE et al., 1993).

As rochas fosfáticas podem ainda ser classificadas segundo a sua qualidade como: “premium-grade”, “non premium-grade” e “marginal-grade”. Embora sem especificações de mercado, os materiais “premium-grade” possuem no mínimo 31 % de P_2O_5 e apresentam uma composição química com $Ca < 29$ %, $Fe+Al < 3$ %, $Mg < 0,2$ %, carbonatos livres $< 0,2$ % e resíduos insolúveis < 10 a 15 %. Nos materiais “non premium-grade” o conteúdo de P_2O_5 é

menor que 31 % em função do aumento na concentração de impurezas. Os “marginal-grade” possuem o mesmo grau de impurezas que os “non premium-grade”, porém estas não são constituídas apenas de SiO_2 , mas também de Fe, Al, Mg, cloretos, carbonatos livres, matéria orgânica e metais interferentes variados (LEHR, 1980).

Os principais fatores que influenciam a disponibilidade de P dos fosfatos naturais são: as diferenças inerentes aos fosfatos; a variação entre as culturas na sua capacidade de utilizar o fósforo destes fertilizantes; e as propriedades do solo, como pH, capacidade de troca catiônica, teor de cálcio trocável e o P disponível (SMITH; SANCHEZ, 1982; CASANOVA, 1995).

A utilização de fosfatos naturais como fonte de fósforo para as plantas é uma prática empregada por muitos anos. No entanto, a aplicação direta de rocha fosfatada na agricultura, ainda representa um percentual muito baixo em relação aos demais fertilizantes fosfatados devido a sua baixa solubilidade. No Brasil o consumo de fosfato natural é da ordem de 38.150 toneladas contra 943.887 e 534.045 toneladas do SFS e do fosfato monoamônio (MAP), respectivamente (ANDA, 2004).

Além da possibilidade do emprego direto na agricultura da rocha fosfática, esta também constitui-se a principal matéria prima utilizada na fabricação dos fertilizantes fosfatados. Desta forma, os adubos fosfatados resultam de transformações físicas e químicas da rocha fosfática, as quais concentram os minérios em P_2O_5 , e ainda, destroem a estrutura da apatita, produzindo fertilizantes de maior solubilidade (PROCHNOW, 1996).

Dentre os métodos conhecidos para aumentar o teor de fósforo solúvel dos fosfatos naturais de pouca reatividade são o tratamento térmico e acidulação, sendo o segundo mais utilizado (TISDALE et al, 1985). O tratamento térmico consiste na exposição da rocha fosfática a elevadas temperaturas que variam de 900 a 1500°C, com ou sem aditivos, para aumentar sua solubilidade. O produto obtido é o termofosfato, que apesar de ser insolúvel em água, possui um teor de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico de aproximadamente 19 % e também elevados teores de MgO e SiO_2 (LOPEZ et al., 1982). O processo, entretanto, é caro devido ao alto consumo de energia.

Costa et al. (1997) estudaram o comportamento de 5 fontes de fósforo em 3 doses de P_2O_5 total (0, 100 e 200 kg ha⁻¹), cultivando *Brachiaria humidicola* em Latossolo Vermelho Amarelo, e observaram que o termofosfato teve a mesma eficiência agronômica quando comparado com o

superfosfato triplo (SFT), utilizado como fonte padrão, em termos de produção de matéria seca e P absorvido.

Os principais fertilizantes fosfatados com alta solubilidade em água obtidos pela acidulação de rochas fosfatadas são o SFS que contém 20 % de P_2O_5 total, grande parte totalmente solúvel em água, e o SFT com alto teor de P_2O_5 total (46 %), representando ambos 50 % dos fertilizantes fosfatados fabricados no mundo (FASSBENDER; BORNEMISZA, 1994).

Quando no processo de produção dos fertilizantes fosfatados totalmente acidulados se utilizam rochas fosfáticas ou concentrados apatíticos (produto do processo de beneficiamento de rochas que contém impurezas) de elevada qualidade, são obtidos fertilizantes formados praticamente pelos compostos de interesse da indústria, tais como $NH_4H_2PO_4$ (MAP) ou $(NH_4)_2HPO_4$ (DAP) (HATFIELD, 1964; FRAZIER et al., 1991). A utilização de fosfatos de rocha de elevada qualidade conduz, portanto, à obtenção de formas de P solúveis em água prontamente disponíveis às plantas (LEHR, 1980).

A obtenção de fertilizantes “puros” traz como consequência, produtos de elevada solubilidade em água e em CNA + H_2O . No entanto, quando são utilizados no processo de produção dos fertilizantes fosfatados totalmente acidulados, rochas ou concentrados apatíticos de baixa pureza (presença significativa de impurezas catiônicas, como Fe e Al) outros compostos podem ser formados em adição àqueles já citados (DILLARD; FRAZIER, 1983; BARTOS et al., 1992).

A exaustão de rochas fosfáticas de elevada qualidade tem ocorrido no mundo, e quantidades cada vez mais elevadas de compostos do tipo Fe-Al-P e NH_4^+ -Fe-Al-P deverão fazer parte dos fertilizantes totalmente acidulados (LEHR, 1984; MULLINS; SIKORA, 1995). Esta situação se enquadra no cenário brasileiro, onde nossas rochas fosfáticas, em geral, apresentam baixa concentração de P e alta de impurezas catiônicas, tais como Fe e Al (PROCHNOW et al., 2003).

Para garantir teores mínimos de compostos insolúveis em água nos fertilizantes fosfatados totalmente acidulados, a legislação brasileira estabeleceu níveis mínimos de P_2O_5 solúvel em água em fertilizantes (18, 41, 45 e 48 % respectivamente para o SFS, SFT, DAP e MAP), que correspondem a aproximadamente 90 % do P_2O_5 disponível (CNA + H_2O) como solúvel em água (BRASIL, 2005).

A solubilidade das fontes de P pode ser avaliada indiretamente pelos teores de P_2O_5 obtidos por extratores químicos como o ácido cítrico, ácido fórmico e CNA. Devido às características diferentes destes solventes, a quantidade de P “solúvel” dos fosfatos é variável (MCCLELLAN; GREMILLION, 1980). As avaliações laboratoriais são usadas para estimar o potencial de utilização dos fertilizantes fosfatados, porém não podem prever exatamente a eficiência agronômica destes (CHIEN; HAMMOND, 1979).

2.4 Eficiência agronômica dos fertilizantes fosfatados

Muitos trabalhos têm estudado a relação entre a eficiência agronômica de fertilizantes e a capacidade de fixação de fósforo. No entanto, poucos estudos se concentram na eficiência agronômica relativa (EAR) de fertilizantes fosfatados de baixa solubilidade em água, em comparação às fontes de elevada solubilidade, em solos com diferentes CFF.

O emprego na agricultura dos fertilizantes de baixa solubilidade em água tem sido uma alternativa para os agricultores em função do menor custo dessa fonte (BRASIL, 2004b). A utilização dos fosfatos naturais como fonte de fósforo é uma prática que vem sendo empregada em vários países, sendo que no Brasil o uso de fosfatos naturais aumentou significativamente a partir da década de 60 (GOEDERT; LOBATO, 1980). No entanto, a aplicação direta dos fosfatos naturais ainda é bastante reduzida em relação às fontes de elevada solubilidade.

Os principais fatores que influenciam na EAR dos fertilizantes fosfatados são: as propriedades dos fertilizantes, as propriedades do solo, as práticas de manejo e a espécie vegetal (CHIEN et al., 1990a; MAHIMAIRAJA et al., 1995; HEDLEY; BOLAN, 1997).

Uma das propriedades mais importante dos fertilizantes fosfatados em relação ao seu desempenho agronômico é a solubilidade. Alguns resultados experimentais indicam que fontes de P com baixa solubilidade em água foram mais eficientes que fontes de elevada solubilidade em água em solos de elevada capacidade de fixação de P (MCLEAN; BALAM, 1967; MCLEAN; LOGAN, 1970; MCLEAN; WHEELER, 1964; MCLEAN et al., 1965). No entanto resultados opostos, ou seja, fontes com elevada solubilidade em água apresentando maior EAR em solos com maior CFF, foram obtidos por Terman e Allen, (1967); Terman et al., (1964); Hammond et al., (1980).

Alguns trabalhos têm mostrado que fontes de baixa solubilidade em água, porém solúveis em CNA, podem ter a mesma eficiência que as de elevada solubilidade. Por exemplo, o multifosfato magnésiano (MFM), que é parcialmente solúvel em água mas solúvel em CNA, pode ser tão eficiente quanto o SFS para milho e soja cultivados em solos ácidos e com alta fixação de P (SINDEN, 1990). Outro caso é o fosfato natural, que mesmo com uma baixa solubilidade em CNA, pode apresentar a mesma eficiência que um fertilizante solúvel em água, dependendo da fonte do fosfato dessa rocha (CHIEN et al., 1990a).

O tamanho de partícula é uma outra característica que afeta a eficiência agrônômica (EA) dos adubos fosfatados. Para fosfatos de alta solubilidade em água, a eficiência é favorecida pela granulação, pois reduz a área superficial de contato, diminuindo assim, a retenção de fósforo pelo solo. Como os fosfatos naturais apresentam baixa solubilidade em água, quanto menor o tamanho da partícula e maior seu contato com o solo, maior será a liberação de fósforo (RAIJ, 1991).

A moagem de fosfatos naturais (partículas $< 0,044$ mm) aumentou a eficiência destes fosfatos em solos ácidos (KHASAWNEH; DOLL, 1978). Trabalhos demonstraram que o fosfato natural de Gafsa, moído até que 85 % de suas partículas ficassem menores que 0,074 mm, apresentou resultado próximo ao SFT granulado (GOEDERT; TEDESCO, 1986; BRAGA et al., 1991; REIN et al., 1994).

Horowitz e Meurer (2003) conduziram um experimento em casa de vegetação com dois cultivos consecutivos de milho, com um Latossolo Vermelho Distrófico típico, corrigido para pH 5,5, e constataram que o fosfato natural de Gafsa finamente moído ($< 0,074$ mm) apresentou o mesmo Índice de Eficiência Agrônômica (IEA) que o SFT granulado no primeiro cultivo. À medida que aumentou-se o tamanho das partículas houve uma diminuição do IEA do fosfato natural. Além disso, o IEA dos fosfatos naturais finamente moídos ($< 0,074$ mm) e do SFT granulado diminuiu do primeiro para o segundo cultivo, já para os fosfatos naturais com tamanho superior a 0,149 mm observou-se o contrário. Segundo Chien e Friesen (1992), isto ocorreu devido a reações de adsorção do fósforo no solo, em função da maior área de contato das partículas finamente moídas com a fração quimicamente ativa do solo no caso do fosfato natural e, para o SFT a redução na EA foi devida a elevada solubilidade em água.

Logo, a eficiência do P aplicado varia de acordo com os tipos de fertilizantes fosfatados (ERNANI; BARBER, 1991), o método de aplicação (ANGHINONI, 1992) e com a quantidade aplicada (ERNANI et al., 2000).

A forma de aplicação dos fertilizantes fosfatados é distinta entre os fosfatos considerados solúveis e aqueles insolúveis em água (RAIJ, 1991; LOPES; GUIMARÃES, 1992). Sabe-se que logo após a aplicação de uma fonte solúvel, o P pode ser rapidamente adsorvido pelo solo ou transformado em compostos de menor solubilidade através de reações de precipitação e adsorção específica. A intensidade dessas reações é diretamente proporcional ao volume de solo, com qual o adubo reage, e ao nível de P (GOEDERT; SOUZA, 1984).

Em algumas situações o método de aplicação dos fertilizantes fosfatados, na superfície ou incorporado ao solo, não tem alterado a absorção de P e o rendimento das culturas (MUZILLI, 1983; KLEPKER; ANGHINONI, 1995). A boa eficiência do P aplicado sobre a superfície, provavelmente está relacionada com o maior incremento na concentração de P na solução do solo nessa região, em consequência do aumento na porcentagem de saturação dos sítios de adsorção, resultante da redução do contato do fertilizante com o solo (ZHANG; BARBER, 1992).

Outras características químicas do solo exercem influencia na EA das fontes de P, como os teores de fósforo e cálcio na solução. Em situações de baixas concentrações destes nutrientes, a eficiência de algumas fontes de baixa solubilidade em água, como a rocha fosfática, pode aumentar em função do favorecimento da dissolução da apatita (ROBINSON; SYERS, 1991). Em solos com baixo teor de P disponível, o grau de acidulação requerido para um fosfato de rocha parcialmente acidulado (FRPA) apresentar a mesma EA do SFT foi de 50 % de H_3PO_4 , enquanto em solos com altos níveis de P disponível, um fosfato de rocha com 30 % de acidulação aplicado para a produção de pastagem promoveu o mesmo rendimento que o SFT (RAJAN, 1996).

