



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**FONTES E MODOS DE APLICAÇÃO DE
FÓSFORO PARA O MILHO EM SOLO
CULTIVADO DA REGIÃO DO CERRADO**

ÁLVARO VILELA DE RESENDE

2004

58315
049857

ÁLVARO VILELA DE RESENDE

DESCARTADO

maileira
ASSINATURA

Data 25, 07, 17

BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA
UFLA

**FONTES E MODOS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO PARA O MILHO
EM SOLO CULTIVADO DA REGIÃO DO CERRADO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de "Doutor".

Orientador

Prof. Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2004

BIBLIOTECA CENTRAL
UFLA
N.º CLAS 58315/049857
REGISTRO 58315
DATA 07/07/17

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Resende, Álvaro Vilela de

Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da
região do Cerrado / Álvaro Vilela de Resende. -- Lavras : UFLA, 2004.

169 p. : il.

Orientador: Antonio Eduardo Furtini Neto.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Milho. 2. Adubação fosfatada. 3. Fertilidade do solo. 4. Cerrado. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-633.15895

ÁLVARO VILELA DE RESENDE

**FONTES E MODOS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO PARA O MILHO
EM SOLO CULTIVADO DA REGIÃO DO CERRADO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de "Doutor".

APROVADA em 23 de abril de 2004

Dra. Vera Maria Carvalho Alves	Embrapa Milho e Sorgo
Prof. Dr. Joel Augusto Muniz	UFLA
Prof. Dr. Nilton Curi	UFLA
Prof. Dr. Valdemar Faquin	UFLA



Prof. Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus, ...

... meu refúgio, força e luz,

OFEREÇO.

Aos meus pais, por mostrarem os caminhos;

à Gilvane, pelo companheirismo

e à Leticia, motivação para minha vida,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade e apoio irrestrito para realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela viabilização orçamentária do experimento. À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão de bolsa de estudos.

À Embrapa Cerrados, pela oportunidade e apoio para a conclusão do doutorado.

À Embrapa Milho e Sorgo, na pessoa da Dra. Vera Maria Carvalho Alves, pelo suporte financeiro, apoio operacional e sugestões para a execução do estudo.

Às empresas, Serrana Fertilizantes S.A., Fertilizantes Ouro Verde S.A. e Fertilizantes Mitsui S.A., pela parceria, fornecendo parte dos fertilizantes usados no estudo.

Ao Sr. José Rezende e seus filhos, Ângelo, Aurélio e Aquino, pela cessão de áreas, apoio operacional, boa vontade e disposição para auxiliar-nos sempre, sem o quê esse projeto não teria se concretizado.

Ao Prof. Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto, meu orientador, acima de tudo pelo incentivo, amizade e ensinamentos para a minha vida profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Joel Augusto Muniz, pela receptividade constante e valiosa contribuição no tratamento estatístico dos resultados.

Ao Prof. Dr. Nilton Curi e ao Prof. Dr. Valdemar Faquin, pelo incentivo e experiência compartilhada no desenvolvimento de atividades de pesquisa.

Aos membros da banca, Dra. Vera, Prof. Furtini, Prof. Joel, Prof. Faquin e Prof. Nilton, pela discussão do trabalho e sugestões para sua melhoria.

Ao Dr. Daniel Ioshiteru Kinpara, pelo prestimoso auxílio na análise econômica dos resultados.

A todos os professores e todos os funcionários do Departamento de Ciência do Solo, pela amizade e inestimável apoio durante meu período de docência na UFPA.

Aos colegas de convívio na pós-graduação e de trabalho na Embrapa Cerrados.

Ao José Roberto Fernandes (Pezão), Daniel, Humberto, Anamaria, João Batista Correa, Roberto, João Gualberto, Milton, Marquinho, Vitinho, Bosco, Dulce, Adriana, Vera, Maria Alice, Leninha, Val e demais funcionários do DCS, pelo auxílio imprescindível nas atividades do doutorado.

Aos amigos Zé Zilton, Ivan Bedin, Breno, Léo Bufinho, Túlio, Leandro, Fabiano, Rodrigo Patinete, Felipe, Fabrício, Ivan e Gil, entre outros, pela ajuda indispensável na condução do experimento.

Ao Sr. Osvaldo e outros homens de vida suada que, na sua "simplicidade", viabilizam a pesquisa e a agricultura brasileira.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introdução Geral.....	1
2 Referencial Teórico	4
2.1 O fósforo nos solos das regiões tropicais.....	4
2.1.1 Formas e dinâmica do fósforo	4
2.1.2 Disponibilidade às plantas	6
2.2 Adubação fosfatada no Brasil.....	8
2.2.1 Fontes de fósforo	8
2.2.2 Manejo e eficiência da adubação.....	10
2.3 Efeito residual	14
2.4 Adubação fosfatada na cultura do milho.....	16
3 Referências Bibliográficas	19
CAPÍTULO 2: Resposta do milho a fontes e modos de aplicação de fósforo durante três cultivos sucessivos em solo da região do Cerrado	25
1 Resumo	25
2 Abstract.....	27
3 Introdução	28
4 Material e Métodos.....	31
4.1 Delineamento experimental e tratamentos	31
4.2 Plantio e condução do experimento	34

4.3 Colheita e avaliações	37
4.4 Análises estatísticas	38
5. Resultados e Discussão	39
5.1 Disponibilidade de nutrientes no solo	39
5.2 Teores foliares de nutrientes	40
5.3 Crescimento vegetativo e produção do milho	46
5.3.1 Número de plantas e de espigas	46
5.3.2 Peso de plantas	48
5.3.3 Peso de espigas e produção de grãos	51
5.4 Acúmulo de fósforo e eficiência nutricional	59
5.4.1 Teor e acúmulo de P nos grãos	59
5.4.2 Eficiência de absorção, de utilização e de produção de grãos	66
5.5 Considerações finais	72
6 Conclusões	74
7 Referências Bibliográficas	75
CAPÍTULO 3: Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado: resposta acumulada de três cultivos	81
1 Resumo	81
2 Abstract	83
3 Introdução	84
4 Material e Métodos	86
4.1 Delineamento experimental e tratamentos	86
4.2 Plantio e condução do experimento	89
4.3 Colheita e avaliações	92
4.4 Análises estatísticas	93
5 Resultados e Discussão	94
5.1 Produção de biomassa e de grãos	94
5.2 Absorção, exportação e eficiência de uso de fósforo	100

5.2.1 Absorção e exportação de fósforo	100
5.2.2 Eficiência de uso de fósforo	103
5.2.3 Eficiência do fertilizante	108
5.3 Efeito residual	110
5.4 Considerações finais	113
6 Conclusões	114
7 Referências Bibliográficas	115
CAPÍTULO 4: Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado: eficiência agrônômica e econômica ..	121
1 Resumo	121
2 Abstract.....	123
3 Introdução	124
4 Material e Métodos.....	126
4.1 Delineamento experimental e tratamentos	126
4.2 Plantio e condução do experimento.....	128
4.3 Colheita e avaliações	132
4.4 Análises estatísticas	132
4.5 Análise econômica.....	133
5 Resultados e Discussão.....	135
5.1 Eficiência agrônômica	135
5.2 Eficiência econômica	140
5.3 Considerações finais	144
6 Conclusões	146
7 Referências Bibliográficas	147
CONCLUSÕES GERAIS.....	151
ANEXOS	153
ANEXO A	153
ANEXO B.....	164

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela		Página
1	Principais atributos químicos e físicos do solo (0-20 cm de profundidade) antes da aplicação dos tratamentos	32
2	Caracterização química e física dos fertilizantes fosfatados	33
3	Datas de semeadura e adubações de plantio e de cobertura dos três cultivos de milho	35
4	Índices de eficiência nutricional	38
5	Principais atributos químicos do solo aos 25 dias após a semeadura do milho, no 1º ano do experimento, safra 2000/2001	40
6	Principais atributos químicos do solo aos 30 dias após a semeadura do milho, no 2º ano do experimento, safra 2001/2002	41
7	Principais atributos químicos do solo após a colheita do milho, no 3º ano do experimento, safra 2002/2003	41
8	Teores foliares de macro e micronutrientes no florescimento do milho, sob diferentes fontes e modos de aplicação de fósforo (1º ano do experimento, safra 2000/2001)	43
9	Teores foliares de macro e micronutrientes no florescimento do milho, sob diferentes fontes e modos de aplicação de fósforo (2º ano do experimento, safra 2001/2002)	44
10	Teores foliares de macro e micronutrientes no florescimento do milho, sob diferentes fontes e modos de aplicação de fósforo (3º ano do experimento, safra 2002/2003)	45

11	Número de plantas em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo, safra 2002/2003)	47
12	Peso de plantas (kg ha ⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo, safra 2000/2001)	49
13	Peso de plantas (kg ha ⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (2 ^o cultivo, safra 2001/2002)	49
14	Peso de plantas (kg ha ⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo, safra 2002/2003)	50
15	Peso de espigas (kg ha ⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo, safra 2000/2001)	52
16	Produção de grãos (kg ha ⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo, safra 2000/2001)	52
17	Peso de espigas (kg ha ⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (2 ^o cultivo, safra 2001/2002)	53
18	Produção de grãos (kg ha ⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (2 ^o cultivo, safra 2001/2002)	53
19	Peso de espigas (kg ha ⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo, safra 2002/2003)	54
20	Produção de grãos (kg ha ⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo, safra 2002/2003)	54
21	Teor de P nos grãos (g kg ⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo, safra 2000/2001)	60

22	Teor de P nos grãos (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (2 ^o cultivo, safra 2001/2002)	61
23	Teor de P nos grãos (g kg^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo, safra 2002/2003)	62
24	Acúmulo de P nos grãos (kg ha^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo, safra 2000/2001)	63
25	Acúmulo de P nos grãos (kg ha^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (2 ^o cultivo, safra 2001/2002)	63
26	Acúmulo de P nos grãos (kg ha^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo, safra 2002/2003)	64
27	Eficiência de absorção de P (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo, safra 2000/2001)	66
28	Eficiência de absorção de P (g kg^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo, safra 2002/2003)	68
29	Eficiência de utilização de P (kg kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo, safra 2000/2001)	70
30	Eficiência de utilização de P (kg kg^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo, safra 2002/2003)	70
31	Eficiência de produção de grãos (kg kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo, safra 2000/2001)	71
32	Eficiência de produção de grãos (kg kg^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo, safra 2002/2003)	71

Capítulo 3

Tabela		Página
1	Principais atributos químicos e físicos do solo (0-20 cm de profundidade) antes da aplicação dos tratamentos	87
2	Caracterização química e física dos fertilizantes fosfatados	88
3	Datas de semeadura e adubações de plantio e de cobertura dos três cultivos de milho	90
4	Índices de eficiência nutricional e de eficiência do fertilizante.....	93
5	Peso de plantas (kg ha^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (acumulado de três cultivos)	94
6	Produção de grãos (kg ha^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (acumulada de três cultivos)	95
7	Extração de P pelo milho e exportação de P nos grãos em função de fontes e modos de aplicação de fósforo (acumuladas de três cultivos)	101
8	Eficiência de absorção de P (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos, incluindo a contribuição das reservas de P do solo)	104
9	Eficiência de absorção de P (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos, descontada a contribuição das reservas de P do solo) ..	105
10	Eficiência de utilização de P (kg kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos)	107

11	Eficiência de produção de grãos (kg kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos)	108
12	Eficiência do fertilizante (kg kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos)	109
13	Fósforo disponível residual (mg dm^{-3}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo, após três cultivos de milho (extraído com resina de troca iônica)	111

Capítulo 4

Tabela		Página
1	Principais atributos químicos e físicos do solo (0-20 cm de profundidade) antes da aplicação dos tratamentos	127
2	Caracterização química e física dos fertilizantes fosfatados	128
3	Datas de semeadura e adubações de plantio e de cobertura dos três cultivos de milho	130
4	Eficiência relativa de produção de grãos (%) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho, em três cultivos	136
5	Eficiência relativa de produção de grãos (%) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos)	137
6	Eficiência agrônômica de aquisição de P (%) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos)	138
7	Eficiência agrônômica de produção de grãos (%) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos)	140

8	Relação benefício/custo em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (acumulada de três cultivos)	142
9	Ponto de equivalência de preço da tonelada de fertilizante (% do custo do superfosfato triplo), o qual permitiria a mesma relação eficiência/custo do superfosfato triplo	143

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura		Página
1	Dados pluviométricos referentes aos períodos de condução dos três cultivos de milho (as setas indicam a época da semeadura)	36

Capítulo 3

Figura		Página
1	Dados pluviométricos referentes aos períodos de condução dos três cultivos de milho (as setas indicam a época da semeadura)	91

Capítulo 4

Figura		Página
1	Dados pluviométricos referentes aos períodos de condução dos três cultivos de milho (as setas indicam a época da semeadura)	131

RESUMO

Resende, Álvaro Vilela de. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado**. 2004. 169p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*

A eficiência agrônômica e econômica no uso de fosfatos ainda constitui um desafio para o manejo da fertilidade dos solos nas regiões tropicais. No presente trabalho, objetivou-se estudar as respostas do milho ao fornecimento de fósforo combinando fontes e modos de aplicação do nutriente, durante três cultivos sucessivos, num Argissolo Vermelho já cultivado e adubado em épocas passadas. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições, num esquema fatorial $4 \times 3 + 1$, envolvendo quatro fontes de P na quantidade de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato triplo – ST, termofosfato magnésiano – TM, fosfato natural reativo de Arad – FR e fosfato natural de Araxá – FA), três formas de aplicação (a lanço em área total no primeiro ano, localizada no sulco de plantio no primeiro ano e parcelada anualmente no sulco) e uma testemunha (sem P) como tratamento adicional. O fósforo foi fornecido considerando-se os teores totais do nutriente nas fontes. Após o primeiro cultivo, não mais foi feito preparo do solo, tendo os sulcos de semeadura sido abertos com enxada, seguindo sua localização original. A cada cultivo foram determinados os teores de nutrientes no solo e nas folhas do milho. Quantificaram-se a produção de biomassa e de grãos e o acúmulo de fósforo na parte aérea e nos grãos. Foram calculados índices de eficiência técnica e econômica. As respostas aos tratamentos foram mais discrepantes inicialmente e tenderam a igualar-se com os cultivos sucessivos. Nas duas primeiras safras, as fontes de maior solubilidade (ST e TM) tenderam a ocasionar maiores produções. Os fosfatos naturais (FA e FR) apresentaram aumento de eficiência com o tempo, equiparando-se às fontes mais solúveis. As respostas do milho foram afetadas pelas condições climáticas. O residual de antigas adubações e a eficiência genotípica a fósforo parecem ter contribuído para nivelar os efeitos dos tratamentos. O parcelamento da dose total dos fosfatos em aplicações anuais no sulco de semeadura não comprometeu a produtividade e propiciou maior efeito residual, notadamente no caso do FR. Nesse modo de aplicação, obteve-se maior rendimento final de grãos para o FR, o que não ocorreu com o FA.