O teor de matéria orgânica do solo também tem efeito na EA de fertilizantes com P. Hammond et al. (1986) num estudo envolvendo dois solos, ambos classificados como Ultisols, e que apresentaram valor de pH de 4,8, teor de Ca trocável e capacidade de fixação de P semelhantes, porém com diferentes teores de matéria orgânica (4,2 e 1,8 %) verificaram que no solo com maior teor de matéria orgânica o FR apresentou maior EAR em relação ao SFT do que no solo com menor conteúdo de matéria orgânica. Esta melhor performance do FR em relação ao SFT no solo com maior teor de matéria orgânica foi atribuída a formação de um complexo entre a matéria orgânica e os íons Ca^{+2} , que poderiam aumentar a dissolução do FR (CHIEN, 1979).

A CFF do solo também exerce grande influência na EA dos fertilizantes fosfatados (CHIEN et al. 1990b; CHIEN; MENON, 1995; CASANOVA et al, 2002). Um estudo em casa de vegetação comparou a EAR de um FRPA (preparado a partir do FR de Pesca com 50 % de acidulação) em relação ao SFS no incremento da produção de milho. Observou-se o aumento da EAR do FRPA com a elevação da capacidade de fixação de P, sendo que, no solo com 27,6 % de fixação de P o FRPA foi tão eficiente quanto o SFS, e quando a capacidade de fixação passou para 40 % a EAR do FRPA foi de 110 % (CHIEN; HAMMOND, 1988).

Chien e Hammond (1989) em estudo em casa de vegetação utilizando um fosfato de rocha parcialmente acidulado (FRPA) produzido a partir do FR de Huila (Colômbia) e SFS, encontraram que a EA do FRPA em relação ao SFS medida pelo rendimento de massa seca de plantas de milho aumentou com a elevação da capacidade de fixação de P. No experimento foram utilizados seis solos com capacidade de fixação de P distintas (variando de 5,6 a 56,1 %) em que adicionou-se também um gel de ferro (Fe), com o objetivo de aumentar a retenção de P. O FRPA e o SFS apresentaram a mesma eficiência no aumento da produção de matéria seca e na absorção de P quando a capacidade de fixação de P variou de 28 a 36 %. Em solos com maior capacidade de fixação de P o FRPA foi mais eficiente que o SFS.

Chien (2001) avaliando a EA de fosfatos parcialmente acidulados (40 a 50 %) encontrou que estes fosfatos apresentaram a mesma eficiência que o SFS e o SFT em solos tropicais com elevada capacidade de fixação de P. Nuñez (1984) também observou que em solos de elevada CFF o fosfato de rocha teve uma maior EAR, em relação ao SFT, quando comparado aos solos de baixa CFF.

Este comportamento dos fertilizantes fosfatados pode ser explicado pelo fato de que o aumento na CFF diminui o P disponível tanto das fontes de elevada solubilidade água quanto das de baixa. Contudo, o decréscimo do P disponível é menor no FR do que no SFS (CHIEN; HAMMOND, 1989).

Zoysa et al. (2001) realizaram um experimento de oito meses em casa de vegetação, avaliando a EA de fertilizantes fosfatados na cultura do chá (*Camellia sinensis*), utilizando-se um Ultisol com pH em água de 4,5 e 95 % de CFF, e verificaram que o FR (originário de Eppawala) com 14,5 % de P total e 2 % solúvel em ácido cítrico, teve a mesma EAR que o SFT na dose de 10 kg ha⁻¹ de P no período referente a quinta e a décima semana do experimento. Isto indica que mesmo este FR sendo considerado não reativo, devido a solubilidade em ácido cítrico, sua taxa

de dissolução foi suficiente para suprir o requerimento de P pelas plantas de chá num solo ácido e com elevada CFF.

Como visto em determinadas condições, observou-se um aumento na EAR de fontes fosfatadas de baixa solubilidade em água com o incremento da CFF (CHIEN; HAMMOND, 1989; CHIEN, 2001; ZOYSA et al. 2001). No entanto, há trabalhos indicando que não existe um incremento da EAR com o aumento da CFF (HAMMOND et al., 1986; BUTEWGA et al., 1996).

Hammond e Leon (1983) observaram num experimento de campo que fosfatos de rocha de baixa reatividade (Pesca e Hulia, ambos originários da Colômbia) em solos de baixa CFF (Oxissolos e Utissolos) apresentaram a mesma EAR em relação ao SFS. Entretanto quando aplicados em Andossolos, solos com alta CFF, os fosfatos de rocha foram menos eficientes que a fonte de elevada solubilidade.

Hammond et al. (1986) conduziram um estudo com milho em casa de vegetação para avaliar o efeito da capacidade de retenção de P na EA do FR de Bayovar e do SFT. A capacidade de fixação de P foi ajustada com a adição de um gel de Fe, que promoveu o aumento na retenção de P no solo. No tratamento com gel de Fe houve uma significativa redução na produção de matéria seca e na absorção de P, sendo que o FR teve uma redução de eficiência mais acentuada que o SFT com o aumento da capacidade de fixação de P.

Butewga et al. (1996), em experimento com milho em dois tipos de solos (textura arenosa e média), observaram o efeito do incremento da capacidade de fixação de P na EAR de fertilizantes produzidos a partir de um FR de Sukulu Hills (CSFT: Rocha fosfática + SFT, CPAPR: Rocha fosfática com 50% de acidulação e PRC: FR) em relação ao SFT. Inicialmente foi adicionado um gel de Fe para aumentar a capacidade de fixação de P, que passou de 4,4 e 37,0 % para 14,3 e 61,5 %, respectivamente, nos solos de textura arenosa e média, sendo o pH de ambos na faixa de 6,0. Os resultados indicaram que a EAR medida por meio da produção de matéria seca e da absorção de P diminuiu com o aumento da capacidade de fixação. No solo arenoso a EAR das fontes (CPAPR, CSFT e PRC), após a adição de gel passou de 76, 103 e 7 %, respectivamente, para 69, 89 e 5%. No solo de textura média o comportamento foi semelhante, a EAR passou de 74, 89 e 0,2 % (CPAPR, CSFT e PRC), respectivamente no solo sem gel para 31, 74 e 0 % no tratamento com gel de Fe.

Hellums (1991) em estudo com milho também induziu a capacidade de fixação de P com a adição de um gel de Fe e avaliou a eficiência de fontes não convencionais de P. Os resultados

mostraram que a aplicação do gel de Fe reduziu significativamente a produção de matéria seca e absorção de P para todas as fontes. A EAR do fosfato de rocha parcialmente acidulado (produzido a partir da rocha fosfática do Togo) diminuiu com o aumento da CFF. Contudo, a EAR da mistura compactada de fosfato natural e SFT aumentou de 61 % para 103 % no solo tratado com gel de Fe.

Hammond et al. (1986) com o objetivo de explicar por que fontes de baixa solubilidade em água apresentam uma menor EAR quando comparadas às fontes de elevada solubilidade em solos com elevada CFF, sugeriram que a baixa concentração de P inicialmente liberado do FR não promove o rápido desenvolvimento da planta. Adicionalmente, o P proveniente do FR, ao entrar na solução do solo é igualmente susceptível a formação de compostos indisponíveis como qualquer fonte de P. Então, com o aumento da CFF, o P inicialmente disponível do FR pode diminuir na mesma intensidade que aquele de fontes solúveis, devido ao aumento da dissolução do FR com a elevação da CFF (SMYTH; SANCHEZ, 1982). A combinação destes dois fatores sugere a redução da probabilidade de que o P dissolvido do FR esteja na zona de sorção radicular nos estágios iniciais de desenvolvimento. Uma conclusão similar foi alcançada por Syers e MacKay (1986).

Verifica-se que não há um consenso na literatura no que diz respeito ao efeito da CFF no desempenho das fontes de baixa solubilidade em água. Desta forma, nota-se a necessidade de novos estudos que possibilitem uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a eficiência agronômica dos fertilizantes fosfatados em diferentes situações quanto a capacidade de fixação de P. Assim, novas informações possibilitarão um melhor uso das fontes fosfatadas e fornecerão subsídios para um manejo adequado. Além disso, o aumento nos custos de produção dos fertilizantes de elevada solubilidade em água vem exigindo novas alternativas para a utilização das fontes de P. Logo, os fertilizantes de baixa solubilidade, devido ao baixo custo, podem ser uma prática economicamente e agronomicamente mais atrativa para certos agricultores.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do solo utilizado no experimento em casa de vegetação

O solo utilizado neste experimento foi coletado no município de Piracicaba, sendo classificado como Latossolo Amarelo (LA). As amostras de solo foram coletadas à profundidade de 0-0,2 m e passadas em peneira de 4 mm de abertura de malha, para em seguida serem secas ao ar. Foram retiradas subamostras, passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura, homogeneizadas e depositadas em vasos com capacidade para 2,5 kg de terra.

A caracterização química das amostras de solo (Tabela 1) foi realizada utilizando os procedimentos analíticos descritos por Raij et al. (2001). O pH do solo foi determinado em solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} na relação de 1 : 2,5. O fósforo, potássio, cálcio e magnésio foram extraídos com a resina trocadora de íons, sendo que a quantificação do P e K foi realizada por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente. A determinação do Ca e Mg foi realizada por espectrometria de absorção atômica. A extração dos teores de enxofre foi efetuada com a solução de fosfato de cálcio, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$ 0,01 mol L^{-1} e a quantificação foi por turbidimetria. Os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn foram determinados através de extração pela solução de DTPA e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica em chama. A extração do B foi realizada por água quente usando aquecimento em microondas (B) e a quantificação pelo método colorimétrico. A extração do teor de carbono orgânico foi efetuada pelo dicromato de sódio e a determinação pelo método colorimétrico.

Tabela 1 - Características químicas do solo utilizado no experimento

pH	M.O.	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	m	B	Cu	Fe	Mn	Zn
CaCl_2	g dm^{-3}	mg dm^{-3}					mmolc dm^{-3}				—%—			mg dm^{-3}			
4,6	24	4	9	1	11	5	3	31	17	48	36	15	1	1,4	37	9,1	2,1

A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1997; Camargo et al., 1986), os resultados sendo: 220, 40 e 740 g kg^{-1} de argila, silte e areia, respectivamente. A classificação textural foi realizada de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, obtendo-se uma classe de textura média-arenosa.

3.2 Caracterização das fontes de fósforo

O principal critério adotado para a escolha das fontes de P foi a solubilidade em água. Dessa forma, as fontes testadas nos experimentos foram: (i) fosfato monocálcio p.a. – $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$ - (FMC), o qual foi utilizado como fonte padrão de P, (ii) superfosfato simples com baixa solubilidade em água (“low-grade SSP”², LG SSP), (iii) multifosfato magnésiano (MFM), (v) termofosfato (TERMO) e (vi) fosfato natural de Arad com elevada reatividade (FN).

A avaliação dos teores de P_2O_5 totais e solúveis em água, em CNA + H_2O e em AC 2 % foi realizada seguindo-se a metodologia oficial do Ministério da Agricultura (Brasil, 1983), e estão apresentadas na Tabela 2. A partir dos valores de P solúvel em CNA + H_2O e P solúvel em H_2O calculou-se o percentual de P_2O_5 solúvel em água em relação ao P disponível na fração solúvel em CNA + H_2O (Fi).

Tabela 2 - Teores de P_2O_5 total, solúvel em H_2O , solúvel em CNA + H_2O , solúvel em ácido cítrico a 2 % e porcentagem da fração solúvel em H_2O na fração solúvel em CNA + H_2O (Fi) das fontes de P utilizadas no experimento

Fonte de P ¹	Teor de P_2O_5				Fi ²
	Total	H_2O	CNA + H_2O	Ac. Cítrico	
			%		
FMC	57,7	56,1	57,1	57,5	98
LG SSP	18,6	9,7	17,2	12,2	59
MFM	18,8	3,7	17,4	15,3	21
TERMO	16,5	0,2	6,0	15,9	4
FN	31,1	1,1	5,2	10,9	22

¹ FMC: fosfato monocalcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; Termo: termofosfato; FN: fosfato natural.

² $(\text{P}_2\text{O}_5 \text{ solúvel em água} / \text{P}_2\text{O}_5 \text{ solúvel em citrato neutro de amônio} + \text{água}) \times 100$

² “Low-grade SSP”: fertilizante fosfatado produzido a partir da acidulação total de concentrado apatítico com elevadas quantidades de Fe e Al; fertilizante final apresentando aproximadamente 45 % de P solúvel em água na fração solúvel em CNA + H_2O ; para maiores detalhes sobre este fertilizante consultar Prochnow et al. (2003), no qual LG SSP = SSP 3.