* Comitê Orientador: Prof. Antônio E. Furtini Neto - UFLA (Orientador)
Prof. Joel Augusto Muniz - UFLA
Prof. Nilton Curi - UFLA
Prof. Valdemar Faquin - UFLA

Os tratamentos com maior eficiência agronômica não corresponderam aos de maior eficiência econômica. O termofosfato foi tecnicamente promissor, mas em retorno econômico foi superado pelas demais fontes. Os dois fosfatos naturais apresentaram relação benefício/custo mais compensadora.

ABSTRACT

Resende, Álvaro Vilela de. Phosphorus sources and application methods for maize in a cultivated soil of the Cerrado region. 2004. 169p. Thesis (Doctorate in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG*

The agronomic and economic efficiency in the use of phosphates still constitutes a challenge for soil fertility management in tropical regions. In this work, we aimed to study the response to phosphorus supply, combining P sources, and application methods, during three successive maize cultivations in a Red Argisol which had been previously cultivated and fertilized. A randomized complete block design with four replications was used. Treatments arranged in a 4x3+1 factorial scheme combined four P sources in the amount of 180 kg ha⁻¹ P₂O₅ (triple superphosphate - TS, magnesium termophosphate - MT, Arad reactive rock phosphate - RP, and Araxá rock phosphate - AP), three application methods (broadcasted in the first year, banded in the seeding furrow in the first year, and annually parceled bands in the seeding furrow), and a check plot (without P) as an additional treatment. The applied P ratio was based on the total P₂O₅ content of each fertilizer. After the first cultivation, the soil was no longer revolved and the seeding furrows were opened manually following their original location. In each cultivation, soil and leaf nutrient concentrations were determined. The biomass production, grain yield, and P accumulation in shoot and grain were quantified. Indices of technical and economic efficiency were calculated. The differences in maize response to treatments were initially larger and tended to disappear with the successive cultivations. In the first two cultivations, the most soluble sources (TS and MT) promoted greater yields. The rock phosphates (RP and AP) presented increased efficiency with time, becoming comparable to the soluble sources. The responses were affected by climatic conditions. The residual effect of previous fertilizations and the genetic efficiency in P use seem to have contributed to level off the treatments. The parcelling of the total P dose in annual banded applications didn't jeopardize grain yield and propitiated greater residual effect, especially in the case of RP. This application method resulted in better response for RP, unlikely of the other rock phosphate (AP). Treatments with greater agronomic efficiency did not

*Guidance Committee: Prof. Antônio E. Furtini Neto - UFLA (Major Professor)
Prof. Joel Augusto Muniz - UFLA
Prof. Nilton Curi - UFLA
Prof. Valdemar Faquin - UFLA

present greater economic efficiency. Although technically promising, MT was surpassed by the other sources in terms of economic return. The two rock phosphates presented more attractive cost/benefit ratios.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

Embora trate-se de um tópico dos mais explorados e debatidos na pesquisa agrícola, a adubação fosfatada ainda motiva temas relevantes para estudos na Ciência do Solo. A eficiência agronômica e econômica no uso de fosfatos constitui um desafio para o manejo da fertilidade dos solos no Brasil.

A fertilidade dos solos das regiões tropicais é fortemente limitada pela baixa disponibilidade natural de fósforo (P) e a região do Cerrado não constitui exceção. Além disso, a indisponibilização de boa parte do fósforo fornecido na adubação, devido ao fenômeno da fixação do P em reações com componentes do solo, faz com que a aplicação de maiores quantidades de fosfatos seja necessária para viabilizar o uso agrícola desses solos.

A eficiência na promoção do crescimento e produtividade das culturas, assim como o custo da adubação, varia conforme a fonte de fósforo utilizada. Geralmente, os fosfatos mais solúveis proporcionam maior resposta biológica em curto prazo, mas têm custo mais elevado, enquanto os fosfatos naturais têm menor eficiência inicial e custo mais baixo (Rajan et al., 1996; Kaminski & Peruzzo, 1997; Prochnow et al., 2003). Por outro lado, o fósforo liberado das fontes mais reativas pode ser rapidamente convertido para formas menos disponíveis às plantas, ao passo que os fosfatos de menor solubilidade, ao liberarem o nutriente de forma mais lenta, podem minimizar o processo de fixação (Novais & Smyth, 1999).

Além da fonte de P, diversos outros fatores podem influenciar a efetividade da adubação fosfatada. Variações na natureza dos solos são normalmente esperadas em áreas de grande extensão geográfica, como é o caso

do Cerrado, e têm relação direta com a quantidade de fósforo que deve ser fornecida na adubação. A forma de aplicação afeta, de maneira distinta, o desempenho dos diferentes tipos de fosfato. Diferenças genotípicas são causa freqüente de respostas variáveis para uma mesma espécie vegetal. As condições climáticas afetam intensamente o potencial produtivo das culturas e condicionam as respostas aos tratamentos com P. Interferências ocorrem também em função do tempo decorrido da aplicação dos fosfatos, do método de preparo do solo, da seqüência de culturas e do histórico da área (Sanchez & Uehara, 1980; Goedert et al., 1986; Novais & Smyth, 1999; Sousa et al., 2002; Anghinoni, 2003; Prochnow et al., 2003).

Chama-se atenção para o fato de que, em áreas que já foram adubadas anteriormente, os efeitos do fornecimento de fósforo podem não seguir os padrões típicos das respostas normalmente verificadas nos estudos de adubação fosfatada conduzidos em solos virgens (Kaminski & Peruzzo, 1997; Anghinoni, 2003). Após nova aplicação de fosfatos, a dinâmica que se estabelece entre as formas de P, bem como a biodisponibilidade do nutriente, costumam ser diferenciadas, de forma que solos com certa reserva do nutriente tendem a favorecer a equiparação das respostas a distintas estratégias de manejo da adubação fosfatada.

Vários trabalhos conduzidos em campo e inúmeros em condições controladas relatam diversos aspectos ligados à dinâmica do fósforo no solo e na planta de milho e sua relação com a produtividade da cultura. Contudo, relativamente poucos têm sido os estudos de longa duração conduzidos no país, a despeito da enorme influência do efeito residual dos fosfatos, quando avaliam-se a eficiência técnica e o retorno econômico da adubação. A necessidade de acompanhamento de longo prazo torna-se ainda mais patente devido à grande probabilidade de variação do custo dos insumos e das respostas em

produtividade de um ano para outro, o que pode levar a conclusões parciais ou prematuras para uma perspectiva de utilização continuada do solo.

Objetivou-se, no presente trabalho, estudar as respostas do milho ao fornecimento de fósforo pela combinação de diferentes fontes e modos de aplicação do nutriente, durante três cultivos sucessivos, em solo já cultivado da região do Cerrado, enfocando a eficiência técnica e econômica das fontes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O fósforo nos solos das regiões tropicais

Como é típico em grande parte dos solos das regiões tropicais e na quase totalidade dos solos de cerrado, uma vez liberado na solução, o P oriundo dos fertilizantes tende a precipitar-se com alumínio (Al) ou ferro (Fe) ou ainda ser adsorvido à superfície de partículas de argila e dos óxidos de Fe e Al. Essas reações correspondem ao processo de fixação do fósforo pelo solo. Como consequência da fixação, o fósforo passa a fazer parte de compostos de baixa solubilidade, ficando menos disponível para a absorção vegetal. Normalmente, essa indisponibilização é tão mais intensa quanto mais intemperizado, ácido, argiloso e oxidico for o solo. A implicação prática disso é que, embora a exigência de fósforo pelas plantas não seja elevada, grandes quantidades do nutriente devem ser fornecidas nas adubações para promover alguma saturação do solo e originar um excedente que atenda aos requerimentos nutricionais das culturas.

2.1.1 Formas e dinâmica do fósforo

O P liberado dos fertilizantes passa para a solução do solo e em seguida para a fase sólida, convertendo-se inicialmente em fósforo lábil e, com o tempo, passando a formas não-lábeis, as quais não seriam passíveis de aproveitamento imediato pelas plantas (P não-disponível).¹ O fósforo pode ser removido da solução do solo via adsorção por ligações covalentes de alta energia com a superfície de argilas e óxidos hidratados de ferro e de alumínio em solos ácidos ou, ainda, com carbonatos de cálcio (Ca) em solos calcários.² O nutriente pode também passar a fazer parte de compostos orgânicos. O P orgânico ocorre em

teores proporcionais ao conteúdo de matéria orgânica do solo. Reações de precipitação com íons de Al, Fe, e Ca presentes na solução, formando compostos de solubilidade variável, seriam outros processos de indisponibilização do P fornecido na adubação. A adsorção e a precipitação constituem os mecanismos relacionados ao fenômeno genericamente referido como "fixação do fósforo pelo solo". Em geral, quanto maior a acidez, o teor de argila e, principalmente, quanto maior a presença de óxidos de Fe e Al na fração argila, mais intenso é o processo de fixação nos solos dos trópicos (Sample et al., 1980; Sanchez & Uehara, 1980; Malavolta, 1981; Lopes, 1983; Raij, 1991; Tisdale et al., 1993; Novais & Smyth, 1999). Portanto, como será visto adiante, a capacidade de fixação de P representa um fator que condiciona fortemente o manejo da adubação fosfatada nos solos de cerrado.

As diferentes formas de P no solo são agrupadas em três frações: o fósforo em solução, o fósforo lábil e o fósforo não-lábil. O teor de P na solução é geralmente baixo (menor que $0,1 \text{ mg dm}^{-3}$, predominantemente na forma de H_2PO_4^- nos solos da região do Cerrado) e representa muito pouco para as necessidades dos vegetais, estando em equilíbrio rápido com as formas lábeis da fase sólida. Esse equilíbrio dá-se por meio da dessorção e dissolução do fosfato lábil, repondo constantemente o fósforo absorvido da solução pelas plantas. O P não-lábil, maior proporção do P inorgânico do solo, apenas lentamente pode voltar a formas lábeis. Portanto, o que procura-se determinar na análise de solo para fins de adubação é o somatório do P-solução e P-lábil (P disponível). A fração de P precipitado com Fe, Al e Ca, mais aquela adsorvida em óxidos de Fe e Al, representam o P lábil, enquanto o P não-lábil corresponderia aos compostos fosfatados mais complexos e estáveis (Goedert et al., 1986; Raij, 1991).

2.1.2 Disponibilidade às plantas

Devido à baixa concentração em que ocorre na solução, o fósforo precisa ser continuamente ressuprido pela fase sólida para nutrir satisfatoriamente as culturas. A resistência que o solo oferece à alteração na concentração de P na solução, ou a capacidade do solo repor o P absorvido da solução, denomina-se capacidade tampão de fosfato ou fator capacidade de P (FCP), o qual depende da relação entre os fatores quantidade (P-lábil) e intensidade (P-solução) e correlaciona-se positivamente com a capacidade de fixação de P do solo. A disponibilidade do nutriente às plantas é muito afetada pelo FCP. Numa comparação simplificada, pode-se considerar que os solos mais argilosos possuem maior FCP que os arenosos e, portanto, competem mais com a planta pelo fósforo adicionado via fertilizante. Desse modo, na conversão de áreas sob cerrado nativo em lavouras, os solos argilosos requerem quantidades mais elevadas de fosfatos na adubação. Por outro lado, apesar de necessitarem de menos fertilizantes fosfatados, os solos arenosos são exauridos mais facilmente com o cultivo contínuo, ou seja, possuem menor capacidade de reserva de P (Lopes, 1983; Novais & Smyth, 1999).

Diante do exposto, verifica-se que a análise do solo é imprescindível para definir quantidades adequadas de fertilizantes fosfatados a serem fornecidos conforme o “status” de fertilidade do solo em relação ao fósforo. Dentre os métodos de análise de solo para avaliação da disponibilidade de P, os mais empregados na região do Cerrado envolvem o uso do extrator Mehlich 1 ou da resina trocadora de íons (Sousa et al., 2002).

Todavia, devido às limitações do próprio extrator na quantificação do P disponível, a análise de solo pode não expressar a real disponibilidade do nutriente para a planta. O Mehlich 1 é um extrator ácido (H_2SO_4 0,025N + HCl 0,05N) que tem ação baseada na substituição aniônica de fosfatos adsorvidos e

solubilização dos compostos de P ligado a Al, Fe e, principalmente, Ca. A adequabilidade desse extrator para solos ácidos ricos em óxidos de Fe e Al e caulinita tem sido questionada (Raij et al, 1986; Raij, 1991; Novais & Smyth, 1999; Raij, 2003). Em se tratando de certos solos argilosos que vêm sendo adubados, o uso de extratores ácidos forneceria valores excessivamente baixos de P. Nesses solos, as culturas produzem bem e não apresentam maiores respostas à adubação fosfatada. Uma outra limitação do Mehlich 1 seria para solos que receberam aplicações de fosfatos naturais de baixa solubilidade, quando, normalmente, o extrator fornece valores de disponibilidade superestimados em razão da dissolução do P ligado a Ca, que não estaria disponível. Nessas circunstâncias, o uso da resina de troca iônica seria mais apropriado, uma vez que, devido à natureza e modo de ação da resina, não haveria desgaste do extrator pelo tamponamento dos solos argilosos ou dissolução de formas de P não-disponíveis, como ocorre para o Mehlich 1.

Embora os teores totais de fósforo nos solos de cerrado variem de 50 a 350 mg dm⁻³ (Goedert et al., 1986), a fração disponível para absorção pelas plantas é muito pequena, de forma que a baixa disponibilidade natural de P constitui-se numa das maiores limitações à agricultura na região (Lopes, 1983). Essa condição, associada à elevada capacidade de fixação de P, reflete no uso de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados para viabilizar a exploração desses solos em sistemas de produção tecnificados, pois, antes de atender à exigência da planta, é preciso saturar os componentes consumidores de P do solo.

2.2 Adubação fosfatada no Brasil

2.2.1 Fontes de fósforo

No Brasil, os principais fertilizantes utilizados como fonte de fósforo são os fosfatos totalmente acidulados (superfosfato simples e superfosfato triplo), os fosfatos de amônio (monoamônio fosfato – MAP e diamônio fosfato – DAP), os termofosfatos (termofosfato magnesiano) e os fosfatos naturais importados (fosfatos de Arad, Gafsa, Carolina do Norte, etc.) e nacionais (fosfatos de Araxá, Patos de Minas, etc.).

Os adubos fosfatados com alta concentração de P solúvel, como os superfosfatos, têm no seu processo de fabricação a utilização de métodos específicos de purificação e concentração da matéria-prima (rocha fosfática) e o emprego de ácidos (principalmente H_2SO_4 e H_3PO_4) para solubilização desse material (Prochnow et al., 2003), o que eleva bastante o custo final desses fertilizantes. Esses fosfatos são tidos como de alta eficiência, pois, uma vez aplicados ao solo, liberam prontamente grande parte do seu conteúdo em P, favorecendo a absorção pelas plantas (Goedert & Sousa, 1984). Outros fertilizantes são produzidos mediante tratamento térmico da rocha fosfatada e fusão com rochas ricas em magnésio e silício, dando origem aos termofosfatos magnesianos. Já na produção dos fosfatos naturais, as rochas fosfáticas são apenas moídas, envolvendo, portanto, menores custos (Malavolta, 1981; Goedert et al., 1986). Os fosfatos naturais seriam, então, uma fonte alternativa aos fosfatos acidulados, mais baratos e agronomicamente efetivos sob certas condições de solo, cultura e manejo (Sanchez & Uehara, 1980; Barbosa Filho, 1984; Rajan et al., 1996).

Todavia, existe grande variabilidade dos fosfatos naturais em relação à solubilidade e aos teores de fósforo. Essa variabilidade é decorrente de

características intrínsecas às rochas, como o grau de substituição isomórfica de fosfato por carbonato, e da granulometria do material aplicado ao solo. Tanto a composição química quanto a granulometria condicionam a dissolução dos fosfatos naturais. Maior substituição de fosfato por carbonato e menor granulometria favorecem a dissolução (Engelstad & Terman, 1980; Rajan et al., 1996; Kaminski & Peruzzo, 1997; Horowitz & Meurer, 2003).

Os principais depósitos de fosfatos existentes no Brasil são constituídos principalmente de apatitas, rochas de origem ígnea, em geral, associadas a processos de alteração intempélica, que apresentam complexidade acentuada, além de baixos teores de fósforo. Na região do Cerrado são encontradas algumas das principais jazidas do país. Entretanto, por sua origem ígnea ou metamórfica, apresentam estrutura bem cristalizada e fornecem fosfatos naturais de baixa reatividade, o que implica em lenta solubilização no solo (Malavolta, 1981; Horowitz & Meurer, 2003).

A utilização de fosfatos naturais de baixa reatividade, como os brasileiros, para culturas anuais, como o milho, é considerada inadequada, pois não há liberação de P do fosfato natural a taxas suficientemente elevadas para satisfazer às necessidades da planta. Para Raji (1991), a baixa eficiência agronômica dos fosfatos naturais brasileiros impede que sejam usados para culturas anuais.

Já os fosfatos naturais importados de outros países, como o Arad (Israel), o Gafsa (Tunísia) e o Carolina do Norte (EUA), são derivados de rochas de origem sedimentar e apresentam alta reatividade devido ao elevado grau de substituição de fosfatos por carbonatos e menor cristalização das rochas, que, por isso, decompõe-se mais facilmente (Lehr, 1980; Kaminski & Peruzzo, 1997). A utilização de fosfatos reativos parece ser uma alternativa promissora para o fornecimento de P em solos de cerrado (Sousa et al., 2002).

2.2.2 Manejo e eficiência da adubação

Ainda existem muitas divergências sobre a melhor forma de utilização das diversas fontes fosfatadas disponíveis no país. Na avaliação da eficiência é importante levar em consideração aspectos como a natureza química, o método de aplicação, a granulometria e a dose do fertilizante, o pH do solo, as condições climáticas, o sistema de preparo do solo, a interação com outros nutrientes e a espécie vegetal, entre outros (Engelstad & Terman, 1980; Goedert & Sousa, 1984; Goedert et al., 1986; Sousa et al., 2002; Anghinoni, 2003; Prochnow et al., 2003). Existem vários métodos que objetivam avaliar a eficiência dos fertilizantes fosfatados. A eficiência agrônômica dos fosfatos alternativos pode ser obtida por meio da comparação com uma fonte de P usada como referência, normalmente fosfatos de alta solubilidade, como o superfosfato simples ou triplo.

Em geral, os fosfatos mais solúveis, como os superfosfatos simples e triplo, são os produtos de melhor desempenho em suprir fósforo às culturas anuais e têm sido utilizados em aplicações a lanço, em faixas e no sulco de semeadura. Em solos pobres e para doses moderadas de P, o uso desses fertilizantes na forma granulada e em aplicações localizadas reduz o contato com o solo e contribui para aumentar a eficiência da adubação (Sanchez & Uehara, 1980; Raij, 1991; Anghinoni, 2003; Prochnow et al., 2003). No sistema de preparo convencional do solo, considerando a produção de vários cultivos, a forma de aplicação deixa de ser relevante e passa a importar mais a quantidade total de P fornecida, uma vez que o revolvimento periódico do solo favorece a homogeneização da camada arável (Goedert et al., 1986). Para sistemas de cultivo mínimo e plantio direto, são ainda escassas as informações sobre a melhor forma de manejo, mas há indicativos de que a dinâmica do fósforo,

especialmente no tocante às formas orgânicas, seja diferenciada nesses sistemas (Coelho & Alves, 2003; Sá, 2003).

(A aplicação localizada dos fosfatos aumenta a quantidade de P aplicado por volume de solo na região adubada; no entanto, reduz a proporção de raízes da planta que poderiam absorvê-lo. Por outro lado, a aplicação a lanço, com posterior incorporação na camada arável, aumenta o contato do fosfato com o solo, mas favorece maior exploração do solo pelo sistema radicular/ De acordo com Lopes (1983) e Goedert & Sousa (1984), a maior exploração do solo pelas raízes tende a ser benéfica para a produção vegetal quando da ocorrência de veranicos, circunstância em que a aubação a lanço pode resultar em maior produtividade das lavouras.

Utilizando doses de superfosfato triplo incorporado em diferentes proporções de um solo Podzólico Vermelho-Escuro franco argiloso (6,25; 12,5; 25; 50; 75 e 100%), Anghinoni (1992) verificou que, para as doses de P mais baixas, maior eficiência foi obtida quando a mistura foi feita com as menores proporções de solo. As proporções intermediárias de mistura com solo foram mais eficientes com o aumento nas doses de P, mas a forma de aplicação deixou de ser importante para as maiores doses.

Durante muito tempo, houve certo consenso de que, nas recomendações de uso dos fosfatos naturais de baixa reatividade, deveria-se preconizar o emprego do produto finamente moído, aplicado a lanço e incorporado em áreas de solos ácidos, visando ao fornecimento de fósforo para culturas perenes, gramíneas e espécies tolerantes à acidez (Goedert et al., 1986; Raij, 1991; Lopes, 1999). No entanto, mais recentemente, tem-se sugerido que a aplicação deve ser localizada na linha de plantio, de forma a privilegiar a planta no aproveitamento do P oriundo do fosfato natural, minimizando o dreno do nutriente pelo solo (Novais, 1999; Novais & Smyth, 1999). No meio científico, esses aspectos ainda permanecem controversos.

Numerosos fatores isolados, assim como as suas interações, interferem na disponibilização e na manutenção da disponibilidade do P dos fosfatos aplicados ao solo, nas respostas das plantas e, conseqüentemente, na eficiência da adubação. Assim, não existem modelos conclusivos que expliquem e possibilitem prever com exatidão o comportamento de diferentes fontes de P em função do manejo da adubação. A seguir, comenta-se a respeito de alguns desses fatores.

Além da solubilidade, a granulometria também afeta a eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados. No caso dos fosfatos naturais, o tamanho reduzido de partículas favorece a eficiência devido à maior superfície de exposição e conseqüente aumento da solubilidade (Sanchez & Uehara, 1980; Raij, 1991; Rein et al., 1994; Horowitz & Meurer, 2003).

Um dos principais fatores que interferem na dissolução dos fosfatos naturais é a presença de prótons (H^+), os quais são cedidos pelo solo: Desse modo, o fosfato fino deveria ser incorporado a um maior volume de solo, favorecendo o contato com os componentes edáficos, a fim de permitir a solubilização. Da mesma forma, condições de maior acidez (presença de íons H^+) seriam necessárias para aumentar a dissolução (Tisdale et al., 1993; Raij, 1991; Rajan et al., 1996; Lopes, 1999). De acordo com Goedert et al. (1986), pode-se esperar uma maior solubilidade em condições de solos ácidos com baixos teores de Ca disponível, para os fosfatos naturais de origem apatítica, como é o caso do fosfato de Araxá.

Havendo solubilização do fosfato natural, há um aumento da concentração dos produtos da dissolução, Ca e P, nas vizinhanças das partículas de fosfato, tendendo a um equilíbrio que acaba por restringir a própria solubilização dessas partículas. Uma maior remoção de Ca e P faz com que aumente a taxa de dissolução do fosfato natural. Condições que favoreçam o aumento da CTC (maior teor de matéria orgânica, calagem) e a própria cultura

podem exercer papel preponderante na eficiência dos fosfatos naturais, uma vez que atuam como dreno de Ca (Rajan et al., 1996; Novais & Smyth, 1999).

O fator capacidade de P (FCP) do solo exerce grande influência sobre a eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados. Solos que possuem maior capacidade de fixação (elevado FCP), caso daqueles mais argilosos, apresentam menor disponibilidade do P proveniente do fertilizante, isto é, necessitam de maiores quantidades de fertilizantes fosfatados para se obter determinada concentração de P na solução do solo. Por outro lado, esses solos podem estimular a solubilização dos fosfatos naturais, o que não significa aumento de eficiência, uma vez que o próprio solo pode indisponibilizar o P liberado (Novais, 1999). No caso dos fertilizantes solúveis, logo após a aplicação, o P pode ser rapidamente adsorvido pelo solo ou precipitado, formando compostos de menor solubilidade (Lopes & Guilherme, 1992).

O estado de umidade do solo afeta tanto a solubilização dos fosfatos quanto a difusão do P no solo (Tisdale et al., 1993; Rajan et al., 1996). O principal mecanismo de contato íon-raiz para o P é a difusão, a qual é dependente do grau de umidade do solo (Barber, 1980; Malavolta et al., 1997; Anghinoni, 2003). Nesse sentido, as condições climáticas podem influenciar a taxa de liberação de P dos fertilizantes, bem como seu aproveitamento (absorção) pelas plantas, restringindo ou potencializando a eficiência da adubação fosfatada.

A presença de outros elementos como constituintes pode ter influência sobre o desempenho agrônômico dos fosfatos. O silício (Si) é considerado um elemento benéfico ao crescimento das plantas. Além do aspecto nutricional, o Si na forma de silicato, parece afetar a disponibilidade de P (Sanchez & Uehara, 1980). Segundo Tisdale et al. (1993), os óxidos de Fe e Al apresentam alta capacidade de adsorver ânions silicato, assim como ocorre para o fosfato. Uma maior quantidade de silicato no solo aumentaria a disponibilidade de P devido à

competição com os fosfatos pelos sítios carregados positivamente nos óxidos de Fe e Al. Comparativamente a outras fontes de P, o uso do termofosfato magnesiano implica na adição de quantidade expressiva de Si, condição por vezes associada à boa eficiência agronômica normalmente obtida com esse fertilizante.

É preciso considerar, ainda, que existem diferenças entre espécies e entre variedades de uma mesma espécie quanto à capacidade de aproveitar o P do solo e aquele presente nos fosfatos naturais (Sanchez & Uehara, 1980; Rajan et al., 1996; Fageria & Baligar, 1997; Ciarelli et al., 1998; Machado et al., 2001; Fernandes & Muraoka, 2002). Mecanismos diversos têm sido associados às diferenças genotípicas em relação à eficiência de absorção e de utilização de P (Furlani & Machado, 2002). Algumas plantas podem liberar ácidos ou bases alterando o pH da rizosfera, o que interfere na solubilização e biodisponibilidade dos fosfatos. A absorção de grandes quantidades de Ca e a produção de substâncias que formam complexos com Ca também afetam a taxa de dissolução dos fosfatos (Rajan et al., 1996). No caso do milho, a partir de 1990, iniciaram-se programas de melhoramento explorando a variabilidade genética em relação à eficiência nutricional. Como consequência, já se dispõe hoje de genótipos que associam alta produtividade e maior capacidade de aquisição e uso de P. Variações na arquitetura e crescimento radicular e na capacidade de formar associações com fungos micorrízicos parecem estar relacionadas à maior eficiência a fósforo de alguns híbridos de milho desenvolvidos pela Embrapa Milho e Sorgo (Coelho & Alves, 2003).