3.3 Preparo do gel de ferro

A aplicação do gel de ferro (Fe) teve como objetivo promover uma variação na capacidade de fixação de fósforo do solo sem afetar outras propriedades do solo que também poderiam influenciar a EAR dos fertilizantes fosfatados.

O gel de Fe foi preparado a partir de soluções de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 2 mol L^{-1} e KOH 6 mol L^{-1} , seguindo os seguintes procedimentos: (i) adição de KOH na solução de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ até obtenção de pH 7, (ii) filtração através de papel de filtro # 1 (faixa branca) para remover o excesso de KNO_3 , (iii) lavagem do gel de Fe retido no papel de filtro com água até a remoção de praticamente todo o K, e (iv) armazenamento em solução aquosa.

A descrição detalhada desta metodologia pode ser encontrada em Hammond et al., 1986. A quantidade de solução de gel de Fe preparada seguiu a seguinte proporção: 1 L para cada 3 kg de terra (CHIEN; HAMMOND, comunicação pessoal³), a qual se baseia em experimentos anteriores realizados pelos autores.

Foi projetado um sistema que tivesse capacidade para produzir 2 L de gel por vez, pois a quantidade de gel necessária para a montagem do experimento era elevada. Para isso utilizaram-se 4 funis de porcelana com 18 cm de diâmetro e 4 kitsatus, cada um com capacidade para preparar 0,5 L de gel (Figura 1). O modelo de bomba utilizado no trabalho apresenta a seguinte descrição: Marca- Edwards, Bomba de alto vácuo, 2 estágios, motor de indução monofásico, 1720 rpm e 60 hz..

Na Figura 2 observa-se o gel de Fe pronto para ser adicionado ao solo.

³ Pesquisadores do “International Center for Soil Fertility and Agricultural Development” (IFDC), P.O. Box 2040, 35662, Muscle Shoals, AL, EUA.

Figura 1 - Sistema para filtragem do gel de Fe

Figura 2 - Foto do gel de Fe armazenado em solução aquosa

3.4 Avaliação da capacidade de adsorção de fósforo

A curva de adsorção de P foi determinada de acordo com o método descrito por Olsen e Watanabe (1957), que consiste na agitação de 2,0 g de terra com 100 mL de soluções com CaCl_2 $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e concentrações diferenciadas de P, na forma de KH_2PO_4 . Desta forma, as concentrações de P adicionadas foram: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 80 mg L^{-1} de P e cada tratamento apresentou três repetições. As amostras foram agitadas por 15 minutos e depois filtradas. No extrato do filtrado, o P foi determinado pelo método colorimétrico baseado no emprego da solução sulfo-molibdica e do ácido ascórbico.

O cálculo de fósforo adsorvido, nos solos estudados (misturado ou não com gel de Fe), foi obtido pela diferença entre as quantidades de P aplicadas e as quantidades que ficaram em equilíbrio. Os dados calculados foram ajustados a isoterma de Langmuir, para obter o valor da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP) e da energia de ligação entre a superfície adsorvente e o adsorvato.

3.5 Experimentos

Foram conduzidos dois experimentos, para avaliar, respectivamente, a liberação de P e a EAR das fontes. Ambos experimentos foram conduzidos em casa de vegetação do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP.

3.5.1 Experimento 1: Liberação de P pelas fontes

Este estudo teve como objetivo principal avaliar e comparar a liberação de P das fontes em diferentes situações de acidez e fixação de P. Além disso, um maior número de dados possibilitou uma melhor compreensão e avaliação dos resultados a serem obtidos nos demais estudos. Por não se utilizar planta, um número maior de variáveis pôde ser incluído neste estudo.

Utilizou-se o solo de baixa CFF acrescido ou não de gel de Fe. Amostras de 150 gramas de terra foram acondicionadas em potes plásticos com capacidade de 200 g, após passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura.

Os tratamentos envolveram cinco fontes de P (FMC, utilizado como fonte padrão de P; “low-grade SSP” - LG SSP; multifosfato magnésiano – MFM; termofosfato – TERMO; fosfato natural de Arad – FN), seis doses (0; 12,5; 25; 50; 100 e 200 mg kg⁻¹ P), duas condições de solo quanto a capacidade de fixação de P (sem e com aplicação de gel de Fe) e dois níveis de acidez, que foram apresentados no trabalho pela condição sem e com aplicação de calcário, com valores de pH em CaCl₂ de 4,6 e 5,6, respectivamente. O número total de tratamentos foi, portanto, de 120 (5 fontes x 6 doses x 2 condições de solo x 2 níveis de acidez). O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições, totalizando assim, 360 unidades experimentais. A Tabela 3 apresenta a definição dos tratamentos envolvidos.

Nos tratamentos que receberam aplicação de calcário, foi utilizado um calcário dolomítico (PRNT = 90,7; CaO = 33,0 % ; MgO = 17,7 % ; RE = 87,9 %; PN = 103,1 %), cuja quantidade foi calculada para atingir 70 % da saturação por bases (RAIJ; QUAGGIO, 1983). Após a adição de calcário as unidades experimentais foram incubadas por 30 dias (período suficiente para elevar o pH CaCl₂ a 5,6), em temperatura ambiente, com umidade de aproximadamente 70 % da capacidade de retenção de água.

Após este período, o gel de Fe foi aplicado nos tratamentos 53 a 104, que correspondeu a metade das unidades experimentais. Para isso, primeiramente, adicionou-se 600 mL de gel de Fe em sacos plásticos com 2 kg de terra, que foram muito bem homogeneizados. Em seguida, estas amostras de solo, já misturadas com o gel de Fe, foram colocadas em uma lona grande, onde promoveu-se uma nova homogeneização para garantir que toda a terra tenha recebido a mesma quantidade de gel, e foram deixadas por uma semana na casa de vegetação para secar. Depois de secas, as amostras foram novamente pesadas e acondicionadas nos potes plásticos.

Tabela 3 - Descrição dos tratamentos do Experimento 1

Trat.	Fonte ¹	Dose ² mg kg ⁻¹	Calagem ³	Solo ⁴	Trat.	Fonte ¹	Dose ² mg kg ⁻¹	Calagem ³	Solo ⁴
1	Testemunha	0	N	SG	53	Testemunha	0	N	CG
2		12,5	N	SG	54		12,5	N	CG
3		25	N	SG	55		25	N	CG
4	FMC	50	N	SG	56	FMC	50	N	CG
5		100	N	SG	57		100	N	CG
6		200	N	SG	58		200	N	CG
7		12,5	N	SG	59		12,5	N	CG
8		25	N	SG	60		25	N	CG
9	LG SSP	50	N	SG	61	LG SSP	50	N	CG
10		100	N	SG	62		100	N	CG
11		200	N	SG	63		200	N	CG
12		12,5	N	SG	64		12,5	N	CG
13		25	N	SG	65		25	N	CG
14	MFM	50	N	SG	66	MFM	50	N	CG
15		100	N	SG	67		100	N	CG
16		200	N	SG	68		200	N	CG
17		12,5	N	SG	69		12,5	N	CG
18		25	N	SG	70		25	N	CG
19	TERMO	50	N	SG	71	TERMO	50	N	CG
20		100	N	SG	72		100	N	CG
21		200	N	SG	73		200	N	CG
22		12,5	N	SG	74		12,5	N	CG
23		25	N	SG	75		25	N	CG
24	FN	50	N	SG	76	FN	50	N	CG
25		100	N	SG	77		100	N	CG
26		200	N	SG	78		200	N	CG
27	Testemunha	0	S	SG	79	Testemunha	0	S	CG
28		12,5	S	SG	80		12,5	S	CG
29		25	S	SG	81		25	S	CG
30	FMC	50	S	SG	82	FMC	50	S	CG
31		100	S	SG	83		100	S	CG
32		200	S	SG	84		200	S	CG
33		12,5	S	SG	85		12,5	S	CG
34		25	S	SG	86		25	S	CG
35	LG SSP	50	S	SG	87	LG SSP	50	S	CG
36		100	S	SG	88		100	S	CG
37		200	S	SG	89		200	S	CG
38		12,5	S	SG	90		12,5	S	CG
39		25	S	SG	91		25	S	CG
40	MFM	50	S	SG	92	MFM	50	S	CG
41		100	S	SG	93		100	S	CG
42		200	S	SG	94		200	S	CG
43		12,5	S	SG	95		12,5	S	CG
44		25	S	SG	96		25	S	CG
45	TERMO	50	S	SG	97	TERMO	50	S	CG
46		100	S	SG	98		100	S	CG
47		200	S	SG	99		200	S	CG
48		12,5	S	SG	100		12,5	S	CG
49		25	S	SG	101		25	S	CG
50	FN	50	S	SG	102	FN	50	S	CG
51		100	S	SG	103		100	S	CG
52		200	S	SG	104		200	S	CG

¹ Fonte de P: FMC = fosfato monocalcico p.a. (fonte padrão de P), LG SSP = low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água, MFM = multifosfato magnesiano, TERMO = termofosfato, FN = fosfato natural.

² Testemunha incluída como dose de P para todas as fontes.

³ Calagem: N – Solo não corrigido pela calagem; S: Solo corrigido pela calagem.

⁴ Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

As fontes de P foram misturadas com a terra de acordo com os tratamentos da Tabela 3, em doses correspondentes a 0; 12,5; 25; 50; 100 e 200 mg kg⁻¹ P nos potes plásticos. A adubação básica, realizada para promover a mesma condição que o experimento em casa de vegetação com plantas, consistiu na aplicação de 200 mg kg⁻¹ de N (na forma de uréia) e 200 mg kg⁻¹ de K (KCl) em mistura com o volume total de terra no pote plástico. Adicionou-se uma solução contendo: 10 mg kg⁻¹ de Fe (sulfato ferroso amoniacal), 10 mg kg⁻¹ de Mn (sulfato de manganês monohidratado), 10 mg kg⁻¹ de Zn (óxido de zinco), 5 mg kg⁻¹ de B (ácido bórico), 5 mg kg⁻¹ de Cu (sulfato de cobre pentahidratado) e 1 mg kg⁻¹ de Mo (molibdato de amônio). A homogeneização das amostras correspondentes a cada tratamento foi feita por agitação manual em sacos plásticos, retornando as amostras para os potes plásticos. A umidade nos potes foi mantida a 60 % da capacidade de campo.

Amostras de terra foram coletadas, secas e submetidas à determinação do teor de fósforo no solo aos 30 dias após a montagem do experimento.

O parâmetro avaliado foi o teor de fósforo no solo. Utilizou-se a metodologia da resina trocadora de íons (P-resina; Raij et al, 2001) saturada com bicarbonato de sódio (NaHCO₃ 1 mol L⁻¹ a pH 8,8), empregando-se uma mistura de volumes iguais de resinas Amberlite IRA-400 (base forte) e Amberlite IRA-120, previamente passadas em peneira com abertura de 0,5 mm. Para extração foram transferidos 2,5 cm³ de terra para frasco plástico de 80 mL, provido de tampa, acrescentando-se 25 mL de água destilada e agitando-se por 15 minutos. Em seguida, adicionou-se 2,5 cm³ de resina regenerada, agitando-se por 16 horas em agitador rotativo horizontal. Após esse período a resina foi lavada com água para retirar a terra. Para a extração do fósforo contido na resina, foram utilizados 50 mL de solução NH₄Cl 0,8 N + HCl 0,2 N, deixando-se em repouso por 30 minutos para eliminar o gás carbônico e agitando-se em seguida por uma hora. O extrato foi usado para a quantificação dos teores de P, por meio do método colorimétrico.

3.5.2 Experimento 2: Eficiência agronômica relativa das fontes de P

Cultivo 1

Este estudo foi conduzido no período de 11 de março a 13 de abril de 2005, utilizando o LA (solo de baixa CFF) acrescido ou não de gel de Fe (CG e SG, respectivamente) que

propiciou a obtenção de amostras de solos semelhantes, porém com diferenças marcantes em termos de CFF. Amostras de 2,5 kg de terra foram acondicionadas em vasos plásticos com capacidade de 3,0 kg de terra.

Para corrigir a acidez das amostras seguiu-se os mesmos procedimentos adotados no Experimento 1. Após o período de incubação, o gel de Fe foi aplicado nas amostras de terra de acordo com os respectivos tratamentos (Tabela 4). As etapas realizadas para a mistura do gel com as respectivas amostras foram as mesmas descritas no Experimento 1. Depois de secas, as amostras foram novamente pesadas e acondicionadas nos vasos.

Completado esta etapa, realizou-se a aplicação das fontes de fósforo na forma de pó finamente moído na dose única de 25 mg kg^{-1} de P, com base no teor total. A adubação básica foi semelhante ao experimento anterior.

O experimento seguiu o esquema $[(2 \times 5) + 2]$, ou seja, duas condições de solo, cinco fontes de P e dois tratamentos adicionais representadas pela não aplicação de P em cada condição de fixação de P. Dessa forma, o experimento foi formado por 12 tratamentos. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com três repetições, totalizando 36 unidades experimentais.