2.3 Efeito residual

Um aspecto de grande importância na avaliação da eficiência dos fertilizantes fosfatados é seu efeito residual. Quando o solo sofre preparo

periódico, o efeito residual de longo prazo deve ser semelhante, independentemente da forma de aplicação para as fontes solúveis (Goedert & Sousa, 1984). Mesmo para os fosfatos naturais não-reativos, a eficiência aumenta com o tempo e com o revolvimento do solo (Lopes, 1999). De acordo com Sousa et al. (2002), em relação ao efeito obtido no ano da aplicação, o residual de fontes solúveis corresponde a 60%, 45%, 35%, 15% e 5%, respectivamente, no decorrer dos cinco anos seguintes. No caso das fontes de baixa solubilidade, como o fosfato de Araxá, o desempenho melhora até o terceiro ano e começa a decrescer. Os autores destacam ainda que, sob plantio direto, a dissolução dos fosfatos naturais é prejudicada, resultando em rendimento de grãos 50% menor do que o observado com o preparo convencional do solo.

Goedert & Lobato (1984) conduziram um experimento de campo durante oito anos, numa sucessão de cultivos de trigo, soja, soja, arroz, sorgo e capim andropogon (três anos) num latossolo argiloso de cerrado em sistema de preparo convencional. Foram testadas 11 fontes de P aplicadas a lanço no primeiro ano. Foi calculada a eficiência agrônômica das fontes usando-se o superfosfato triplo como referência. A classificação das fontes em ordem decrescente de eficiência foi: termofosfato magnésiano, fosfato de Gafsa, fosfato da Flórida, fosfato de Tennessee, fosfato de Pirocaua (tratamento térmico), fosfato de Patos de Minas, fosfato de Araxá, fosfato Abaeté e fosfato Catalão. Depois do quinto ano de cultivo, os índices foram semelhantes para todos os fosfatos naturais. A solubilidade inicial foi lenta em todas as fontes nacionais.

De acordo com Smyth & Sanchez (1982), o maior tempo de contato solo-fosfato, que causa maior dissolução, também provoca menor disponibilidade de P para as plantas. Com o aumento do tempo de contato, Cantarutti et al. (1981) verificaram decréscimo acentuado na eficiência do fosfato de Araxá como fonte de P para plantas de sorgo. As condições que

favorecem sua maior solubilização geralmente não favorecem a disponibilização do P proveniente dessas fontes para as plantas. Nessas condições, o solo é favorecido como dreno de P e não a planta.

Conforme Rajan et al. (1996), ao contrário de uma única aplicação, quando os fosfatos naturais são aplicados continuamente por vários anos, uma maior fração não dissolvida desses fosfatos pode ser acumulada no solo (mantendo o P protegido das reações de indisponibilização) e, com a dissolução dessa fração, pode-se verificar elevado efeito residual nos anos subseqüentes. Essa prática de manejo certamente minimiza os problemas ligados ao tempo de contato do adubo com o solo e pode contribuir para melhorar o desempenho dos fosfatos naturais em relação às fontes de alta solubilidade.

No caso específico dos fosfatos reativos, o comportamento é bastante diferente em relação aos fosfatos naturais brasileiros, mesmo em solos nos quais foi realizada calagem. Sua eficiência agrônômica apresenta-se similar à obtida com o superfosfato triplo no primeiro ano e maior quando são considerados os efeitos residuais (Kaminski & Peruzzo, 1997; Sousa et al., 2002; Horowitz & Meurer, 2003).

2.4 Adubação fosfatada na cultura do milho

O fósforo é um dos macronutrientes exigidos em menores quantidades pelo milho, superando apenas o enxofre. A cultura extrai cerca de 10 kg de P para cada tonelada de grão produzida. No entanto, de 80 a 90% do P absorvido são exportados com os grãos (Büll, 1993; Coelho & França, 1995), o que indica a necessidade de reposição constante a fim de garantir boas produtividades ao longo do tempo. Conforme estimativas de Coelho & Alves (2003), o milho é a segunda cultura mais adubada no Brasil. Com base nas estatísticas do período

1996-2000, o consumo médio de fertilizantes em áreas de produção de milho correspondeu a 21, 70 e 41 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

Pela análise de vários trabalhos conduzidos no Brasil (Bahia et al., 1973; Yost et al., 1979, 1981; Lopes et al., 1982; Scolari et al., 1982; Souza et al., 1985; Souza et al., 1998; Korndörfer et al., 1999; Prado & Fernandes, 2001), comprova-se que o milho é bastante responsivo à adubação fosfatada e aplicações relativamente pesadas de fertilizantes são frequentemente requeridas. O fornecimento de fósforo representa parte expressiva do custo de produção do milho, especialmente em lavouras conduzidas em nível tecnológico mais alto. Em solos deficientes, mesmo com a aplicação de altas doses de fosfatos, as produtividades dificilmente ultrapassam 6 a 8 t ha⁻¹ de grãos no primeiro cultivo (Coelho & Alves, 2003).

De acordo com esses autores, existe alguma tendência de melhor aproveitamento do P em lavouras conduzidas no sistema de plantio direto, o que redundaria num menor requerimento de fertilizantes fosfatados em comparação às áreas sob preparo convencional. Todavia, não se têm ainda argumentos seguramente comprovados para explicar tal tendência. A definição da quantidade de fósforo a aplicar depende essencialmente da condição de fertilidade do solo e da produtividade almejada. Com base em levantamento considerando vários estudos de campo com a cultura do milho no país, constatou-se que doses variando de 80 a 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅ proporcionaram produtividades máximas de 6 a 11 t ha⁻¹ no sistema de preparo convencional.

No caso de solo com fertilidade já construída, isto é, quando o teor de P no solo está próximo ao nível crítico ou na faixa adequada de disponibilidade, a quantidade de fertilizante fosfatado a ser utilizada pode ser definida apenas visando à reposição do que é exportado nas colheitas (Sousa et al., 2002). Assim, mantém-se a fertilidade do solo para os cultivos seguintes. Esse critério é bastante conveniente sob o aspecto de racionalidade no uso de insumos, uma vez

que, como tudo indica, a aplicação de P em excesso não é uma estratégia interessante técnica ou economicamente.

A diversidade de fertilizantes fosfatados disponíveis, assim como as variações quanto à solubilidade (velocidade de liberação do fósforo) das diferentes fontes, leva à necessidade de definição/confirmação da melhor forma de aplicação desses fertilizantes, a fim de subsidiar os técnicos e agricultores na tomada de decisão para aquisição de insumos e manejo da adubação fosfatada, sobretudo em áreas que já vêm sendo cultivadas há mais tempo e em sistemas de produção que envolvem menor mobilização do solo. O atendimento da demanda da cultura, com um mínimo de fixação de fósforo no solo, deve constituir o foco central para otimização da adubação fosfatada.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 16, n. 3, p. 349-353, set./dez. 1992.

BAHIA, F.; MAGNAVACA, R.; SANTOS, H. L.; SILVA, J.; BAHIA FILHO, A. F. C.; FRANÇA, G. E.; MURAD, A. M.; MACÊDO, A. A.; SILVA, T.; FILHO, E. C. Ensaio de adubação com nitrogênio, fósforo e potássio na cultura do milho em Minas Gerais. I. Análise pela Lei de Mitscherlich. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agronômica*, Brasília, v. 8, n. 8, p. 231-238, 1973.

BARBER, S. A. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 591-615.

BARBOSA FILHO, M. P. Utilização de fosfatos naturais em solos de cerrado. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 28, p. 1-4, dez. 1984.

BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (Ed.). *Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1993. p. 63-145.

CANTARUTTI, R. B.; BRAGA, J. M.; NOVAIS, R. F.; THIÉBAUT, J. T. L. Época de aplicação de fosfato natural em relação a calagem, num solo com elevado teor de alumínio trocável. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 5, n. 2, p. 129-133, maio/ago. 1981.

CIARELLI, D. M.; FURLANI, A. M. C.; DECHEN, A. R.; LIMA, M. Genetic variation among maize genotypes for phosphorus-uptake and phosphorus-use efficiency in nutrient solution. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 21, n. 10, p. 2219-2229, 1998.

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

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Aspectos econômicos da adubação fosfatada para cultura do milho. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 617-621, jul./set. 2001.

PROCHNOW, L. I.; ALCARDE, J. C.; CHIEN, S. H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

 **RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Potafos, 1991. 343 p.**

RAIJ, B. van. Métodos de diagnose de fósforo no solo em uso no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v. 17, n. 5, p. 547-566, 1986.

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

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... Petrolina: SBCS/Embrapa-Cpatsa, 1994. p. 38-40.

SÁ, J. C. M. Adubação fosfatada no sistema de plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

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

SANCHEZ, P. A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 471-514.

SCOLARI, D.; LOBATO, E.; MAGALHÃES, J. C. A. J. Um estudo econômico sobre fósforo e calcáreo em solos de cerrado do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 17, n. 4, p. 505-511, abr. 1982.

SMYTH, 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, n. 2, p. 339-345, Mar./Apr. 1982.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 147-168.

SOUZA, E. C. A.; COUTINHO, E. L. M.; NATALE, W.; BARBOSA, J. C. Respostas do milho à adubação com fósforo e zinco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 33, n. 7, p. 1031-1036, jul. 1998.

SOUZA, E. C. A.; SANTIAGO, G.; OLIVEIRA, L. C. L.; COUTINHO, E. L. M.; LIMA, L. A. Resposta do milho (*Zea mays* L.) à adubação com fósforo e zinco. *Científica*, São Paulo, v. 13, n. 1/2, p. 39-49, 1985.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. *Soil fertility and fertilizers*. 5. ed. Nova York: Macmillan Publishing Company, 1993. 634 p.

YOST, R. S.; KAMPRATH, E. J.; LOBATO, E.; NADERMAN JUNIOR, G. C.; Phosphorus response of corn on an oxisol as influenced by rates and placement. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 43, n. 2, p. 338-343, Mar./Apr. 1979.

YOST, R. S.; KAMPRATH, E. J.; NADERMAN, G. C.; LOBATO, E. Residual effects of phosphorus applications on a high phosphorus adsorbing oxisol of Central Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 45, n. 3, p. 540-543, May/June 1981.

CAPÍTULO 2

Resende, Álvaro Vilela de. **Resposta do milho a fontes e modos de aplicação de fósforo durante três cultivos sucessivos em solo da região do Cerrado.** 2004. p. 25-79. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*

1 RESUMO

O eficiente manejo da adubação fosfatada representa um aspecto fundamental e um desafio para a exploração agrícola contínua dos solos brasileiros. No presente trabalho, objetivou-se comparar fertilizantes fosfatados em diferentes modos de aplicação, durante três cultivos sucessivos de milho, num Argissolo Vermelho que já havia sido adubado anteriormente. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições, num esquema fatorial $4 \times 2 + 1$, envolvendo quatro fontes de P (superfosfato triplo – ST, termofosfato magnesiano – TM, fosfato reativo de Arad – FR e fosfato natural de Araxá – FA), duas formas de aplicação (a lanço em área total ou localizada no sulco de plantio), e uma testemunha (sem P) como tratamento adicional. O fósforo foi fornecido somente no primeiro cultivo, na quantidade de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 , considerando-se os teores totais do nutriente nas fontes. Para os cultivos seguintes, não foi feito preparo do solo, sendo os sulcos de semeadura abertos com enxada, seguindo sua localização original. A cada cultivo foram determinados os teores de nutrientes no solo e nas folhas de milho. Quantificaram-se a produção de biomassa e de grãos e o acúmulo de fósforo na parte aérea e nos grãos. Foram calculados índices de eficiência de absorção e de utilização de P e de produção de grãos. As respostas às combinações de fontes e modos de aplicação de P foram mais discrepantes inicialmente e tenderam à equidade com os cultivos sucessivos. Os tratamentos influenciaram mais a absorção de P do que propriamente a produção de grãos. Nas duas primeiras safras, as fontes de maior solubilidade (ST e TM) ocasionaram as maiores produções. Os fosfatos naturais (FR e FA) apresentaram aumento de eficiência

* Comitê Orientador: Prof. Antônio E. Furtini Neto - UFLA (Orientador)
Prof. Joel Augusto Muniz - UFLA
Prof. Nilton Curi - UFLA
Prof. Valdemar Faquin - UFLA

com o tempo. A aplicação localizada do FR proporcionou alta produtividade na terceira safra. O residual de antigas adubações, a eficiência genotípica e as condições climáticas influenciaram os efeitos dos tratamentos.

2 ABSTRACT

Resende, Álvaro Vilela de. **Maize response to phosphorus sources and application methods during three successive cultivations in soil of the Cerrado region.** 2004. p. 25-79. Thesis (Doctorate in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG*

The efficient use of phosphate fertilizers represents a fundamental aspect and a challenge for the continuous agricultural exploitation of the Brazilian soils. In the present work, we aimed to compare phosphate fertilizers in different application methods during three successive maize cultivations in a Red Argisol which had been previously cultivated and fertilized. A randomized complete block design with four replications was used. Treatments arranged in a 4x2+1 factorial scheme combined four P sources in the amount of 180 kg ha⁻¹ P₂O₅, (triple superphosphate - TS, magnesium termophosphate - MT, Arad reactive rock phosphate - RP, and Araxá rock phosphate - AP), two application methods (broadcasted on the whole area or banded in the seeding furrow), and a check plot (without P) as an additional treatment. The applied P ratio was based on the total P₂O₅ content of each fertilizer. After the first cultivation, the soil was no longer revolved and the seeding furrows were opened manually following their original location. In each cultivation, soil and leaf nutrient concentrations were determined. The biomass production, grain yield, and P accumulation in shoot and grain were quantified. The grain yield, P uptake and use efficiency indices were calculated. The responses to combinations of P sources and application methods were more contrasting initially and tended to level off with successive cultivations. Treatments influenced more the P uptake than the grain yield. In the first two cultivations, the most soluble sources (TS and MT) promoted greater yields. The rock phosphates (RP and AP) presented increased efficiency with time. Banded application of RP provided a higher grain yield in the third cultivation. The residual effect of previous fertilizations, the genetic efficiency in P use, and the climatic conditions influenced the effects of the treatments.

*Guidance Committee: Prof. Antônio E. Furtini Neto - UFLA (Major Professor)
Prof. Joel Augusto Muniz - UFLA
Prof. Nilton Curi - UFLA
Prof. Valdemar Faquin - UFLA

3 INTRODUÇÃO

As explicações para fenômenos estudados de forma isolada nem sempre se confirmam em sistemas abertos. Essa premissa parece aplicar-se especialmente ao caso do fósforo na agricultura. Nesse contexto, freqüentemente, os resultados extrapolam os limites do planejamento e do controle experimental, dificultando sobremaneira o estabelecimento consistente de relações de causa e efeito.

O aspecto que mais se destaca na interação fósforo-solo-plantas é a sua complexidade. Fixando apenas as relações básicas entre esses três componentes, as implicações no desenvolvimento de uma cultura podem resultar em produções bastante variáveis e de difícil predição. É preciso considerar ainda a interferência de outros fatores, como as características e a forma de aplicação dos fosfatos, o histórico da área, o tempo decorrido após a adubação, as diferenças varietais, o clima, o método de preparo do solo e o sistema de produção (Goedert et al., 1986; Novais & Smyth, 1999; Anghinoni, 2003; Prochnow et al., 2003; Sousa & Lobato, 2003).

A propósito, convém lembrar que a complexidade é a regra no dia-a-dia da intervenção agrônoma no manejo das lavouras. Assim sendo, apesar de mais laboriosos, estudos em condições de campo aproximam-se mais da realidade dos sistemas de produção, o que resulta em maior aplicabilidade das informações geradas. No caso específico do uso de fosfatos, experimentos de longa duração são fundamentais para respaldar inferências acerca da eficiência de manejo da adubação, uma vez que permitem contornar problemas relativos às inconstâncias das respostas observadas em anos isolados e avaliar um forte condicionante da eficiência, que é o efeito residual dos tratamentos (Barbosa Filho, 1984; Rajan et al., 1996; Sousa et al., 2002).

Existe certo consenso de que os fosfatos mais solúveis proporcionam maior resposta no ano da aplicação, enquanto os fosfatos naturais têm menor eficiência inicial. Com o tempo, as diferenças de eficiência entre fontes tendem a diminuir (Goedert et al., 1986; Horowitz & Meurer, 2003; Sousa & Lobato, 2003). Por outro lado, a indisponibilização do fósforo liberado ocorre de forma mais intensa no caso das fontes de alta solubilidade em comparação aos fosfatos naturais que, ao liberarem o nutriente de forma mais lenta, minimizam o processo de fixação (Novais & Smyth, 1999). Assim, a eficiência da adubação deverá ser otimizada quando a fonte apresentar liberação gradual de P, mas, em quantidade que atenda à demanda das culturas para produtividades satisfatórias.

A escolha da fonte e do modo de aplicação de fósforo vem sendo estudada há tempos, mas estes ainda representam alguns dos principais questionamentos quando se trata de estratégias de fornecimento do nutriente. A influência do modo de aplicação na resposta da planta, levando em conta as diferenças de solubilidade e de custo dos fosfatos, ainda é motivo de controvérsias entre pesquisadores, principalmente em relação aos fosfatos naturais (Lopes, 1999; Novais, 1999).

Em áreas já adubadas anteriormente, os efeitos da aplicação de fosfatos podem não seguir os padrões das respostas normalmente verificadas em solos virgens. Solos com certa reserva do nutriente tendem a favorecer a equiparação das respostas a distintas estratégias de manejo da adubação fosfatada (Kaminski & Peruzzo, 1997; Anghinoni, 2003). Paralelamente, o advento de sistemas de produção envolvendo novas práticas de manejo do solo, como o plantio direto, pode imprimir alterações na liberação, dinâmica e disponibilidade do P aplicado, comparativamente aos sistemas tradicionais de cultivo, os quais, por sua vez, ainda representam a base do conhecimento em manejo da adubação fosfatada no Brasil. Um diferencial importante é que, em sistemas de cultivo com menor revolvimento do solo, parece ser mais expressiva a participação de formas

orgânicas no estoque de fósforo potencialmente aproveitável pelas culturas (Tokura et al., 2002; Sá, 2003).

O milho é uma planta bastante sensível à baixa disponibilidade de P no solo. As crescentes produtividades alcançadas no país somente são conseguidas com suprimento do nutriente em quantidades compatíveis com a demanda da cultura e, normalmente, aplicações mais pesadas de fosfatos são requeridas (Coelho & Alves, 2003). No entanto, há ainda muita dificuldade em estabelecer recomendações de adubação otimizadas, baseadas em critérios para alta eficiência técnica e econômica.

Neste capítulo, objetivou-se avaliar as respostas do milho à adubação fosfatada com diferentes fontes e modos de aplicação, em solo já cultivado da região do Cerrado, considerando os resultados isolados de três cultivos sucessivos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Boa Vista, município de Itumirim, MG, situado a 21°19'02" de latitude sul e 44°52'14" de longitude oeste, a uma altitude média de 871m. O clima, de acordo com a classificação de Köppen, se encontra no limite entre Cwb e Cwa, caracterizando clima temperado a temperado subtropical, com inverno seco.

A área experimental apresenta Argissolo Vermelho distrófico típico (antigo Podzólico Vermelho-Escuro), textura argilosa. O local foi anteriormente cultivado e adubado, e há cerca de dez anos não era utilizado para lavouras, permanecendo coberto por vegetação espontânea dominada por capim-braquiária (*Brachiaria brizantha*) e servindo ao pastejo bovino. As condições de fertilidade do solo, previamente à instalação do experimento, são expressas na Tabela 1. Salienta-se a baixa disponibilidade de fósforo pelos extratores Mehlich 1 (Alvarez V. et al., 1999) e resina de troca iônica (Raij et al., 1996).

A planta-teste foi o milho, sendo utilizados híbridos triplos desenvolvidos pela Embrapa Milho e Sorgo. Foram conduzidos três cultivos consecutivos em condições de sequeiro, nos anos agrícolas 2000/2001, 2001/2002 e 2002/2003. Os híbridos de milho foram HT 9710-11, HT 7105-3 e BRS 3003, respectivamente, para o primeiro, segundo e terceiro cultivos.

4.1 Delineamento experimental e tratamentos

As parcelas foram delimitadas com área total de 27 m² (4,5 x 6 m), correspondendo a cinco linhas de milho com 6 m de comprimento e 0,9 m espaçadas entre si. Nas avaliações do experimento, foi considerada uma área útil central de 10,8 m² (três linhas de 4 m de comprimento).

O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de um fatorial $4 \times 2 + 1$, combinando quatro fontes de fósforo na dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 (ST - superfosfato triplo, TM - termofosfato magnésiano Yoorin, FR - fosfato reativo de Arad, e FA - fosfato natural de Araxá) e dois modos de aplicação (a lanço

Analises realizadas nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo da UFLA. (1999).
K = extrator Mehlich I; Ca, Mg e Al = extração com KCl mol L⁻¹; Cu, Fe, Mn e Zn = extrator DTPA; B = extração em água quente. Metodologias descritas em Embrapa

5,2	pH (H ₂ O)
2,0	P - Mehlich I (mg dm ⁻³)
7,8	P - Resina (mg dm ⁻³)
34,0	K (mg dm ⁻³)
1,2	Ca (cmol _c dm ⁻³)
0,3	Mg (cmol _c dm ⁻³)
0,5	Al (cmol _c dm ⁻³)
5,0	H+Al (cmol _c dm ⁻³)
1,6	SB (cmol _c dm ⁻³)
2,1	t (cmol _c dm ⁻³)
6,6	T (cmol _c dm ⁻³)
24,2	V (%)
23,8	m (%)
12,4	S - sulfato (mg dm ⁻³)
-0,6	B (mg dm ⁻³)
1,0	Cu (mg dm ⁻³)
46,6	Fe (mg dm ⁻³)
6,4	Mn (mg dm ⁻³)
0,5	Zn (mg dm ⁻³)
16,8	P - remanescente (mg L ⁻¹)
37	Matéria orgânica (g kg ⁻¹)
360	Areia (g kg ⁻¹)
100	Silte (g kg ⁻¹)
540	Argila (g kg ⁻¹)

TABELA 1 Principais atributos químicos e físicos do solo (0-20 cm de profundidade) antes da aplicação dos tratamentos.

em área total e localizada no sulco), mais uma testemunha sem fornecimento de fósforo (tratamento adicional).

A quantidade a aplicar de cada fonte foi calculada com base no teor de P_2O_5 total dos fertilizantes (Tabela 2). Todo o fósforo foi aplicado na época do plantio. No modo de aplicação a lanço, os fertilizantes foram distribuídos manualmente em toda a área da parcela experimental e incorporados, com enxada, a cerca de 10 cm de profundidade. Na aplicação localizada, os fertilizantes foram distribuídos no fundo do sulco de plantio. A adubação fosfatada foi realizada apenas no primeiro cultivo, sendo as colheitas das duas safras subseqüentes resultantes da resposta do milho ao efeito residual dos tratamentos.

TABELA 2 Caracterização química e física dos fertilizantes fosfatados.

Fertilizantes	Características						
	P_2O_5 total	P_2O_5 solúvel	CaO	MgO	SiO ₂	Equivalente CaCO ₃ [#]	Granulometria
	-----%-----						
ST	46,1	38,3*	13,0	-	-	-	Granulado
TM	18,1	17,6**	20,0	7,0	25,0	50	Pó
FR	33,1	9,4**	37,0	-	-	-	Farelado
FA	22,7	4,3**	40,0	-	-	-	Pó

ST – Superfosfato triplo; TM – Termofosfato magnésiano

FR – Fosfato reativo Arad; FA – Fosfato de Araxá

* P_2O_5 solúvel em água ** P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2% (1:100).

[#] Efeito alcalinizante dado em kg CaCO₃ para cada 100 kg do fertilizante.

Por ocasião da instalação do experimento, na safra 2000/2001, foram utilizadas parcelas extras que receberam tratamentos, nos quais a adubação fosfatada foi feita de forma parcelada, ao longo das três safras, de modo que a dose total de 180 kg ha⁻¹ de P_2O_5 foi dividida em aplicações anuais de 60 kg ha⁻¹ de P_2O_5 no sulco de semeadura. Esses tratamentos não foram considerados na avaliação das respostas do milho em anos isolados, uma vez que, nessa

condição, teriam que ser analisados como tratamentos adicionais, o que dificultaria sobremaneira as comparações entre tratamentos. No Capítulo 3, a estratégia de adubação parcelada é apropriadamente avaliada quanto às respostas acumuladas ao final dos três cultivos.

4.2 Plantio e condução do experimento

No primeiro ano, previamente ao preparo do solo, a área recebeu calcário dolomítico em dosagem determinada pelo método da curva de incubação em laboratório ($1,5 \text{ t ha}^{-1}$, PRNT=100%), visando elevar o pH em água para valores próximos de 5,5. O preparo do solo foi feito com aração e gradagens. Cerca de 40 dias após a calagem, foram abertos os sulcos de semeadura com implemento tratorizado, sendo aplicados os tratamentos em seguida.

O preparo do solo foi realizado apenas na primeira safra. Após cada colheita, os restos culturais (parte aérea do milho) foram removidos das parcelas, deixando-se o solo em pousio. Para o segundo e terceiro cultivos, após a dessecação da vegetação espontânea surgida na entressafra, os sulcos de semeadura foram abertos com enxada, seguindo sua localização original.

Na Tabela 3, são descritas a data de plantio e as adubações relativas a cada cultivo. Na definição das quantidades de nutrientes, utilizaram-se informações de análises do solo, tomando-se como referência as recomendações de adubação de milho no estado de Minas Gerais, para expectativas de produtividade acima de 8 t ha^{-1} de grãos (Alves et al., 1999). Dependendo do ano em questão e dos insumos disponíveis, os nutrientes foram fornecidos como fertilizantes simples ou formulados.

As adubações de plantio foram aplicadas no fundo do sulco de semeadura com auxílio de um equipamento manual de distribuição de

fertilizantes. O contato direto do adubo com as sementes foi evitado separando-os com uma fina camada de terra. Foram distribuídas cerca de dez sementes de milho por metro de sulco, com posterior desbaste, deixando-se cinco plantas por metro.

As adubações de cobertura foram iniciadas a partir do estágio de 6 a 8 folhas, com intervalo médio de 10 dias entre aplicações, sendo os fertilizantes aplicados em filete ao lado da linha de plantas, sem incorporação. Procedimentos específicos para o controle de plantas daninhas e de insetos praga foram adotados quando necessário, com o uso de herbicidas e inseticidas apropriados, nas dosagens recomendadas para a cultura do milho.

TABELA 3 Datas de semeadura e adubações de plantio e de cobertura dos três cultivos de milho.

Ano agrícola	Data de plantio	Adubação de plantio (kg ha ⁻¹)					Adubação de cobertura (kg ha ⁻¹)	
		N	K ₂ O	S	B	Zn	N	K ₂ O
2000/01	25/11/00	21 ^a	90 ^b	24 ^{ac}	-	2,0 ^c	56 ^d x 3	3 ^d x 3
2001/02	20/11/01	21 ^a	90 ^b	24 ^{ac}	-	2,0 ^c	78 ^d x 2	4 ^d x 2
2002/03	09/11/02	73 ^e	73 ^e	-	1,2 ^e	3,4 ^e	40 ^e x 2	40 ^e x 2

Fertilizantes: ^a Sulfato de amônio; ^b Cloreto de potássio; ^c Sulfato de zinco; ^d Uréia + Cloreto de potássio; ^e NPK 20-00-20 + B e Zn.

Na Figura 1 são apresentados os dados pluviométricos referentes aos principais períodos de condução do experimento. Visualiza-se a inconstância do regime pluviométrico no primeiro cultivo, com períodos de suprimento subótimo de água, mormente no mês de janeiro, precedendo o florescimento do milho. De modo geral, as condições climáticas durante o segundo e terceiro cultivos foram bem mais favoráveis à cultura, com maior quantidade de chuva e distribuição mais regular em relação ao cultivo inicial.