Seis sementes de milho (*Zea mays*), Híbrido S2450, foram semeadas por vaso de 2,5 kg de terra na profundidade de 1 cm e desbastadas para duas por vaso dez dias após a emergência. A terra nos vasos foi umedecida com água destilada a 60 % da capacidade de campo e assim mantida durante o experimento. As plantas foram colhidas aos 30 dias após a emergência, secas a 60°C e pesadas.

Tabela 4 - Tratamentos propostos para o experimento de avaliação da eficiência agronômica de fontes de P com solubilidade variável em água em solo com baixa capacidade de fixação de P, acrescido ou não de gel de Fe

Tratamento	Cultura	Solo ¹	Fontes de P ²
1	Milho	SG	Testemunha
2	Milho	SG	FMC
3	Milho	SG	LG SSP
4	Milho	SG	MFM
5	Milho	SG	TERMO
6	Milho	SG	FN
7	Milho	CG	Testemunha
8	Milho	CG	FMC
9	Milho	CG	LG SSP
10	Milho	CG	MFM
11	Milho	CG	TERMO
12	Milho	CG	FN

¹ Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

² Fonte de P: FMC = fosfato monocálcico p.a. (fonte padrão de P), LG SSP = low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água, MFM = multifosfato magnésiano, TERMO = termofosfato, FN = fosfato natural.

Os parâmetros avaliados foram a matéria seca produzida e o fósforo acumulado na planta. A concentração de fósforo na parte aérea das plantas foi determinada por meio de digestão nitro-perclórica de acordo com a metodologia detalhada por Malavolta et al. (1989), que consiste na digestão do material vegetal com extrato nítrico-perclórico na proporção de 10 mL de HNO₃ e de 2 mL de HClO₄, e utilizando o método colorimétrico do molibdato de amônio, para determinação do elemento. A partir da matéria seca e concentração de P foi calculada a quantidade total de fósforo acumulado pela parte aérea das plantas de milho.

Cultivo 2

A realização deste segundo estudo ocorreu pelo fato de que no primeiro cultivo as plantas foram afetadas por condições de alta temperatura (no período de 24 a 27 de março) que

prejudicaram seu desenvolvimento e não permitiram que o ciclo atingisse os 45 dias após a emergência, como era previsto.

Após a colheita do cultivo 1 as amostras de terra foram deixadas em repouso por aproximadamente 20 dias, sendo posteriormente retiradas dos vasos, revolvidas, adubadas com N, K, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, e com as fontes de P (idem cultivo 1). Este experimento foi realizado no período de 4 de maio a 18 de junho de 2005 e contou com os mesmos fatores utilizados no cultivo 1.

Seis sementes de milho (*Zea mays*), cultivar 30R75, foram semeadas por vaso de 2,5 kg de terra, e desbastadas para duas por vaso. As plantas foram colhidas com 45 dias após a emergência (diferentemente do primeiro cultivo). Os demais procedimentos utilizados na instalação, condução e obtenção dos resultados foram os mesmos utilizados no cultivo 1.

3.6 Análise dos dados

Experimento 1

A análise de variância dos dados referentes a variável dependente obtida (teor de fósforo no solo) foram realizadas utilizando o pacote estatístico SAS (SAS, 1985) de acordo com o quadro de análise de variância apresentado na Tabela 5. A análise permitiu verificar a significância de cada fator isoladamente e a interação entre eles.

Ajustaram-se equações de regressão lineares (modelo quadrático) cuja variável dependente foi o teor de P no solo e a variável independente as doses de P aplicadas, para cada fonte de P em cada condição de solo (sem e com adição de gel de Fe) e de calagem (sem e com calcário). As equações ajustadas foram comparadas pelo teste de identidade de modelo para verificar a hipótese nulidade de que as equações são estatisticamente iguais. Dessa forma, equações de regressão são diferentes quando apresentarem interceptos distintos ou um ou mais coeficientes de regressão estatisticamente diferentes.

Tabela 5 - Quadro da análise de variância do Experimento 1

Causas de Variação	Graus de liberdade
Blocos	2
Condição de solo (S)	1
Fonte de P (FP)	4
Doses de P (DP)	5
Nível de acidez (A)	1
S x FP	4
S x DP	5
S x A	1
FP x DP	20
FP x A	4
DP x A	4
S x FP x DP	20
S x FP x A	4
S x DP x A	5
FP x DP x A	20
S x FP x DP x A	20
Resíduo	238
Total	359

Assim, o teste de identidade de modelo baseia-se na diferença entre a soma dos quadrados de parâmetros do modelo completo e a soma dos quadrados de parâmetros do modelo reduzido (REGAZZI; LEITE, 1992). Inicialmente, fez-se o teste para todas as situações de fontes, condição do solo e condição de acidez, ajustando-se equações relacionando o teor de P no solo e a dose de P aplicada. Para o teste de identidade de modelo utilizaram-se os softwares Statistica for Windows versão 6.0 e o Microsoft Excel.

O Índice de Eficiência Relativa (IER) das fontes levando em consideração os tratamentos sem e com gel de Fe (SG e CG) e sem e com calagem (SG e CC) foi obtido calculando-se a área abaixo da curva para cada equação de regressão ajustada por meio do Software Sigma Plot 8.0. O valor da área abaixo da curva foi obtido integrando-se (no intervalo de zero a 200) a equação de regressão ajustadas. Dessa forma, considerando um modelo quadrático hipotético ($y = a + bx + cx^2$), a integração foi realizada da seguinte forma:

$$\int_0^{200} (a + bx + cx^2) dx \Rightarrow ax + \frac{b}{2}x^2 + \frac{c}{3}x^3$$

Aplicando – se as propriedades de limites na equação acima, têm - se :

$$\lim_{0 \rightarrow 200} \left(ax + \frac{b}{2}x^2 + \frac{c}{3}x^3 \right) = \left(a \cdot 200 + \frac{b}{2}200^2 + \frac{c}{3}200^3 \right) - \left(a \cdot 0 + \frac{b}{2}0^2 + \frac{c}{3}0^3 \right)$$

portanto :

$$\int_0^{200} (a + bx + cx^2) dx = \left(a \cdot 200 + \frac{b}{2}200^2 + \frac{c}{3}200^3 \right)$$

Experimento 2

As informações referentes às duas variáveis dependentes obtidas, ou seja, produção de matéria seca e P acumulado pelas plantas, foram analisadas utilizando o programa SAS (SAS, 1985). De acordo com o quadro de análise de variância mostrado na Tabela 6, foi possível verificar o efeito do solo ou das fontes isoladamente, bem como a interação entre os fatores. No caso de obtenção de interação significativa a análise dos dados permitiu avaliar: o efeito do solo para cada fonte e o efeito das fontes para cada solo.

A comparação da eficiência das fontes levando em consideração a CFF do solo foi feita empregando-se o conceito de eficiência agrônômica relativa (EAR), que foi calculada da seguinte forma: eq. (1).

$$EAR_i = \frac{Y_i}{Y_p} * 100 \quad (1)$$

onde EAR_i é a eficiência agrônômica relativa da fonte i e Y_i e Y_p corresponde a produção de matéria seca ou P acumulado pela fonte i e pela fonte padrão (FMC), respectivamente.

A comparação destas razões permitiu ranquear as fontes de P em relação ao padrão em termos de eficiência potencial para produzir resposta (CHIEN et al., 1990a). Tal procedimento permite ainda a comparação da eficiência de uma mesma fonte em relação ao padrão em solos distintos, o que é fundamental para o teste da hipótese central do trabalho. Como exemplo têm-

se que uma fonte i poderá apresentar $EAR = 50\%$ no solo SG e $EAR = 75\%$ no solo CG. Estes resultados indicariam que a fonte i é mais eficiente em relação a fonte padrão de P em solo de CFF mais elevada.

Tabela 6 - Análise da variância

Causas de Variação	Graus de liberdade
Blocos	2
Condição de solo (S)	1
Fonte de P (FP)	5
S x FP	5
Resíduo	22
Total	35

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Capacidade de adsorção de fósforo dos solos

No Apêndice A constam os dados originais obtidos no ensaio de adsorção de fósforo, para os solos sem e com aplicação de gel de Fe.

Os valores de adsorção máxima (CMAP), da constante relacionada com a energia de adsorção (K) e as equações de regressão linear de Langmuir estão apresentados na Tabela 7. Os valores de CMAP e K indicam que há diferenças entre os solos estudados. Com a adição do gel de Fe observa-se o aumento de aproximadamente 100 % no valor da CMAP e de aproximadamente 13 vezes no valor da energia de ligação, indicando que o acréscimo do gel foi capaz de aumentar de forma eficiente os dois parâmetros da isoterma de Langmuir relacionados a fixação de P.

Tabela 7 - Valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), de energia de ligação e das equações de Langmuir na forma linearizada com os respectivos valores dos coeficientes de determinação (R^2) para o solo nas condições sem e com adição de gel de Fe

Solo ¹	CMAP	Energia de Ligação (K)	Equação na forma linearizada ²
	mg g ⁻¹	L g ⁻¹	
SG	591,3	0,0067	$Y = 0,251 + 0,0016X$; $R^2 = 0,74$
CG	1189,6	0,0887	$Y = 0,009 + 0,0008X$; $R^2 = 0,97$

¹ Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

² $Y = C/x/m$, em (mg L⁻¹)/(mg g⁻¹) = (g L⁻¹); $X = C$ (concentração de equilíbrio), em mg L⁻¹ de P em solução.

As isotermas de adsorção (Figura 3) demonstram que as quantidades de fosfato adsorvidas pelos solos aumentaram com a concentração da solução de equilíbrio, inicialmente de modo mais intenso e tendendo a adquirir um valor constante em altas concentrações. As isotermas também permitem observar as diferenças entre os solos em relação a fixação de P, mais uma vez evidenciando que a indução na capacidade de fixação de fósforo pela adição do gel de Fe foi bem sucedida.

Figura 3 - Representação gráfica das Isotermas de Langmuir ajustadas respectivamente para o solo sem e com adição de gel de Fe

4.2 Experimento 1: Liberação de P pelas fontes

A análise de variância para os fatores estudados (condição de solo, fonte de P, doses de P e condição de acidez) evidenciou efeito significativo ao nível de 95 % de probabilidade para todos os fatores isoladamente, e ainda para todas as interações possíveis (Tabela 8). Como normalmente indicado para casos assim, a interpretação dos dados foi realizada priorizando a interação dos quatro fatores e ainda tendo em vista o interesse maior do trabalho, que é de avaliar o efeito da condição do solo quanto à CFF na eficiência relativa das fontes.

Tabela 8 - Valores de F para a análise de variância dos dados de P extraído (mg dm^{-3}) pelo método da resina em função do solo, nível de acidez, fonte, dose de fósforo no experimento 1

Causas de Variação	Graus de liberdade	Valor de F
Blocos	2	2,85 ^{ns}
Condição de solo (S)	1	1792,91 [*]
Fonte de P (FP)	4	1171,29 [*]
Doses de P (DP)	5	4046,19 [*]
Nível de acidez (A)	1	66,31 [*]
S x FP	4	261,19 [*]
S x DP	5	328,66 [*]
S x A	1	54,91 [*]
FP x DP	16	385,18 [*]
FP x A	4	14,09 [*]
DP x A	4	35,58 [*]
S x FP x DP	20	66,38 [*]
S x FP x A	4	31,94 [*]
S x DP x A	5	11,40 [*]
FP x DP x A	20	5,16 [*]
S x FP x DP x A	20	8,40 [*]

^{ns}; ^{*} não significativo e significativo a 95 % de probabilidade pelo teste F

Dessa forma, para melhor avaliar o efeito da condição de solo quanto a CFF e a acidez na liberação de P dos fertilizantes, foram ajustadas equações de regressão relacionando os teores de P por resina e as doses de P aplicadas, individualmente para cada fonte de P. Os estimadores dos parâmetros das equações ajustadas, bem como, os respectivos valores dos coeficientes de determinação (R^2) estão apresentados na Tabela 9. A representação gráfica das equações ajustadas podem ser visualizadas nas Figuras 4 a 8, em que foi avaliado o efeito da CFF e da acidez para cada fonte individualmente, e nas Figuras 9 e 10, em que foi avaliado o efeito das fontes de P dentro de cada condição de CFF e de acidez.

Tabela 9 - Equações de regressão para o teor de P (mg dm^{-3}) em função das doses e das fontes de P aplicadas em cada condição de solo quanto à acidez e à capacidade de fixação de P

Fontes de P ¹	Equação	R ²	Equação	R ²
Sem Calagem				
	Sem Gel		Com Gel	
FMC	$y = 2,84 + 0,808x + 0,0021x^2$	0,99	$y = 0,13 + 0,128x + 0,0019x^2$	0,99
LG SSP	$y = 1,45 + 0,226x + 0,0002x^2$	0,99	$y = 0,96 + 0,044x + 0,0003x^2$	0,99
MFM	$y = 2,06 + 0,221x + 0,0010x^2$	0,99	$y = 2,22 + 0,017x + 0,0008x^2$	0,98
TERMO	$y = 2,15 + 0,229x + 0,0004x^2$	0,99	$y = 2,25 - 0,043x + 0,0013x^2$	0,99
FN	$y = -2,60 + 0,738x - 0,0017x^2$	0,98	$y = -2,03 + 0,317x - 0,0006x^2$	0,94
Com Calagem				
	Sem Gel		Com Gel	
FMC	$y = 2,33 + 0,783x + 0,0024x^2$	0,99	$y = 0,05 + 0,293x + 0,0020x^2$	0,99
LG SSP	$y = 2,30 + 0,175x + 0,0005x^2$	0,99	$y = 1,46 + 0,053x + 0,0003x^2$	0,99
MFM	$y = 2,34 + 0,305x + 0,0011x^2$	0,99	$y = 0,87 + 0,076x + 0,0010x^2$	0,99
TERMO	$y = 2,59 + 0,221x + 0,0011x^2$	0,99	$y = 0,10 + 0,154x + 0,0008x^2$	0,99
FN	$y = 3,02 + 0,162x + 0,0005x^2$	0,99	$y = 0,05 + 0,207x + 0,0009x^2$	0,99

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnesiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

Exceção feita ao FN, observa-se tendência clara para aumento, sem estabilização, do teor de P em função das doses (Figuras 4 a 8). Para o FN a tendência é de estabilização a partir da dose de 100 mg kg^{-1} de P, quando o fosfato foi aplicado na condição de solo de maior acidez ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 4,6) para as duas condições de solo quanto a CFF (sem e com gel de Fe). Isto indica que a capacidade máxima de dissolução do fosfato foi provavelmente atingida próximo da dose de 100 mg kg^{-1} de P. Os dados para FN indicam ainda melhor desempenho em termos de liberação de P em condição de solo com maior acidez e sem aplicação de gel de Fe. Isto se justifica pelo fato dos fosfatos naturais apresentarem maior dissolução em solos de maior acidez, tal como indicado por Chien et al. (1980) e Ernani et al. (2001).

Para as demais fontes de P, e muito especialmente na condição de solo com maior CFF, observa-se tendência geral oposta, ou seja, de maior liberação de P na condição de pH mais elevado. Este efeito é conhecido e atribuído a menor precipitação e adsorção do P da solução

(PARFITT, 1978; ANGHINONI, 1992). Como era de se esperar os fosfatos apresentaram maiores teores de P quando as fontes foram aplicadas em solo de menor CFF.

Figura 4 - Teores de P extraído (mg dm^{-3}) em função das doses de P aplicadas na forma de fosfato monocálcico (FMC), para cada condição de solo quanto à acidez e à capacidade de fixação de P

Figura 5 - Teores de P extraído (mg dm^{-3}) em função das doses de P aplicadas na forma de low-grade SSP (LG SSP), para cada condição de solo quanto à acidez e à capacidade de fixação de P

Figura 6 - Teores de P extraído (mg dm⁻³) em função das doses de P aplicadas na forma de multifosfato magnesiano (MFM), para cada condição de solo quanto à acidez e à capacidade de fixação de P

Figura 7 - Teores de P extraído (mg dm⁻³) em função das doses de P aplicadas na forma de termofosfato (TERMO), para cada condição de solo quanto à acidez e à capacidade de fixação de P

Figura 8 - Teores de P extraído (mg dm^{-3}) em função das doses de P aplicadas na forma de fosfato natural (FN), para cada condição de solo quanto à acidez e à capacidade de fixação de P

Independentemente da condição de acidez, o aumento da CFF com a aplicação do gel de Fe, ocasionou tendência de redução nos teores de P liberados por praticamente todas as fontes, evidenciando a importância dessa propriedade na disponibilidade de P (Figuras 9 e 10). Observa-se que a indução da CFF do solo causou maior efeito negativo na liberação de P da fonte com maior solubilidade em água, no caso o FMC, concordando com os resultados obtidos por Nunez (1984). Para as fontes alternativas, as diferenças entre os teores de P obtidos na condição sem e com adição do gel de Fe foram menores. Isso se deve provavelmente, a menor liberação de P a curto prazo pelas fontes com baixa solubilidade em água em relação a fonte padrão, e também pela fixação desse P liberado (Figuras 9 e 10).

O teor de P disponibilizado por cada fonte é influenciado por dois fatores que atuam conjuntamente: i) a condição de acidez do solo que possibilita maior ou menor dissolução do fertilizante; ii) a capacidade de fixação do P, que por um lado pode aumentar a dissolução de algumas fontes de P, mas, por outro pode fixar o P liberado diminuindo assim a disponibilidade desse nutriente no solo.

Figura 9 - Teores de P extraído (mg dm^{-3}) em função das doses de P aplicadas, para as cinco fontes de P, quando se induziu a capacidade de fixação de P (Sem e Com Gel de Fe) mantendo o valor original do pH do solo (Sem Calagem)

Figura 10 - Teores de P extraído (mg dm^{-3}) em função das doses de P aplicadas, para as cinco fontes de P, quando se induziu a capacidade de fixação de P (Sem e Com Gel de Fe) aumentando também o pH do solo (Com Calagem)

Com base nas equações dos modelos de regressão ajustados, foi possível calcular a área abaixo de cada curva (Apêndice B) e, com isso, obter um índice de eficiência relativa (IER) das

fontes com base no teor de P liberado, em cada condição de solo quanto a CFF e à acidez (Tabela 10). Nota-se que a indução da CFF sem alterar o pH do solo resultou em tendência de aumento do IER das fontes. A elevação nos valores de IER dos fertilizantes de baixa solubilidade em água nos solos não calcariados e com alta CFF (Tabela 10) ocorreu devido a diminuição drástica dos teores de P com o FMC (Figura 3) que pode ser explicada pela alta fixação do P que estava na forma solúvel (BUTEGWA et al, 1996).

Por outro lado, com a elevação da CFF e do pH do solo não foi observada uma tendência clara de aumento no IER, visto que, somente duas fontes (FN e TERMO) apresentaram valores maiores de IER e as demais fontes, uma leve redução nesses índices. A explicação para esta divergência pode estar na composição química das fontes alternativas. Enquanto o LG SSP e o MFM possuem boa parte do P na forma solúvel em água (PSA), as fontes TERMO e FN, praticamente não apresentam P solúvel em água. Desta forma, sugere-se que o PSA das duas primeiras fontes foi rapidamente adsorvido no solo com elevada CFF, enquanto o P insolúvel em água destas não dissolveu a tempo de propiciar um maior teor de P-resina.

De forma geral os resultados deste estudo estão a favor da hipótese de que fosfatos alternativos contendo baixo teor de PSA apresentam EAR mais elevada em solo de maior CFF.

Tabela 10 - Índice de Eficiência Relativa dos fosfatos com base nos teores de P obtidos com a aplicação das fontes de P em cada condição de solo

Fontes de P ¹	IER			
	Sem Calagem Sem Gel	Sem Calagem Com Gel	Com Calagem Sem Gel	Com Calagem Com Gel
	%			
FMC	100	100	100	100
LG SSP	24	26	24	20
MFM	33	40	43	38
TERMO	27	41	35	45
FN	43	53	23	59

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

4.3 Experimento 2: Eficiência agrônômica relativa das fontes de P

A Tabela 11 contém os valores de F obtidos na análise de variância para as variáveis matéria seca e P acumulado nos cultivos 1 e 2. Para ambos os cultivos os fatores estudados foram estatisticamente significativos, assim como a interação entre eles (solo x fonte).

Tabela 11 - Valores de F e coeficiente de variação (C.V.) obtidos com a análise de variância dos dados de produção de matéria seca e de P acumulado na parte aérea das plantas de milho em função da condição de solo e das fontes de fósforo aplicadas nos cultivos 1 e 2

Fonte de variação	G.L.	Cultivo 1		Cultivo 2	
		Matéria Seca	P acumulado	Matéria Seca	P acumulado
Bloco	2	1,53 ^{ns}	0,79 ^{ns}	2,31 ^{ns}	0,42 ^{ns}
Solo	1	172,71 [*]	123,25 [*]	423,88 [*]	193,32 [*]
Fonte	5	96,97 [*]	49,95 [*]	223,73 [*]	102,45 [*]
Solo*Fonte	5	46,52 [*]	32,13 [*]	231,75 [*]	103,01 [*]
C.V. (%)		14,97	22,30	14,68	26,20

^{ns}; ^{*} não significativo e significativo a 95 % de probabilidade pelo teste F

Os dados de produção de matéria seca da parte aérea das plantas de milho dos cultivos 1 e 2 estão apresentados nas Tabelas 12 e 13, respectivamente. A análise das médias dos tratamentos pela “comparação dois a dois” ao nível de 95 % de probabilidade mostrou que a adição de gel de Fe teve efeito significativo na redução do rendimento de matéria seca na maioria dos tratamentos com aplicação de P. Nos solos com alta CFF, a produção de matéria seca com o FMC apresentou um decréscimo de 68 e 91 %, respectivamente para os cultivos 1 e 2, sendo essa redução explicada pela alta fixação do P que estava na forma solúvel (HELLUNS, 1991; BUTEGWA et al., 1996).

Tabela 12 - Produção de matéria seca (gramas) da parte aérea das plantas de milho em solo sem e com adição de gel de Fe. Dados médios referentes ao cultivo 1¹

Fontes de P ²	Solo ³	
	SG	CG
	g vaso ⁻¹	
Testemunha	1,73 A c	1,53 A b
FMC	8,70 A a	2,80 B a
LG SSP	3,00 A b	1,60 B b
MFM	3,54 A b	1,47 B b
TERMO	2,14 A c	1,50 A b
FN	1,74 A c	1,64 A b

¹ Valores seguidos pela mesma letra (letras maiúsculas na linha comparam a condição de solo quanto a CFF, letras minúsculas na coluna comparam as fontes de fósforo) não são estatisticamente diferentes ao nível de 95 % de probabilidade.

² FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

³ Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Tabela 13 - Produção de matéria seca (gramas) da parte aérea das plantas de milho em solo sem e com adição de gel de Fe. Dados médios referentes ao cultivo 2¹

Fontes de P ²	Solo ³	
	SG	CG
	g vaso ⁻¹	
Testemunha	0,91 A e	1,27 A a
FMC	14,09 A a	1,28 B a
LG SSP	1,85 A d	1,33 A a
MFM	2,69 A c	1,25 B a
TERMO	4,28 A b	1,49 B a
FN	1,19 A de	1,63 A a

¹ Valores seguidos pela mesma letra (letras maiúsculas na linha comparam a condição de solo quanto a CFF, letras minúsculas na coluna comparam as fontes de fósforo) não são estatisticamente diferentes ao nível de 95 % de probabilidade.

² FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

³ Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Para algumas fontes, como o FN nos cultivos 1 e 2, o TERMO no cultivo 1 e o LG SSP no cultivo 2, verificou-se que o aumento na CFF não influenciou a produção de matéria seca. Observa-se que nestes casos a produção de matéria seca foi muito baixa tanto no solo sem quanto no solo com adição de gel de Fe.

Comparando-se os tipos de fertilizantes empregados, verifica-se que o FMC proporcionou os maiores valores de produção de matéria seca quando não foi aplicado gel de Fe. Este resultado já era esperado, tendo em vista a alta solubilidade em água dessa fonte, aliado a isso, a correção da acidez provavelmente contribuiu sinergisticamente para a eficiência das fontes de maior solubilidade, pois o aumento do pH do solo reduz a fixação do P (GOEDERT et al., 1987; GOEDERT; LOBATO, 1980; KAMINSKI; PERUZO, 1997). Além disso, a alta solubilidade em água do FMC coloca rapidamente na solução do solo quantidades consideráveis de P para absorção pelas raízes das plantas (BRASIL, 1994).

Para o cultivo 1, verifica-se que com a adição de gel de Fe o FMC também apresentou a maior produção diferindo estatisticamente das demais fontes, no entanto, a magnitude dos valores de matéria seca foi extremamente inferior à observada quando não se adicionou o gel de Fe. Esses resultados concordam com os obtidos por Hammond, et al. (1986) e Butegwa et al. (1996), em que o emprego de gel de Fe na dose de 900 mL (equivalente ao utilizado no presente estudo) também resultou em baixos valores de produção de matéria seca para todas as fontes testadas.