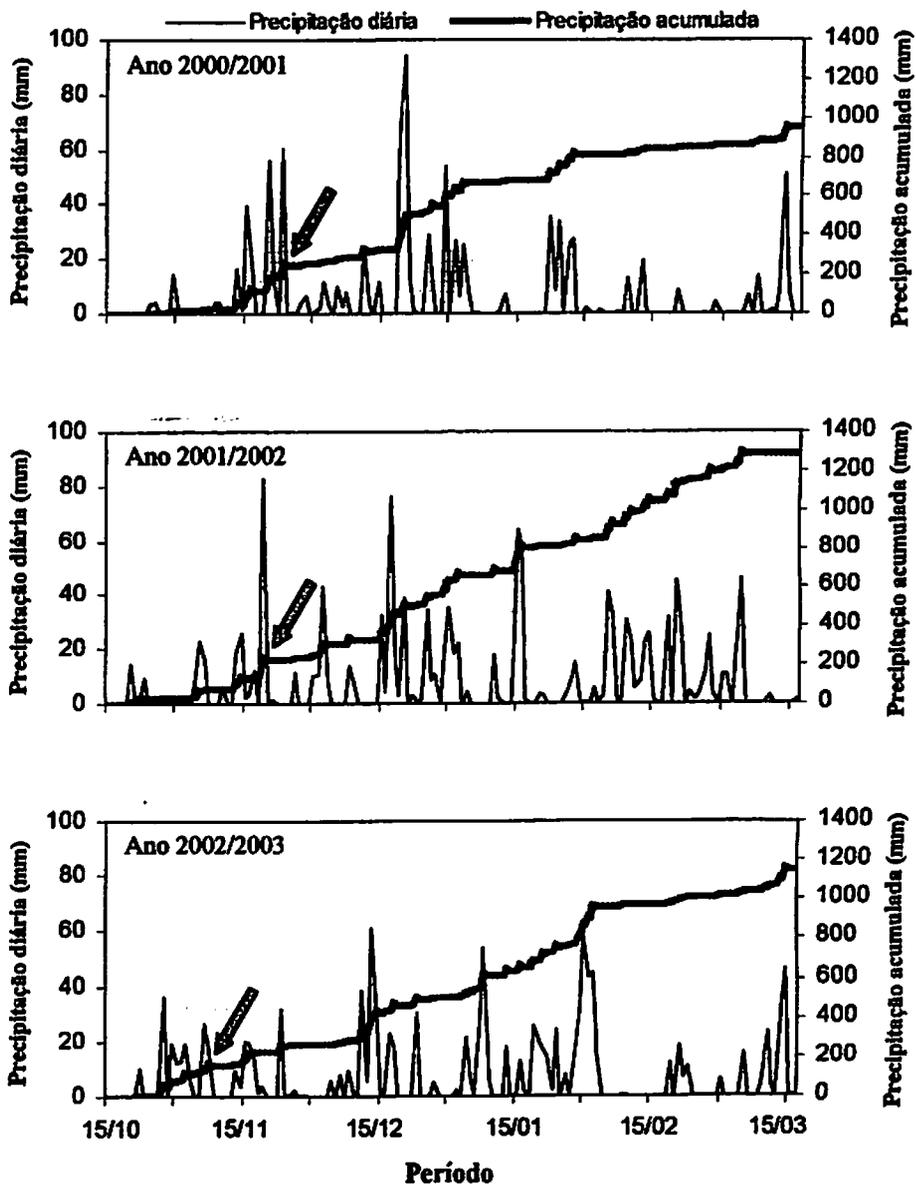


FIGURA 1 Dados pluviométricos referentes aos períodos de condução dos três cultivos de milho (as setas indicam a época da sementeira).

4.3 Colheita e avaliações

Amostras de solo foram coletadas nas parcelas em três ocasiões ao longo do tempo de condução do experimento, visando ao acompanhamento dos efeitos dos tratamentos na profundidade de 0-20 cm. Amostragens foram realizadas nas linhas de plantio, aos 25 e 30 dias após a semeadura do milho no primeiro e segundo cultivos, respectivamente. Após a colheita da terceira safra, foi feita uma amostragem mista, com pontos de coleta nas linhas de plantio e entrelinhas, totalizando dez amostras simples por parcela.

Dados de pH, Ca, Mg, Al e K foram obtidos de acordo com metodologias descritas em Embrapa (1999): pH em água, relação 1:2,5; Ca, Mg e Al trocáveis por extração com KCl mol L⁻¹; K disponível pelo extrator Mehlich-1. O P disponível foi determinado utilizando-se a resina de troca iônica (Raij & Quaggio, 1983).

Nos períodos de florescimento do milho, foram coletadas amostras de folhas (primeira folha oposta e abaixo da espiga, seis folhas por parcela) para a determinação dos teores foliares de macro e micronutrientes, conforme metodologias descritas por Malavolta et al. (1997).

Por ocasião das colheitas, procedeu-se à contagem do número de plantas e de espigas na área útil de cada unidade experimental. As plantas foram cortadas próximo ao solo e as espigas separadas do restante da parte aérea, tomando-se o peso dessas partes e, posteriormente, dos grãos.

Amostras dos grãos foram coletadas para determinação da concentração de nutrientes. Tal análise também foi feita em amostras de folhas, colmo + pendão, palha e sabugo, obtidas de duas plantas e cinco espigas representativas de cada parcela. Considerando-se os teores de P e os pesos secos relativos às diferentes partes da planta, foram calculados os respectivos conteúdos de fósforo (acúmulo).

Determinaram-se índices de eficiência nutricional relacionados à absorção e utilização de fósforo e produção de grãos pelo milho, sob influência das diferentes fontes de P e do modo de aplicação das mesmas. Esses índices foram aplicados aos dados do primeiro e último cultivos, objetivando evidenciar alguma influência das exportações do nutriente em colheitas sucessivas e do tempo de contato dos fosfatos com o solo. Os procedimentos de cálculo, conforme proposto por Moll et al. (1982), são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 Índices de eficiência nutricional.

Índices de eficiência	Formas de cálculo*
Eficiência de absorção – IEA (g kg^{-1})	Pp/Pa
Eficiência de utilização – IEU (kg kg^{-1})	Prod/Pp
Eficiência de produção de grãos – IEP (kg kg^{-1})	Prod/Pg

* Pp = fósforo acumulado na parte aérea; Pa = quantidade de fósforo aplicada; Prod = produção de grãos; Pg = fósforo acumulado nos grãos.

4.4 Análises estatísticas

Os dados experimentais foram submetidos a análises de variância e testes de médias com auxílio do programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000). As médias dos tratamentos componentes do fatorial foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Por meio do teste F ($P \leq 0,05$), obteve-se a significância do contraste comparando a média dos tratamentos do fatorial com a testemunha.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Disponibilidade de nutrientes no solo

Dados de análise de solo dos diversos tratamentos são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7, correspondentes às amostragens realizadas no primeiro, segundo e terceiro cultivos, respectivamente. Conforme esperado, no primeiro ano, os teores de fósforo disponível pela resina de troca iônica foram mais elevados nos tratamentos com aplicação localizada do nutriente e para as fontes ST e TM, de maior solubilidade (Tabela 5). O teor original de P do solo não foi alterado nos tratamentos testemunha e FA aplicado a lanço, sendo a disponibilidade interpretada como baixa, de acordo com Raij et al. (1996) e Sousa et al. (2002). Com o tempo, houve uma tendência de nivelamento dos valores de P disponível entre os tratamentos (Tabelas 6 e 7). Isso pode ser atribuído à ação conjunta de fatores como a extração pelo milho, interação com o solo (fixação) e dinâmica de liberação do P das fontes, fatores estes com graus de interferência variáveis em função dos tratamentos e do tempo decorrido da aplicação dos fosfatos.

De maneira geral, a fertilidade do solo em relação aos nutrientes Ca, Mg e K variou de média a alta, segundo as classes de interpretação de análise de solo indicadas para Minas Gerais (Alvarez V. et al., 1999). É importante destacar que as amostragens nos dois primeiros cultivos foram realizadas na linha de plantio, enquanto que no último cultivo foi feita uma amostragem mista, com pontos de coleta nas linhas e entrelinhas do milho após a colheita. Esses procedimentos justificam os valores relativamente mais altos de pH, Ca e Mg observados na análise ao final das três safras de milho (Tabela 7), uma vez que a adubação de plantio no sulco de semeadura normalmente promove considerável acidificação do meio próximo ao local de aplicação. A variação

nos teores de K, de um ano para outro, deve-se também ao manejo variável do fornecimento do nutriente nos três cultivos (Tabela 3).

TABELA 5 Principais atributos químicos do solo aos 25 dias após a semeadura do milho, no 1º ano do experimento, safra 2000/2001.

Tratamentos	pH água (1:2,5)	P Resina	K	Ca	Mg	Al	H+Al
		.....mg dm ⁻³.....			.....cmol _c dm ⁻³		
Testemunha	4,8	8	196	1,3	0,6	0,6	6,3
ST lanço	5,0	10	206	1,6	0,5	0,5	6,5
TM lanço	5,2	11	232	1,8	0,6	0,4	5,4
FR lanço	5,0	10	224	1,2	0,4	0,6	6,2
FA lanço	4,9	8	182	1,4	0,7	0,6	6,1
ST sulco	5,1	30	157	1,9	0,6	0,4	5,9
TM sulco	5,1	38	171	1,8	1,1	0,3	4,8
FR sulco	5,0	19	185	1,4	0,6	0,5	5,4
FA sulco	4,8	18	184	1,4	0,3	0,6	5,9

Amostragem com pontos de coleta nas linhas de plantio do milho (0-20 cm).
Análises realizadas nos Laboratórios do DCS/UFLA.

5.2 Teores foliares de nutrientes

A adequação dos procedimentos referentes ao manejo da fertilidade do solo durante a condução do experimento é confirmada nos resultados satisfatórios obtidos nas análises foliares do milho (Tabelas 8, 9 e 10). À exceção do fósforo, em geral os teores de macro e micronutrientes situaram-se dentro ou muito próximo das faixas de valores correspondentes ao padrão nutricional de plantas de milho normais (Cantarella et al., 1996; Martinez et al., 1999; Oliveira, 2002).

TABELA 6 Principais atributos químicos do solo aos 30 dias após a semeadura do milho, no 2º ano do experimento, safra 2001/2002.

Tratamentos	pH água (1,2,5)	P resina	K	Ca	Mg	Al	H+Al
		.....mg dm ⁻³.....			.....cmol _c dm ⁻³		
Testemunha	4,7	7	58	0,7	0,3	0,9	7,4
ST lanço	4,8	9	70	0,9	0,4	0,6	6,4
TM lanço	5,0	8	93	1,1	0,4	0,5	5,4
FR lanço	4,9	8	68	0,8	0,3	0,8	6,3
FA lanço	4,9	9	77	1,0	0,5	0,5	5,7
ST sulco	5,1	28	89	1,3	0,4	0,4	5,3
TM sulco	5,0	10	83	1,3	0,5	0,5	5,5
FR sulco	5,0	13	86	1,2	0,4	0,5	5,6
FA sulco	4,8	11	60	0,8	0,3	0,8	7,1

Amostragem com pontos de coleta nas linhas de plantio do milho (0-20 cm).
Análises realizadas nos Laboratórios do DCS/UFLA.

TABELA 7 Principais atributos químicos do solo após a colheita do milho, no 3º ano do experimento, safra 2002/2003.

Tratamentos	pH água (1,2,5)	P resina	K	Ca	Mg	Al	H+Al
		.....mg dm ⁻³.....			.....cmol _c dm ⁻³		
Testemunha	5,2	9	87	1,7	0,9	0,6	5,8
ST lanço	5,0	10	74	1,6	1,2	0,6	6,0
TM lanço	5,1	10	68	1,6	1,1	0,6	5,5
FR lanço	5,1	12	79	1,8	0,5	0,6	6,1
FA lanço	5,2	10	83	1,9	0,9	0,4	5,3
ST sulco	5,1	10	85	1,8	0,7	0,5	5,8
TM sulco	5,3	11	94	2,0	1,1	0,4	5,0
FR sulco	5,2	13	87	2,0	0,7	0,5	5,3
FA sulco	5,0	11	78	1,7	0,8	0,6	6,3

Amostragem com pontos de coleta nas linhas e entrelinhas do milho (0-20 cm).
Análises realizadas nos Laboratórios do DCS/UFLA.

Deve-se notar que, para vários tratamentos, os teores foliares de P ficaram abaixo do limite de $2,5 \text{ g kg}^{-1}$, tido como adequado para o milho em Minas Gerais (Martinez et al., 1999). Entretanto, quase sempre, esses teores superaram o limite mínimo de $1,8 \text{ g kg}^{-1}$, considerado adequado para a cultura em solos de cerrado (Oliveira, 2002). Os menores valores de P foliar foram obtidos no tratamento-testemunha (Tabelas 8, 9 e 10).

As diferenças estatísticas dos teores foliares de P são apresentadas nas Tabelas 1A, 1B, 2B e 3B. Há uma tendência das fontes mais solúveis (ST e TM) aplicadas no sulco de plantio proporcionarem maior concentração de P nas folhas, porém, dependendo do ano de cultivo, alguns tratamentos apresentaram resultados que divergem dessa tendência.

De qualquer forma, é preciso cautela na interpretação dos valores obtidos nas análises foliares. Nem sempre os teores de nutrientes encontrados nas folhas têm relação direta com as produtividades alcançadas. Os efeitos de diluição ou concentração dos nutrientes contidos nas folhas, em virtude de um maior ou menor crescimento vegetativo (Jarrel & Beverly, 1981), são causas freqüentes de conclusões equivocadas acerca do estado nutricional de plantas submetidas a tratamentos que conferem diferenças em produção de biomassa, como é o caso do fornecimento de fósforo. Além disso, os teores foliares de nutrientes podem não correlacionar-se com a disponibilidade dos mesmos no solo, uma vez que a absorção é afetada por diversos outros fatores (Martinez et al., 1999; Oliveira, 2002). Dentre esses fatores, as condições climáticas, a umidade do solo, antagonismos e sinergismos entre nutrientes e diferenças varietais, possivelmente, influenciaram os resultados observados no presente estudo.

TABELA 8 Teores foliares de macro e micronutrientes no florescimento do milho, sob diferentes fontes e modos de aplicação de fósforo (1º ano do experimento, safra 2000/2001).

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	.....g kg ⁻¹.....						.....mg kg ⁻¹				
Testemunha	27,2	1,6	22,3	4,6	2,6	1,5	15	9	125	165	33
ST lanço	28,8	2,3	19,8	6,4	2,7	1,5	16	9	123	157	22
TM lanço	29,6	2,2	20,1	5,5	2,8	1,7	13	8	107	139	24
FR lanço	28,9	2,0	22,0	5,0	2,2	1,6	16	9	106	150	24
FA lanço	30,0	1,8	20,5	5,2	2,5	1,7	12	9	94	144	29
ST sulco	31,1	2,3	21,4	6,1	2,7	1,8	14	9	117	159	15
TM sulco	32,1	2,6	19,8	6,1	3,1	2,0	15	9	101	166	22
FR sulco	28,0	2,1	24,6	5,7	2,8	1,6	20	8	112	151	23
FA sulco	33,0	2,1	24,2	5,7	2,8	1,8	13	9	105	150	30

Análises realizadas nos Laboratórios do DCS/UFLA.

5.3 Crescimento vegetativo e produção do milho

5.3.1 Número de plantas e de espigas

Nos dois primeiros cultivos não foram detectados efeitos significativos dos tratamentos em relação ao número de plantas e de espigas de milho. No terceiro cultivo houve efeito de fontes de P sobre o número de plantas e do modo de aplicação dos fosfatos no número de espigas (Tabela 2A).

A ausência de efeitos nos primeiros cultivos após a aplicação dos tratamentos é um indicativo de que as quantidades de fósforo supridas atenderam às necessidades mínimas do milho para o desenvolvimento da planta e emissão de espiga, inclusive no tratamento-testemunha. Nesse caso, evidencia-se a existência de certa reserva de fósforo no solo, apesar da baixa disponibilidade do nutriente expressa nas análises das amostras coletadas na área antes da instalação do experimento (Tabela 1) e nas parcelas testemunhas (Tabelas 5, 6 e 7).

O uso do fosfato de Araxá parece ter ocasionado uma menor sobrevivência de plantas, reduzindo a população final no terceiro cultivo. Esse efeito foi ainda mais acentuado no tratamento-testemunha, quando comparado à média dos tratamentos com fornecimento de fósforo (Tabela 11). A ocorrência desses resultados, somente no terceiro cultivo de milho, deve-se, provavelmente, à exaustão gradual das reservas de P do solo nos cultivos precedentes e confirma a menor capacidade de liberação do nutriente pelo FA (Barbosa Filho, 1984; Goedert & Lobato, 1984; Raij, 1991; Sousa & Lobato, 2003).

Embora possa ter pouco efeito na produção de grãos do milho (Engelstad & Terman, 1980; Anghinoni, 2003), a pronta disponibilidade de fósforo logo no início do ciclo, em quantidade que atenda à demanda, é fator

TABELA 8 Teores foliares de macro e micronutrientes no florescimento do milho, sob diferentes fontes e modos de aplicação de fósforo (1^a ano do experimento, safra 2000/2001).

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	.....g kg ⁻¹.....						.....mg kg ⁻¹				
Testemunha	27,2	1,6	22,3	4,6	2,6	1,5	15	9	125	165	33
ST lanço	28,8	2,3	19,8	6,4	2,7	1,5	16	9	123	157	22
TM lanço	29,6	2,2	20,1	5,5	2,8	1,7	13	8	107	139	24
FR lanço	28,9	2,0	22,0	5,0	2,2	1,6	16	9	106	150	24
FA lanço	30,0	1,8	20,5	5,2	2,5	1,7	12	9	94	144	29
ST sulco	31,1	2,3	21,4	6,1	2,7	1,8	14	9	117	159	15
TM sulco	32,1	2,6	19,8	6,1	3,1	2,0	15	9	101	166	22
FR sulco	28,0	2,1	24,6	5,7	2,8	1,6	20	8	112	151	23
FA sulco	33,0	2,1	24,2	5,7	2,8	1,8	13	9	105	150	30

Análises realizadas nos Laboratórios do DCS/UFLA.

TABELA 9 Teores foliares de macro e micronutrientes no florescimento do milho, sob diferentes fontes e modos de aplicação de fósforo (2º ano do experimento, safra 2001/2002).

Tratamentos	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	.....g kg ⁻¹.....					.....mg kg ⁻¹			
Testemunha	1,6	17,7	2,7	1,4	1,2	11	90	50	25
ST lanço	2,0	18,3	3,1	1,6	1,8	11	83	53	22
TM lanço	2,1	20,3	2,8	1,9	2,0	9	84	48	23
FR lanço	2,2	19,0	3,0	1,4	1,8	10	101	52	22
FA lanço	1,8	19,0	3,1	1,6	1,9	10	98	55	21
ST sulco	2,4	19,0	3,0	1,5	2,0	9	88	50	24
TM sulco	2,3	24,3	4,0	2,5	1,8	10	76	52	22
FR sulco	1,5	15,7	2,7	1,6	1,3	10	85	49	20
FA sulco	1,7	19,0	3,8	2,0	1,5	11	93	55	18

Análises realizadas nos Laboratórios do DCS/UFLA.

TABELA 10 Teores foliares de macro e micronutrientes no florescimento do milho, sob diferentes fontes e modos de aplicação de fósforo (3^a ano do experimento, safra 2002/2003).

Tratamentos	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	.....g kg ⁻¹.....					.....mg kg ⁻¹			
Testemunha	1,6	23,6	3,4	1,5	2,0	17	108	69	39
ST lanço	1,9	24,2	4,0	1,8	2,2	17	105	67	31
TM lanço	1,9	23,0	3,4	1,8	1,8	13	89	50	27
FR lanço	2,2	25,6	4,2	1,5	2,3	15	128	66	28
FA lanço	2,1	23,6	3,9	1,6	2,1	13	92	56	26
ST sulco	2,4	21,0	4,4	1,8	2,5	14	97	63	27
TM sulco	2,0	19,0	3,8	1,8	1,8	11	72	46	25
FR sulco	1,7	18,9	3,2	1,4	1,6	11	88	50	27
FA sulco	2,0	21,4	3,3	1,4	1,9	13	97	57	36

Análises realizadas nos Laboratórios do DCS/UFLA.

5.3 Crescimento vegetativo e produção do milho

5.3.1 Número de plantas e de espigas

Nos dois primeiros cultivos não foram detectados efeitos significativos dos tratamentos em relação ao número de plantas e de espigas de milho. No terceiro cultivo houve efeito de fontes de P sobre o número de plantas e do modo de aplicação dos fosfatos no número de espigas (Tabela 2A).

A ausência de efeitos nos primeiros cultivos após a aplicação dos tratamentos é um indicativo de que as quantidades de fósforo supridas atenderam às necessidades mínimas do milho para o desenvolvimento da planta e emissão de espiga, inclusive no tratamento-testemunha. Nesse caso, evidencia-se a existência de certa reserva de fósforo no solo, apesar da baixa disponibilidade do nutriente expressa nas análises das amostras coletadas na área antes da instalação do experimento (Tabela 1) e nas parcelas testemunhas (Tabelas 5, 6 e 7).

O uso do fosfato de Araxá parece ter ocasionado uma menor sobrevivência de plantas, reduzindo a população final no terceiro cultivo. Esse efeito foi ainda mais acentuado no tratamento-testemunha, quando comparado à média dos tratamentos com fornecimento de fósforo (Tabela 11). A ocorrência desses resultados, somente no terceiro cultivo de milho, deve-se, provavelmente, à exaustão gradual das reservas de P do solo nos cultivos precedentes e confirma a menor capacidade de liberação do nutriente pelo FA (Barbosa Filho, 1984; Goedert & Lobato, 1984; Raij, 1991; Sousa & Lobato, 2003).

Embora possa ter pouco efeito na produção de grãos do milho (Engelstad & Terman, 1980; Anghinoni, 2003), a pronta disponibilidade de fósforo logo no início do ciclo, em quantidade que atenda à demanda, é fator

preponderante para a obtenção de plantas jovens vigorosas, favorecendo a resistência da cultura a adversidades de origem biótica ou abiótica, o que, em última instância, define a população de plantas na colheita. Nesse aspecto, as fontes ST, TM e FR apresentaram melhor desempenho em relação ao FA, fosfato que caracteriza-se pela baixa capacidade de suprimento de P e lenta solubilização no solo (Novais e Smyth, 1999; Sousa & Lobato, 2003).

TABELA 11 Número de plantas em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3^o cultivo, safra 2002/2003).

Fontes de P	Número de plantas por hectare	
ST	49.190	Ab
TM	51.736	A
FR	48.264	Ab
FA	46.759	B
Testemunha	42.130	**

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

No terceiro cultivo, a aplicação localizada dos fosfatos resultou em número significativamente maior de espigas (48.900) comparativamente à aplicação a lanço (44.155), sendo a média de espigas dos tratamentos com fornecimento de fósforo superior à da testemunha (36.574). Com base nesses dados, verifica-se que os 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ aplicados no primeiro ano ainda permitiram incrementos consideráveis no número de espigas no terceiro cultivo. Pode-se inferir também que a aplicação das fontes de forma localizada no sulco de semeadura deve ter proporcionado maior efeito residual, favorecendo a prolificidade das plantas de milho nesses tratamentos, considerando a condição

de pouco revolvimento do solo (somente abertura de sulcos) e a semeadura sempre em sobreposição à linha de plantio e adubação dos cultivos anteriores.

5.3.2 Peso de plantas

A análise de variância evidenciou interação significativa dos fatores fontes x modos de aplicação de fósforo para o peso de plantas no primeiro e terceiro cultivos, enquanto que no segundo cultivo somente houve efeito de fontes (Tabela 3A).

No primeiro ano, dentro de cada modo de aplicação, não houve diferença entre fontes. Quando aplicados no sulco de plantio, os fosfatos mais solúveis ST e TM promoveram maior produção de matéria seca da parte aérea do milho. Já para os fosfatos naturais FR e FA, a aplicação no sulco ou a lanço não influenciou significativamente essa variável (Tabela 12). No segundo ano, o termofosfato e o fosfato reativo foram as fontes que proporcionaram maior e menor peso de plantas, respectivamente, mas ambas não diferiram estatisticamente do superfosfato triplo e do fosfato de Araxá (Tabela 13). No terceiro cultivo, as respostas aos tratamentos tenderam a igualar-se, à exceção do FR, que apresentou melhor desempenho na aplicação localizada (Tabela 14).

A principal observação a respeito desses resultados é a de que fatores diversos podem ter influenciado o desenvolvimento do milho em termos de acúmulo de matéria seca nos três cultivos. Características de solubilidade relacionadas à natureza das fontes de P, interações distintas fontes-solo nos dois modos de aplicação e condições climáticas variáveis afetaram a disponibilidade do nutriente, interferindo no crescimento da cultura.

TABELA 12 Peso de plantas (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1^o cultivo, safra 2000/2001).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	4.167 a B	4.977 a A
TM	4.074 a B	4.722 a A
FR	4.468 a A	4.259 a A
FA	4.746 a A	4.568 a A
Testemunha	4.136 ns	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

ns = média do tratamento-testemunha não difere em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,05$).

TABELA 13 Peso de plantas (kg ha⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (2^o cultivo, safra 2001/2002).

Fontes de P	Peso de plantas
ST	8.148 ab
TM	8.627 a
FR	6.690 b
FA	6.759 ab
Testemunha	4.290 **

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 14 Peso de plantas (kg ha^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (3^o cultivo, safra 2002/2003).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	6.605 a A	5.278 a A
TM	5.062 a A	6.389 a A
FR	4.884 a B	7.191 a A
FA	5.864 a A	5.926 a A
Testemunha	4.167 **	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

Os dois primeiros anos foram os mais contrastantes em relação à quantidade e uniformidade de distribuição de chuvas durante o ciclo do milho (Figura 1). Na safra 2000/2001, a falta de água limitou seriamente o crescimento (Tabela 12), especialmente na fase de pré-florescimento. Nessa condição, as fontes não diferiram estatisticamente entre si em cada modo de aplicação. Em 2001/2002, a regularidade das chuvas certamente contribuiu para nivelar as respostas aos tratamentos, de forma a não haver efeito do modo aplicação dos fosfatos. Nesse cultivo, as fontes mais solúveis (ST e TM) tenderam a proporcionar maior produção de biomassa (Tabela 13).

Em 2002/2003, o resultado distinto para o FR parece ser devido à peculiaridade da dinâmica de liberação de P desse tipo de fosfato, que tem sua eficiência aumentada nos anos seguintes ao da aplicação (Kaminski & Peruzzo; 1997; Horowitz & Meurer, 2003; Sousa & Lobato, 2003), mesmo em aplicações localizadas, conforme sugere Novais (1999).

5.3.3 Peso de espigas e produção de grãos

Pelas análises de variância, verifica-se que o peso de espigas (Tabela 3A) e a produção de grãos (Tabela 4A) foram influenciados de forma semelhante pelos tratamentos. Nos dois primeiros cultivos, somente houve efeito significativo de fontes de fósforo, enquanto que no terceiro ocorreu interação de fontes x modos de aplicação para essas variáveis.

Corroborando as observações de outros autores sobre fosfatos reativos (Rajan et al. 1996; Kaminski & Peruzzo, 1997; Horowitz & Meurer, 2003; Sousa & Lobato, 2003), o FR proporcionou menores pesos de espigas e de grãos no primeiro cultivo, embora não tenha diferido significativamente das fontes FA e TM. Os melhores resultados foram obtidos com o uso de ST (Tabelas 15 e 16). Na segunda safra, houve uma melhoria de desempenho do fosfato reativo, que não diferiu das demais fontes e apresentou tendência de superar o fosfato de Araxá. Em valores absolutos, a melhor resposta foi observada para o termofosfato (Tabelas 17 e 18). Já no terceiro cultivo, no desdobramento da interação entre os fatores fontes e modos de aplicação, a única diferença estatística detectada entre tratamentos foi a maior produtividade do FR aplicado no sulco, comparativamente à aplicação a lanço (Tabelas 19 e 20). As produções obtidas no tratamento-testemunha foram sempre inferiores àquelas dos tratamentos com fornecimento de fósforo.