Semelhantemente ao 1º cultivo, nota-se no cultivo 2 que a adição de gel de Fe também ocasionou a redução na produção de matéria seca, entretanto, neste cultivo não houve diferença estatística entre as fontes de P na situação com gel. Todavia, esta tendência não foi observada em outros estudos (HAMMOND, et al., 1986; CHIEN; HAMMOND, 1989; BUTEGWA et al., 1996; ERNANI et al., 2001) em que todas as fontes testadas proporcionaram resposta ao P mesmo com o aumento na CFF.

Essa diferença de resultados pode ser atribuída ao tipo de solo, que neste estudo mostrou-se tão deficiente em P, que as doses calculadas com base nos teores de P_2O_5 totais dos fertilizantes foram insuficientes para a obtenção de maiores produções do que a testemunha, devido principalmente ao aumento na CFF.

A baixa disponibilidade de P das fontes alternativas, tal como indicado na Figura 10 (teores muito baixos segundo Raij et al., 1997), serve como justificativa para as baixas

quantidades produzidas de matéria seca. Neste caso, a pequena quantidade de P liberado com a solubilização dos fertilizantes de baixa solubilidade em água pode ter sido adsorvida numa taxa maior do que a capacidade da planta em absorver o elemento (CORRÊA et al., 2005), ou seja, o dreno “solo” foi maior que o “planta” (NOVAIS; SMITH, 1999). Para o FN a correção da acidez do solo a $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ de 5,6, pode também ter diminuído a solubilização do fosfato que necessita de meio ácido para ter uma maior dissolução, contribuindo para a baixa produção de matéria seca.

Os valores observados de produção de matéria seca e consequentemente de EAR obtidos com a aplicação das fontes de baixa solubilidade em água são contraditórios com os verificados em outros trabalhos, como o caso do termofosfato que normalmente apresenta uma alta eficiência em solos muito intemperizados e com alta CFF, como os Latossolos do Cerrado, mostrando-se tão eficiente quanto as fontes de alta solubilidade em água (GOEDERT; LOBATO, 1984; GOEDERT et al., 1988; TANAKA, 1990; COSTA et al., 1997).

Outro exemplo é o multifosfato magnésiano que, semelhantemente ao termofosfato, diversos trabalhos têm evidenciado resultados satisfatórios com seu uso, mostrando valores de EAR semelhantes ao SFT e outras fontes de elevada solubilidade em água (COSTA et al., 1997; BEDIN et al., 2003), fato este que não foi observado no cultivo 1.

Provavelmente, a baixa produção de matéria seca verificada no presente estudo com a utilização do termofosfato e do multifosfato magnésiano esteja relacionada a baixa liberação de P, a curto prazo, por essas fontes (Figura 10), em que, com a aplicação de 25 mg kg^{-1} de P na condição de solo com elevada CFF obteve-se teores de P disponível de aproximadamente 3,3 e $4,5 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente para o MFM e o TERMO, sendo esses teores limitantes para o adequado desenvolvimento das plantas.

Além disso, pode-se observar claramente que o aumento da CFF do solo não afetou significativamente a produção de matéria seca das fontes de baixa solubilidade em água (Tabelas 12 e 13). Entretanto, para o FMC, a CFF influenciou negativamente a produção de matéria seca, concordando com os resultados obtidos por Nunez (1984). Todavia, Hammond et al. (1986) e Hammond e Leon (1983) verificaram que o aumento da CFF promoveu um maior efeito negativo no fosfato de rocha do que no SFT.

Os valores da EAR baseada na produção de matéria seca das plantas de milho nos cultivos 1 e 2 estão descritos nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. Observa-se que quando não

se aplicou gel de Fe, todas as fontes com baixa solubilidade em água apresentaram valores de EAR muito inferiores à fonte padrão (FMC) para os dois cultivos. No entanto, com a adição do gel de Fe houve um aumento na EAR das fontes alternativas, sendo que no cultivo 1 o FMC ainda obteve o maior valor de EAR, entretanto, no cultivo 2 a maioria dos fertilizantes fosfatados alternativos apresentaram EAR superior ao FMC.

Tabela 14 - Eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes de P, com base na produção de matéria seca pelas plantas de milho, em solo sem e com adição de gel de Fe. Dados médios referentes ao cultivo 1

Fontes de P ¹	Solo ²	
	SG	CG
	%	
FMC	100	100
LG SSP	34	57
MFM	41	52
TERMO	25	54
FN	20	58

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Tabela 15 - Eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes de P, com base produção de matéria seca pelas plantas de milho, em solo sem e com a adição de gel de Fe. Dados médios referentes ao cultivo 2

Fontes de P ²	Solo ³	
	SG	CG
	%	
FMC	100	100
LG SSP	13	104
MFM	19	97
TERMO	30	117
FN	8	127

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Verifica-se que a EAR das fontes de baixa solubilidade em água foram influenciadas pela CFF, sendo que o aumento da CFF proporciona a elevação da EAR dessas fontes (CHIEN; HAMMOND, 1988; CHIEN; HAMMOND, 1989, ZOYA et al., 2001). Isto pode ser explicado principalmente pela diminuição drástica da produção de matéria seca com o FMC (padrão de comparação), e não pelo aumento da eficiência das fontes de baixa solubilidade, como observado também por Quispe (2004).

É interessante ressaltar que, nos dois cultivos, o FN apresentou a menor EAR no solo sem adição de gel de Fe, no entanto, quando se induziu o aumento da CFF, verificou-se uma inversão de comportamento na EAR dessa fonte, que passou a ser o fertilizante fosfatado com a maior EAR. Diversos trabalhos têm relatado bons resultados com aplicação de fosfato natural reativo, que tem apresentado a mesma EAR que o SFT (KAMINSKI; PERUZZO, 1997; KORNDORFER, 1999; ERNANI et al., 2001). Entretanto, nestes estudos a elevada EAR deve-se ao melhor desempenho do FN e não à redução da eficiência da fonte de elevada solubilidade em água como ocorreu no presente trabalho.

Os dados de P acumulado estão apresentados e analisados nas Tabelas 16 e 17. De maneira geral, os resultados foram semelhantes aos verificados para a produção de matéria seca, ou seja, a indução no aumento da CFF pela adição de gel de Fe ocasionou o menor acúmulo de P na parte aérea das plantas de milho. Entretanto, algumas fontes como o FN nos dois cultivos, o TERMO no cultivo 1 e o LG SSP no cultivo 2, não apresentaram diferença significativa nos valores de P acumulado quando se alterou a CFF.

Desta forma, as tendências para P acumulado também foram similares ao parâmetro produção de matéria seca. As fontes de baixa solubilidade em água apresentaram maior EAR no solo de alta CFF (Tabelas 18 e 19), embora no cultivo 2 não tenha sido observado diferença significativa entre as fontes para os valores de P acumulado (Tabela 17). Além disso, foi observada a drástica redução nas quantidades de P acumulado no tratamento que recebeu a aplicação de FMC quando se induziu a CFF (Tabelas 16 e 17).

Tabela 16 - P acumulado na parte aérea das plantas de milho em solo sem e com adição de gel de Fe. Dados médios referentes ao cultivo 1¹

Fontes de P ²	Solo ³	
	SG	CG
	mg vaso ⁻¹	
Testemunha	1,34 A d	1,14 A b
FMC	8,45 A a	2,03 B a
LG SSP	2,40 A c	1,21 B ab
MFM	3,18 A b	1,13 B b
TERMO	1,90 A d	1,09 A b
FN	1,45 A d	1,55 A ab

¹ Valores seguidos pela mesma letra (letras maiúsculas na linha comparam a condição de solo quanto a CFF, letras minúsculas na coluna comparam as fontes de fósforo) não são estatisticamente diferentes ao nível de 95 % de probabilidade.

² FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

³ Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Tabela 17 - P acumulado na parte aérea das plantas de milho em solo sem e com adição de gel de Fe. Dados médios referentes ao cultivo 2¹

Fontes de P ²	Solo ³	
	SG	CG
	mg vaso ⁻¹	
Testemunha	0,76 A d	0,86 A a
FMC	14,91 A a	0,97 B a
LG SSP	1,43 A cd	1,01 A a
MFM	2,50 A bc	0,89 B a
TERMO	3,51 A b	1,03 B a
FN	1,04 A d	1,14 A a

¹ Valores seguidos pela mesma letra (letras maiúsculas na linha comparam a condição de solo quanto a CFF, letras minúsculas na coluna comparam as fontes de fósforo) não são estatisticamente diferentes ao nível de 95 % de probabilidade.

² FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

³ Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Tabela 18 - Eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes de P, com base no acúmulo de P na parte aérea das plantas de milho, em solo sem e com adição de gel de Fe. Dados médios referentes ao cultivo 1

Fontes de P ¹	Solo ²	
	SG	CG
	%	
FMC	100	100
LG SSP	28	59
MFM	38	56
TERMO	23	54
FN	17	76

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Tabela 19 - Eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes de P, com base no acúmulo de P na parte aérea das plantas de milho, em solo sem e com adição de gel de Fe. Dados médios referentes ao cultivo 2

Fontes de P ¹	Solo ²	
	SG	CG
	%	
FMC	100	100
LG SSP	10	105
MFM	17	92
TERMO	24	107
FN	7	118

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LG SSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Os dados obtidos neste experimento (Tabelas 14, 15, 18 e 19), muito embora com eficiência muita baixa das fontes no solo com elevada CFF, sugerem que as fontes de baixa solubilidade em água podem realmente apresentar maior EAR em condição de solo de alta CFF, devido à redução drástica na eficiência das fontes solúveis. Desta forma, fontes de baixa solubilidade em água podem vir a ser uma opção viável na agricultura para muitos países em

desenvolvimento, pois além de promoverem uma redução nos custos dos agricultores em função do seu baixo preço, em determinadas condições de solo e dose poderão ser agronomicamente eficientes.

Sugerem-se novos estudos tanto em casa de vegetação como em condições de campo que possibilitarão uma maior compreensão do assunto, podendo levar ao melhor uso das fontes de fósforo e também fornecer opções para um manejo adequado destes fertilizantes na região tropical.

5 CONCLUSÕES

De forma geral a hipótese de que fontes de menor solubilidade em água podem apresentar maior eficiência agronômica relativa em solos de elevada capacidade de fixação de fósforo foi confirmada nos dois experimentos. A hipótese mostrou-se verdadeira em todas as situações para fontes alternativas de solubilidade em água muito baixa.

REFERÊNCIAS

ALLEONI, L.R.F. **Disciplina LSN 5877**: Química de solos com carga variável. Pós-graduação em solos e nutrição de plantas. Piracicaba: ESALQ, 2003. 50 p.

ALCARDE, J.C.; GUIDOLIN, J.A., LOPES, A.S. **Os Adubos e a eficiência das adubações**. São Paulo: ANDA, 1991. 35p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. **Anuário Estatístico ANDA**. São Paulo, 2004. 2 v.

ANGHINONI, I. Uso do fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p.349-353, 1992.

BARROW, N.J. Relating chemical process to management system. In: SYMPOSIUM OF PHOSPHORUS REQUIREMENT FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE IN ASIA AND OCEANIA, 1, 1990, Manila. **Proceedings...** Manila, IRRI, 1990. p. 199-209.

BARTOS, J.M.; MULLINS, G.L.; SIKORA, F.G.; COPELAND, J.P. Water-insoluble impurity effects on phosphorus availability in monoammonium phosphate fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p.972-976, 1992.

BEDIN, I.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; FAQUIN, V.; TOKURA, A. M.; SANTOS, J. Z. L. Fertilizantes fosfatados e produção da soja em solos com diferentes capacidades tampão de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p. 639-646, 2003.

BERTON, R.S.; PRATT, P.F. Evaluation of phosphorus requirement by the sorption isotherm technique in soils amended with organic materials. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p. 199-206, 1997.

BONH, H.; McNEAL, B.; O'CONNOR, G. **Soil Chemistry**. 2nd ed. Toronto: John Willey, 1985. 341 p.

BORGGARD, O.K.; JORGENSEN, S.S.; MOBERG, J.P.; RABEN-LANGE, B. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminum and iron oxides in sandy soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, p. 443-449, 1990.

BOSCHETTI, A.N.G.; QUINTERO, G.C.E.; BENAVIDEZ, Q.R.A. Caracterização do fator capacidade de fósforo em solos de Entre Rios, Argentina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 95-99, 1998.

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

BRAR, S.P.S.; COX, F.R. Phosphorus sorption and availability indices as affected by properties of calcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 22, p. 1225-1241, 1991.

BRASIL, E.C. **Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados**. 1994. 160 p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Portaria n. 1 de abril de 1983; Portaria 03 de 12 de junho de 1986: Inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes e biofertilizantes destinados à agricultura; legislação e fiscalização. Brasília, 1982. 88p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretária nacional de defesa agropecuária **Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes: métodos oficiais**. Brasília, 1983. 104 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa nº 23 de 31/08/2005**: Inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes e biofertilizantes destinados à agricultura; legislação e fiscalização. Brasília, 2005. 127 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção mineral. **Anuário mineral brasileiro 2001**. [http: //www.dnpm.gov.br/dnpm._legis/amb2001.html](http://www.dnpm.gov.br/dnpm._legis/amb2001.html). (25 jun. 2004a)

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção mineral. **Balanço mineral brasileiro 2001**. [http: //www.dnpm.gov.br/dnpm._legis/Balanço01.pdf](http://www.dnpm.gov.br/dnpm._legis/Balanço01.pdf) (25 jun. 2004b).

BUTEGWA, C.N.; MULLINS, G.L.; CHIEN, S.H. Induced phosphorus fixation and effectiveness of phosphate fertilizers derived from Sukulu Hills phosphate rock. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 44, p. 231-240, 1996.

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)

CAMPELLO, M.R.; NOVAIS, R.F.; FERNANDEZ, R.I.E.; FONTES, M.P.F. BARROS, N.F. Avaliação da reversibilidade de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I – Trabalhos de Laboratório. **Ceres**, São Paulo, v. 18, p. 157-165, 1994.

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.

COLEMAN, N.T.; THORUP, J.T. JACKSON, W.A. Phosphate sorption reactions that involve exchangeable Al. **Soil Science**, Philadelphia, v. 90, p. 1-7, 1960.

COSTA, N.L.; PAULINO, V.T.; OLIVEIRA, J.R.C.; LEÔNIDAS, F.C.; RODRIGUES, A.N.A. Respostas de *Brachiaria humidicola* à fontes e doses de fósforo nos cerrados de Rondônia. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 34, 1997. Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: SBZ, 1997. p. 154-156.

CHIEN, S.H. Dissolution of phosphate rock in acid soils as influenced by nitrogen and potossium fertilizers. **Soil Science**, Philadelphia, v. 123, p. 117-121, 1979.

CHIEN, S.H. IFDC's evaluation of modified phosphate rocks products. In: RAJAN, S.S.S.; CHIEN, S.H. **Direct application of phosphate rock and related technology-latest developments and practical experiences**. Kuala Lumpur: Internacional Fertilizer Development Center, 2001. p. 63-77.

CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. Simple chemical method for evaluating the agronomic potential of granulated phosphate rock. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, n. 4, p. 614-617, 1979.

CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. **Agronomic evaluation of partially acidulated phosphate rocks in the tropics**. Alabama: International Fertilizer Development Center, 1988. 10 p. (Paper series, P 7).

CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. Agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rock as influenced by soil phosphorus fixing capacity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 120, p. 159-164, 1989.

CHIEN, S.H.; FRIESEN, D.K. Phosphate rock for direct application. In: SIKORA, F.J. (Ed). **Future directions for agricultural phosphorus research**. Muscle Shoals: Internacional Fertilizer Development Center, 1992. p. 47-52 (Bulletin, Y 224).

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, n. 2, p. 227-234, 1995.

CHIEN, S.H.; LEON, L.A.; TEJEDA, H.R. Dissolution of North Carolina phosphate rock in a acid Colombian soils as related to soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 1267-1271, 1980.

CHIEN, S.H.; SALE, P.W.G.; FRIESEN, D.K. A discussion of the methods for comparing the relative effectiveness of phosphate fertilizers varying in solubility. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 24, p. 149-157, 1990a.

CHIEN, S.H.; SALE, P.W.G.; HAMMOND, L.L. Comparison of the effectiveness of phosphorus fertilizer products. In: IRISI. **Phosphorus requirements for sustainable agriculture in Asia and Oceania**. Manila: International Rice Research Institute, 1990b. 478 p.

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A. do; SOUZA, S.K.S.; FREIRE, F.J.; SILVA, G.B. Gafsa rock phosphate and triple superphosphate for dry matter production and P uptake by corn. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 62, n. 2, p. 159-164, 2005.

CURI, N.; CAMARGO, O.A.; GUEDES, G.A.A.; SILVEIRA, J.V. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil Sudeste e Sul. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3, 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1988. p. 267-282.

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

DILLARD, E.F.; FRAZIER, A.E. **Precipitated impurities in monoammonium phosphate and their effect on chemical and physical properties of suspension fertilizers.** Muscle Shoals: National Fertilizer Development Center, 1983. (Bulletin, Y 183)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análise do solo.** 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

ERNANI, P.R.; BARBER, S.A. Corn growth and changes of soil and root parameters as affected by phosphate fertilizers and liming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, p. 1309-1314, 1991.

ERNANI, P.R.; STECKLING, C.; BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 939-946, 2001.

ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; CAMPOS, M.L.; CAMILLO, R.J. Influencia da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 537-544, 2000.

FALCÃO, N. P.S.; SILVA, J.R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônia**, Manaus, v. 34, n. 3, p. 337-342, 2004.

FARDEAU, J.C. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 45, p. 91-100, 1996.

FASSBENDER, H.W. Estudio de fósforo en suelos da América Central. IV. Capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. **Turrialba**, Turrialba, v. 19, n.4, p. 497-505, 1969.

FASSBENDER, H.W. Fósforo. In: _____. **Química de suelos**: com ênfases em suelos da América Latina. Turrialba: Instituto Internacional de Ciências Agrícolas, 1978. p. 262-307.

FASSBENDER, H.W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina**. 2.ed. San José: IICA, 1994. 420 p.

FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Goedertma**, Amsterdam, v 72, p. 37-51, 1996.

FOX, R.L.; BENAVIDES, S.T. **El fósforo en Oxisoles**. Suelos Ecuat, v. 6, p 137-175, 1974.

FRAZIER, A.W.; DILLARD, E.F.; THRASHER, R.D.; WAERSTAD, K.R.; HUNTER, S.R.; KOHLER, J.J.; SCHEDIB, R.M. **Crystallographic properties of fertilizer compounds**. Muscle Shoals: National Fertilizer Development Center, 1991. (Bulletin, Y-217).

FROSSARD, E.; BROSSARD, M.; HEDLEY, M.J.; METHERELL, A. Reactions controlling the cycling of P in soils. In: TIESSEN, H. (Ed.). **P cycling in terrestrial and aquatic ecosystem: a global perspective**. New York: John Wiley, 1994, chap. 7, p. 1-65.

GOEDERT, W.J.; LOBATO, E. Eficiência agronômica de fosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 3, p. 311-318, 1980.

GOEDERT, W.J.; SOUZA, D.M.G. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Brasília, 1984. **Anais...** Brasília: EMBRAPA, 1984. p. 255-289.

GOEDERT, W.J.; TEDESCO, A. Efeito de fontes, níveis de fósforo e granulometria de fosfatos naturais sobre o rendimento de grãos de colza e de soja. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, p. 53-59, 1986.

GOEDERT, W.J.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W.J. (Ed.) **Solos dos cerrados: tecnologia e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1987. p. 129-163.

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, n. 4, p. 521-30, 1988.

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. 503-519.

HAMMOND, L.L.; CHIEN, S.H.; POLO, J.R. Phosphorus availability from partial acidulation of phosphate rock. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 1, p. 37-49, 1980.

HAMMOND, L.L.; CHIEN, S.H.; EASTERWOOD, G.W. Agronomic effectiveness of Bayovar phosphate rock in soil with induced phosphorus retention. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n.3, p. 1601-1606, 1986.

HATFIELD, J.D. Normal superphosphate: chemistry. In: UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE AND TENNESSEE VALLEY AUTHORITY. **Superphosphate: its history, chemistry, and manufacture**. Washington: USDA, 1964. p. 116-130.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers. An introduction to Nutrient Management**. New Jersey, 1999. 499 p.

HEDLEY, M.J.; BOLAN, N.S. Development in some aspects of reactive phosphate rock research and use in New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 37, p. 861-884, 1997.

HEDLEY, M.J.; HUSSIN, A.; BOLAN, N.S. New approaches to phosphorus fertilization. In: SYMPOSIUM OF PHOSPHORUS REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE IN ASIA AND OCEANIA, 1, 1990, Los Banos. **Proceedings...** Manila: IRRI, 1990. p. 125-142.

HELLUMS, D.T. **Factors affecting the efficiency of nonconventional phosphorus fertilizers in lowland and upland cropping systems.** 1991. 212 p. Tese (Ph. D.) - Universidade de Alburn, Alabama, 1991.

HOLANDA, J.S. de; MEDEIROS, A.A. de. Caracterização de solos norte-rio-grandenses quanto à adsorção de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v. 19, n. 10, p. 1279-1284, 1984.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J.. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho da partícula. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 41-47, 2003.

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)

KAMPRATH, E.J. Phosphorus fixation and availability in highly weathered soils. In: FERRI, M.G. SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO; BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4, 1976, Brasília. **Anais...** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1977.

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 10, p. 159-206, 1978.

KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture.** Madison: American Society of Agronomy, 1980. 910 p.

KLEPER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 19, p. 395-401, 1995.

KORNDÖRFER, .G.H.; LARA-CABEZAS, W.A.; HOROWITZ, N. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 2, p. 391-396, 1999.

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

LEAL, J.R.; VELLOSO, A.C.X. Adsorção de fosfato em latossolos sob vegetação de cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 8, p. 91-88, 1973.

LEHR, J.R. Phosphate raw materials and fertilizers, Part I – a look ahead. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. cap 4, p. 81-120.

LEHR, J.R. Impact of phosphate rock quality on fertilizer market uses. **Industry and Mineralogy**, London, v. 200, p. 127–153, 1984.

Le MARE, P.H.; LEON, L.A. The effects of lime on adsorption and desorption of phosphate in five Colombian soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 59-69, 1989.

LINDSAY, W.L. **Chemical equilibrium in soils**. Toronto: John Willey, 1979. 449p.

LINDSAY, W.L.; MORENO, E.C. Phosphate phase equilibrium in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 24, n. 1, p. 177-183, 1960.

LOPES, A.S. **Solos sob “cerrado”**. Piracicaba: Potafos, 1984. 162p.

LOPES, A.S.; GUIMARÃES, L.R. Fertilizantes e corretivos agrícolas; sugestões de manejo para uso eficiente. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIZADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., Piracicaba, 1992. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1992. p. 39-69.

LOPEZ, A.S.; VASCONCELOS, C.A.; NOVAIS, R.F. de. Adubação fosfatada em algumas culturas nos Estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro. In: **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília: EMPRAPA, 1982. p. 176-178.

MAHIMAIRAJA, S.; BOLAN, N.S.; HEDLEY, M.J. Dissolution of phosphate rock during the composting of poultry manure: an incubation experiment. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.40, n. 2, p.93-104, 1995.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola**. São Paulo: Ceres, 1976. 528p.

MALAVOLTA, E. **Adubos e adubação fosfatada**. São Paulo: Fertilizantes Mitsui, 1985. 61 p.

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

MELLO, F.A.F. Capacidade de fixação de fosfato de alguns solos do município de Piracicaba. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 43, p. 23-27, 1968.

McLEAN, E.O.; WHEELER, R.W. 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, 1964.

McLEAN, E.O.; BALAM, B.S. Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants. III. Uptake by corn from soils of different calcium status. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 31, p. 811-814, 1967.

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, 1970.

McLEAN, E.O.; GREMILLION, L.R. Evaluation of phosphatic materials. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1980. p. 43-80.

McLEAN, E.O.; WHEELER, R.W.; WATSON, J.D. Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants. II. Growth chamber and field corn studies. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 29, p. 625-628, 1965.

MOREL, J.L.; FARDEAU, J.C.; BERUFF, M.A.; GUCKERT, A. Phosphate fixing capacity of soils: a survey using the isotopic exchange technique of soils from north-eastern France. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 19, n. 2, p. 103-111, 1989.

MULLINS, G.L.; SIKORA, F.J. Effect soil pH on the requirement for water-soluble phosphorus in triple superphosphate fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 40, p. 207-214, 1995.

MULLINS, G.L.; SIKORA, F.J.; WILLIAMS, J.C. Effect of water-soluble phosphorus on the effectiveness of triple superphosphate fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p. 256-260, 1995.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto comparado ao convencional sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 95-102, 1983.

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

NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Aspectos físico-químicos envolvidos na fixação do fósforo no solo. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 5, 1991. São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1991. p. 133-177.

NUÑES, R. **La roca fosfórica**. Cochabamba: GLIRF, 1984. v. 2. 245 p.

OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 21, p. 144-149, 1957.

OWUSU-BENNO, A.H.; ACQUAYE Phosphate sorption characteristics of selected major Ghanaian soils. **Soil Science**, Philadelphia, v. 148, n. 2, p. 114-123, 1989.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soil and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 1-50, 1978.

PARFITT, R.L. Phosphate reactions with natural allophane ferrihydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 359-369, 1989.

PROCHNOW, L.I. **Disponibilidade do fósforo da fração solúvel em citrato neutro de amônio e insolúvel em água de fosfatos acidulados**. 1996. 157 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

PROCHNOW, L.I. Eficiência agronômica de fosfatos totalmente acidulados. In: SIMPÓSIO DE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1, 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Potafos; ANDA, 2003. 1 CD-ROM

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.

QUISPE, J.F.S. **Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variável em água em solos distintos quanto a capacidade de fixação de fósforo**. 2004. 57 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2004.

RAIJ, B. van **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991, p.180-203.

RAIJ, B. van. Métodos de diagnose de fósforo em uso no Brasil. In: SIMPÓSIO DE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: POTAFOS; ANDA, 2003.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade.** Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 31p. (Boletim Técnico)

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

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 284 p.

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

REGAZZI, A.J.; LEITE, H.G. **Análise de regressão:** teoria às aplicações de manejo florestal. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1992. 236 p.

REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Eficiência agronômica do fosfato natural da Carolina do Norte em solo de cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21, 1994, Petrolina. **Anais...** EMBRAPA/CPATSA, 1994. p. 38-40.

ROBINSON, J.S.; SYERS, J.K. Effects of solution calcium concentration and calcium sink size on the dissolution of Gafsa phosphate rock in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 42, p. 389–397, 1991.

RODRIGUES, M.R. **Fatores que afetam a fixação de fosfatos nos solos do Estado de São Paulo**. 1980. 88 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1980.

ROLIN NETO, F.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; COSTA, L.M.; CORRÊA, M.M.; FERMANDES FILHO, E.I.; IBRAUMO, M.M. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto do Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n.6, p. 953-964, 2004.

SÁ Junior, J.P.N.; GOMES, I.F.; VASCONCELOS, A.L. Retenção de fósforo em solos da Zona da Mata de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 3, p. 183-188, 1968.

SANCHEZ, P.A.; UHERA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1980. chap. 17, p. 471-514.

SANYAL, S.K.; De DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, Nova Iorque, v. 16, p. 1-120, 1991.

SANYAL, S.K.; De DATTA, S.K.; CHAN, P.Y. Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils of South and Southeast Asia. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 57, n. 4, p. 937-945, 1993

SAS INSTITUTE. **SAS for linear models: a guide to the ANOVA and GLM procedures**. Cary, 1985

SINDEN, J. MFM-magnesium mutiphosphate. **Phosphorus and potassium**, London, v. 167, p. 20-25, 1990.

SMITH, T.J.; SANCHEZ, P.A. Phosphate rock dissolution and availability in cerrado soils as affected by phosphorus sorption capacity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 339-344, 1982.

SOON, Y.K. Solubility and retention of phosphate in soils of north western Canada prairie. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 70, n. 2, p. 227-237, 1991.

SOUSA, D.M.G de; VOLKWEISS, S.J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em grânulos no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, n. 2, p. 141-146, 1987.

SPOSITO, G. **The Chemistry of soils**. New York: Oxford University, 1989. 277 p.

SYERS, J.K.; MACKAY, A.D. Reactions of Sechura phosphate rock and single phosphate in soil. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 50, p. 480-485, 1986.

SYERS, J.K.; EVANS, T.D.; WILLIAMS, J.D.H.; MURDOCK, J.T. Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brasil. **Soil Science**, Philadelphia, v. 112, p. 267-275, 1971.

TANAKA, R.T. **Efeito do método de aplicação e do período de incubação na eficiência agrônômica dos fosfatos**. 1990. 122 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

TERMAN, G.L.; ALLEN, S.E. Response of corn to phosphorus in underacidulated phosphate rock and rock-superphosphate fertilizers. **Journal Agricultural Food Chemistry**, Washington, v. 15, p. 354-358, 1967.

TERMAN, G.L.; MORENO, E.C.; OSBORN, G. Acidulation of phosphate rock in soil. **Soil Science Society of America Proceedings**. Morgantown, v. 28, p. 104-107, 1964.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HAVLIN, J.L. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan, 1985. 754 p.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HAVLIN, J.L. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan, 1993. p. 176-229.

THOMAS, G.W.; PEASLEE, D.E. Testing soils phosphorus. In: WALSH, L.W.; BEATON, J.D. (Ed.) **Soil testing and plant analysis**. Madison: SSSA, 1973. p. 15-29.

THOMAZI, M.D. **Fixação de fosfatos por solos do município de Piracicaba**. 1988. 67 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARROW, V. Phosphate sorption by natural hematites. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 45, p. 45-51, 1992.

VALLADARES, G.S.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n.1, p. 111-118, 2003.

ZHANG, J.; BARBER, S.A. Maize root distribution between phosphorus-fertilized and unfertilized soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 819-822, 1992.

ZOYSA, A.K.N.; LOGANATHAN, P.; HEDLEY, M.J. Comparison of the agronomic effectiveness of a phosphate rock and triple superphosphate as phosphate fertilizers for tea (*Camellia sinensis* L.) on a strongly acid Ultisol. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 59, n. 2, p. 95-105, 2001.

WEAVER, R.M. Soil of the Central Plateau of Brasil. **Chemical and mineralogical properties**. Ithaca: Cornell University, 1974. p. 74-78.

WOODRUFF, J.R.; KAMPRATT, E.J. Phosphorus adsorption as maximum measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. **Soil Science of America Proceedings**, Morgantown, v. 29, p. 148-150, 1965.

APÊNDICES

Apêndice A - Dados do ensaio de adsorção de P

Solo¹	P aplicado	Ce²	P adsorvido
	$\mu\text{g mL}^{-1}$		mg g^{-1}
SG	10	0,23	11,63
	20	0,54	26,78
	30	1,27	63,28
	40	1,95	97,55
	50	3,51	175,57
	60	4,75	237,40
	80	6,24	312,05
CG	10	7,13	356,40
	20	10,95	547,48
	30	13,26	662,89
	40	14,93	746,36
	50	17,02	838,90
	60	18,43	921,39
	80	21,11	1.055,60

¹ Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe

² Ce: concentração de equilíbrio do P em solução ($\mu\text{g mL}^{-1}$)

Apêndice. B - Valores das áreas abaixo da curva que foram utilizadas no cálculo do Índice de Eficiência Relativa (IER)

Fonte¹	Sem Calagem Sem Gel	Sem Calagem Com Gel	Com Calagem Sem Gel	Com Calagem Com Gel
	$\text{mg dm}^{-3} \times \text{mg kg}^{-1}$			
FMC	22.422	7.527	22.510	11.250
LGSSP	5.439	1.968	5.352	2.261
MFM	7.395	3.046	9.579	4.274
TERMO	6.042	3.071	7.886	5.117
FN	9.735	3.990	5.249	6.654

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LGSSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

Apêndice. C - Produção de matéria seca (gramas) da parte aérea das plantas de milho do cultivo 1

Tratamento	Fonte ¹	Solo ²	Repetição			Média
			A	B	C	
1	Testemunha	SG	1,57	1,87	1,77	1,73
2	FMC	SG	8,98	7,63	9,50	8,70
3	LG SSP	SG	2,77	3,27	2,97	3,00
4	MFM	SG	2,77	3,77	4,07	3,54
5	TERMO	SG	2,37	1,77	2,27	2,14
6	FN	SG	1,77	1,47	1,97	1,74
7	Testemunha	CG	1,77	1,47	1,37	1,53
8	FMC	CG	2,68	2,90	2,83	2,80
9	LG SSP	CG	1,17	1,77	1,87	1,60
10	MFM	CG	1,37	1,47	1,57	1,47
11	TERMO	CG	1,77	1,27	1,47	1,50
12	FN	CG	1,67	1,57	1,67	1,64

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LGSSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Apêndice D - Produção de matéria seca (gramas) da parte aérea das plantas de milho do cultivo 2

Tratamento	Fonte ¹	Solo ²	Repetição			Média
			A	B	C	
1	Testemunha	SG	1,02	0,88	0,83	0,91
2	FMC	SG	13,90	14,04	14,34	14,09
3	LG SSP	SG	2,26	1,63	1,65	1,85
4	MFM	SG	3,75	1,69	2,63	2,69
5	TERMO	SG	4,84	4,51	3,49	4,28
6	FN	SG	0,92	1,19	1,45	1,19
7	Testemunha	CG	1,38	1,21	1,23	1,27
8	FMC	CG	1,83	1,11	0,89	1,28
9	LG SSP	CG	1,40	1,16	1,44	1,33
10	MFM	CG	1,38	1,13	1,23	1,25
11	TERMO	CG	1,46	1,81	1,20	1,49
12	FN	CG	1,59	1,70	1,60	1,63

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LGSSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Apêndice E - Concentração de P (g kg^{-1}) na parte aérea das plantas de milho no cultivo 1

Tratamento	Fonte ¹	Solo ²	Repetição			Média
			A	B	C	
1	Testemunha	SG	0,77	0,77	0,78	0,77
2	FMC	SG	0,94	1,07	0,92	0,97
3	LG SSP	SG	0,81	0,80	0,78	0,80
4	MFM	SG	0,86	0,94	0,89	0,90
5	TERMO	SG	0,81	1,03	0,87	0,90
6	FN	SG	0,74	0,86	0,90	0,83
7	Testemunha	CG	0,81	0,68	0,72	0,74
8	FMC	CG	0,77	0,76	0,65	0,73
9	LG SSP	CG	0,84	0,70	0,75	0,76
10	MFM	CG	0,77	0,77	0,77	0,77
11	TERMO	CG	0,79	0,70	0,67	0,72
12	FN	CG	0,97	0,95	0,93	0,95

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LGSSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Apêndice F - Concentração de P (g kg^{-1}) na parte aérea das plantas de milho no cultivo 2

Tratamento	Fonte ¹	Solo ²	Repetição			Média
			A	B	C	
1	Testemunha	SG	0,99	0,76	0,71	0,82
2	FMC	SG	0,95	1,05	1,17	1,06
3	LG SSP	SG	0,82	0,79	0,70	0,77
4	MFM	SG	0,92	0,92	0,95	0,93
5	TERMO	SG	0,87	0,73	0,87	0,82
6	FN	SG	1,05	0,85	0,78	0,89
7	Testemunha	CG	0,65	0,69	0,68	0,67
8	FMC	CG	0,78	0,76	0,70	0,75
9	LG SSP	CG	0,83	0,75	0,70	0,76
10	MFM	CG	0,70	0,75	0,70	0,72
11	TERMO	CG	0,69	0,70	0,68	0,69
12	FN	CG	0,70	0,70	0,70	0,70

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LGSSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Apêndice G - Acúmulo de P (mg vaso⁻¹) na parte aérea das plantas de milho no cultivo 1

Tratamento	Fonte ¹	Solo ²	Repetição			Média
			A	B	C	
1	Testemunha	SG	1,21	1,44	1,38	1,34
2	FMC	SG	8,44	8,16	8,74	8,45
3	LG SSP	SG	2,24	2,61	2,31	2,39
4	MFM	SG	2,38	3,54	3,62	3,18
5	TERMO	SG	1,92	1,82	1,97	1,90
6	FN	SG	1,31	1,26	1,77	1,45
7	Testemunha	CG	1,43	1,00	0,98	1,14
8	FMC	CG	2,06	2,20	1,84	2,03
9	LG SSP	CG	0,98	1,24	1,40	1,21
10	MFM	CG	1,05	1,13	1,21	1,13
11	TERMO	CG	1,40	0,89	0,98	1,09
12	FN	CG	1,62	1,49	1,55	1,55

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LGSSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.³ Calagem: N – Solo não corrigido pela calagem; S: Solo corrigido pela calagem

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.

Apêndice H - Acúmulo de P (mg vaso⁻¹) na parte aérea das plantas de milho no cultivo 2

Tratamento	Fonte ¹	Solo ²	Repetição			Média
			A	B	C	
1	Testemunha	SG	1,01	0,67	0,59	0,76
2	FMC	SG	13,21	14,74	16,77	14,91
3	LG SSP	SG	1,85	1,29	1,16	1,43
4	MFM	SG	3,45	1,55	2,50	2,50
5	TERMO	SG	4,21	3,29	3,04	3,51
6	FN	SG	0,97	1,01	1,13	1,04
7	Testemunha	CG	0,90	0,83	0,84	0,86
8	FMC	CG	1,43	0,85	0,62	0,97
9	LG SSP	CG	1,16	0,87	1,01	1,01
10	MFM	CG	0,97	0,85	0,86	0,89
11	TERMO	CG	1,01	1,27	0,82	1,03
12	FN	CG	1,11	1,19	1,12	1,14

¹ FMC: fosfato nomocálcico; LGSSP: low-grade SSP – “superfosfato simples” com baixa solubilidade em água; MFM: multifosfato magnésiano; TERMO: termofosfato; FN: fosfato natural.

² Solo: SG = Baixa CFF sem adição de gel de Fe, CG = Baixa CFF com adição de gel de Fe.