Em termos de tendências gerais, numa avaliação das produções de grãos nas três colheitas (Tabelas 16, 18 e 20), pode-se verificar que a aplicação do superfosfato triplo apresentou melhor resposta nas duas primeiras safras, sendo menos efetiva no terceiro cultivo. Inversamente, o desempenho dos fosfatos naturais, notadamente do FR, melhorou seguidamente ao longo dos cultivos. Comparativamente às demais, o termofosfato foi a fonte para a qual os ganhos de produtividade mantiveram-se mais estáveis ao longo do tempo.

TABELA 15 Peso de espigas (kg ha⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (1^o cultivo, safra 2000/2001).

Fontes de P	Peso de espigas
ST	6.319 a
TM	6.030 ab
FR	5.089 b
FA	5.822 ab
Testemunha	4.877 *

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

* = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,05$).

TABELA 16 Produção de grãos (kg ha⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (1^o cultivo, safra 2000/2001).

Fontes de P	Produção de grãos
ST	4.297 a
TM	4.101 ab
FR	3.460 b
FA	3.959 ab
Testemunha	3.316 *

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

* = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,05$).

TABELA 17 Peso de espigas (kg ha⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (2^o cultivo, safra 2001/2002).

Fontes de P	Peso de espigas
ST	11.528 a
TM	11.794 a
FR	10.895 ab
FA	10.324 b
Testemunha	7.901 **

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 18 Produção de grãos (kg ha⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (2^o cultivo, safra 2001/2002).

Fontes de P	Produção de grãos
ST	7.971 a
TM	8.129 a
FR	7.509 ab
FA	7.123 b
Testemunha	5.269 **

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 19 Peso de espigas (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (3º cultivo, safra 2002/2003).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	7.809 a A	8.079 a A
TM	8.148 a A	8.866 a A
FR	7.176 a B	9.506 a A
FA	7.932 a A	8.025 a A
Testemunha	5.370 **	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 20 Produção de grãos (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (3º cultivo, safra 2002/2003).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	5.834 a A	6.042 a A
TM	6.111 a A	6.667 a A
FR	5.301 a B	7.160 a A
FA	5.926 a A	6.019 a A
Testemunha	3.951 **	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

Devido à solubilidade distinta dos quatro fosfatos (Tabela 2), a dinâmica variável que se estabelece nas interações do P com o solo (sob influência da capacidade e velocidade de liberação do nutriente pelas fontes) condiciona a intensidade tanto do suprimento à cultura quanto das reações de indisponibilização de fósforo. Disso resultam diferenças na aquisição de P ao longo do ciclo, com conseqüências sobre a produtividade do milho. Os efeitos desse conjunto de eventos refletem ainda nas taxas de exportação na colheita e no fósforo residual no solo, o que acaba por afetar as produções obtidas com as diferentes fontes nos cultivos subseqüentes.

Nesse contexto, as fontes ST e FR constituem exemplos contrastantes. Tratando-se de uma fonte de alta solubilidade, o superfosfato triplo libera prontamente grande parte do fósforo aplicado, incrementando de forma significativa a fração de P disponível no solo (Prochnow et al., 2003). A absorção pelas raízes é favorecida, da mesma forma que as reações de fixação do nutriente, especialmente nos solos mais oxidicos (Novais & Smyth, 1999). A exportação pode ser maior do que o normal (consumo de luxo) e o P do fertilizante pode passar rapidamente para formas pouco lábeis, com prejuízo da disponibilidade do nutriente para as safras seguintes. Em suma, nos primeiros anos após a aplicação, o ST favoreceria maior produtividade do milho e maiores exportação e fixação do P fornecido. O raciocínio oposto se aplica ao FR. Em virtude da baixa solubilidade, o fosfato reativo libera gradualmente o P, o que pode implicar em menor produção inicial, mas propicia maior efeito de longo prazo, beneficiando os cultivos posteriores (Rajan et al., 1996). O fósforo não solubilizado de forma imediata permaneceria mais protegido das reações com o solo, minimizando o processo de fixação.

No caso do fosfato de Araxá, comprovaram-se as expectativas de baixa capacidade de solubilização e suprimento insuficiente de P para o milho, mesmo

após razoável período de tempo decorrido da aplicação e independentemente da forma de distribuição/incorporação do produto no solo (Tabelas 16, 18 e 20).

Quanto ao termofosfato, a solubilidade intermediária entre o superfosfato triplo e os fosfatos naturais parece ter sido determinante das boas produtividades do milho observadas nas três safras. A liberação de parte do fósforo já no primeiro cultivo, suficiente para atender à demanda do milho, associada ao considerável efeito residual dessa fonte, pode garantir a estabilidade de produção ao longo do tempo. Ademais, os efeitos do termofosfato na elevação do pH e no suprimento de magnésio e silício (Tabela 2) podem ter conferido benefícios adicionais ao milho (Adams, 1980; Goedert et al., 1986; Malavolta & Ponchio, 1987; Tisdale et al., 1993; Malavolta, 2003).

Todas as combinações de fontes e modos de aplicação apresentaram efeito residual marcante, resultando em expressivos ganhos de produtividade em relação à testemunha no terceiro cultivo (Tabela 20). Cabe destacar o fato de que, em valores absolutos, a aplicação localizada de todas as fontes proporcionou maior produtividade (Tabela 20). É provável que, na ausência de preparo do solo, esse modo de aplicação tenha condicionado certa saturação dos sítios de adsorção de P, de maneira a promover maior disponibilidade do nutriente na linha de semeadura do milho, privilegiando a aquisição pelas plantas. Na distribuição e incorporação em área total, há maior dificuldade para as raízes alcançarem o nutriente nas entrelinhas, ao mesmo tempo em que o maior contato com as partículas de solo intensifica os processos de fixação (Novais & Smyth, 1999).

A despeito das marcantes diferenças em termos de reatividade e taxa de liberação de fósforo, características das quatro fontes em estudo (Tabela 3) e há tempos discutidas (Goedert et al., 1986; Raij, 1991; Lopes, 1999; Novais, 1999; Novais & Smyth, 1999; Sousa & Lobato, 2003), chama atenção a relativa similaridade das respostas obtidas a partir das várias combinações dos fatores

testados no presente trabalho (Tabelas 16, 18 e 20). Destacam-se, ainda, os consideráveis níveis de produtividade alcançados, inclusive no tratamento-testemunha.

Portanto, constata-se que as condições de fertilidade da área experimental, já cultivada e adubada anteriormente, diferem do que seria típico em áreas de cerrado recém-abertas, nas quais, sem o fornecimento de fósforo, as produções alcançadas seriam muito pequenas (Sousa & Lobato, 2003). A similaridade de respostas a fontes e modos de aplicação de P tem sido reportada para solos em que a disponibilidade do nutriente já era satisfatória (Kaminski & Peruzzo, 1997; Anghinoni, 2003).

Os resultados aqui apresentados levam a deduzir que, a partir de certo nível de fertilidade do solo, as influências do tipo de fosfato e da forma de aplicação perdem relevância e isso se dá de forma cada vez mais nítida no decorrer de cultivos sucessivos. Aparentemente, um importante aspecto relacionado a esse “nivelamento” dos efeitos dos tratamentos diz respeito ao tamponamento do solo, associado ao fato de que a área já havia sido adubada em épocas passadas. Em outras palavras, apesar das análises de solo serem indicativas de baixa disponibilidade de fósforo (Tabelas 5, 6 e 7; tratamento-testemunha), as reservas do solo, influenciadas pelo residual das antigas adubações, teriam proporcionado condições mínimas de suficiência, de modo a reduzir as discrepâncias de produtividade que deveriam resultar dos tratamentos aplicados.

Situação semelhante foi constatada em solos do Canadá que vinham sendo adubados há vários anos (Roberts, 1994). Observou-se decréscimo na magnitude das respostas que eram inicialmente obtidas com a adubação fosfatada, o que foi atribuído à elevação do nível de fertilidade original dos solos devido ao efeito residual dos fertilizantes. Contudo, tal como no trabalho ora relatado, a condição de melhoria da disponibilidade de P não era confirmada

nos resultados de análise de solo de rotina. Sá (2003) também relata divergências entre as respostas do milho à adubação em solos sob plantio direto e os níveis de disponibilidade de fósforo pelos extratores Mehlich 1 e resina nos Campos Gerais do Paraná.

* Um outro aspecto que merece menção diz respeito ao detalhe da instalação do presente experimento em área já adubada e que não era utilizada para lavouras há alguns anos, estando coberta principalmente por capim-braquiária, gramínea tida como bastante eficiente na absorção de fósforo, inclusive no aproveitamento de fontes pouco solúveis (Goedert et al., 1986; Sousa et al., 2002). A braquiária também foi a vegetação espontânea predominante nos períodos de pousio durante condução do experimento. Esses fatos, associados ao mínimo revolvimento de solo após o primeiro cultivo, podem ter proporcionado uma condição peculiar em que o fósforo convertido para formas orgânicas seria biodisponível e representaria uma fonte importante do nutriente para o milho (Sousa et al., 2002). Condição essa para a qual os extratores Mehlich 1 e resina não seriam sensíveis. Pode-se supor, portanto, que as características do experimento foram algo similares ao que seria típico em áreas sob cultivo mínimo e, dessa forma, o P liberado dos fertilizantes seguiria uma dinâmica diferente do que normalmente ocorreria no sistema com preparo periódico do solo (Tokura et al., 2002; Sá, 2003). Em podzólicos e latossolos sob vegetação de gramíneas forrageiras, Guerra et al. (1996) observaram que o teor de carbono total estava altamente correlacionado com a fração lábil do fósforo orgânico e esta, por sua vez, com o teor de P disponível, reforçando a idéia de que a biodisponibilidade do nutriente não deve ser estritamente ligada às frações inorgânicas.

A eficiência genotípica do milho a fósforo também pode ter contribuído para o referido nivelamento das respostas aos tratamentos. Produtos do melhoramento genético direcionado, alguns híbridos modernos de milho

possuem grande plasticidade, sendo aptos, até certo ponto, a desenvolverem-se e produzir satisfatoriamente sob condições variáveis de disponibilidade de P. Alguns genótipos têm potencial de produzir normalmente em solos nos quais a disponibilidade do nutriente seria limitante para as variedades convencionais (Coelho & Alves, 2003).

Finalmente, é preciso considerar a influência climática nas respostas observadas. No primeiro cultivo, quando teoricamente esperariam-se efeitos mais contrastantes dos tratamentos, uma deficiência hídrica severa durante o ciclo do milho (Figura 1) pode ter nivelado, por baixo (Tabela 16), a produção entre tratamentos que implicariam em diferentes condições de disponibilidade e acessibilidade do fósforo às plantas. A falta de água deve ter prejudicado as respostas principalmente às fontes de maior solubilidade (ST e TM). Situação inversa pode ter prevalecido no segundo cultivo, quando a oferta e a regularidade de chuvas foram altamente favoráveis à cultura, mesmo no tratamento sem fornecimento de fósforo (Tabela 18). A umidade do solo é um fator preponderante para que ocorram a solubilização e a difusão do fósforo no solo (Barber, 1980; Rajan et al., 1996; Malavolta et al., 1997; Anghinoni, 2003), eventos decisivos para que haja resposta das plantas à aplicação de adubos fosfatados.

5.4 Acúmulo de fósforo e eficiência nutricional

5.4.1 Teor e acúmulo de P nos grãos

O teor de fósforo nos grãos foi afetado pela interação dos fatores fontes x modos de aplicação de fósforo nos dois primeiros cultivos e por cada fator, isoladamente, no terceiro cultivo (Tabela 4A).

Diferenças mais evidentes entre tratamentos foram constatadas no primeiro cultivo (Tabela 21). Em geral, o uso da fonte FA e o modo de aplicação a lanço acarretaram menores teores de fósforo nos grãos. Exceção foi o tratamento ST no sulco que, inesperadamente, resultou em baixo teor do nutriente. Já na segunda safra, houve uma tendência de equiparação dos tratamentos, exceto para o FR aplicado no sulco, que ocasionou a menor concentração de P nos grãos (Tabela 22).

TABELA 21 Teor de P nos grãos (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1^o cultivo, safra 2000/2001).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	4,90 a A	3,45 c B
TM	4,00 ab B	5,90 a A
FR	4,18 a B	5,18 ab A
FA	3,00 b B	4,70 b A
Testemunha	3,90 ns	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

ns = média do tratamento-testemunha não difere em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,05$).

No terceiro cultivo, as fontes ST, TM e FR proporcionaram teores mais elevados que o FA e o teor de P nos grãos do tratamento-testemunha foi significativamente inferior à média dos tratamentos com fornecimento do nutriente (Tabela 23). Na média das quatro fontes, a aplicação a lanço proporcionou maior concentração de P ($4,85 \text{ g kg}^{-1}$) que a aplicação localizada ($4,08 \text{ g kg}^{-1}$).

TABELA 22 Teor de P nos grãos (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (2º cultivo, safra 2001/2002).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	3,83 a A	4,13 a A
TM	4,43 a A	3,80 ab A
FR	4,55 a A	2,68 b B
FA	3,83 a A	3,30 ab A
Testemunha	3,35 ns	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

ns = média do tratamento-testemunha não difere em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,05$).

A dificuldade de discriminação dos efeitos de tratamentos entre cultivos pode ter como causa o fato de que os teores de P nos grãos apresentam dependência em relação ao nível de produtividade resultante de cada tratamento. Variações de produtividade podem implicar em diluição ou concentração dos nutrientes presentes nos grãos, gerando aparente inconsistência dos resultados. Prova disso é a testemunha, que apresentou concentração similar de P nos grãos, mas produtividade menor em relação a outros tratamentos. Assim, a avaliação dos teores nos grãos, por si só, não permite conclusões a respeito do aproveitamento do P oriundo das diferentes fontes.

TABELA 23 Teor de P nos grãos (g kg^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3^a cultivo, safra 2002/2003).

Fontes de P	Teor de P nos grãos
ST	4,54 ab
TM	4,84 a
FR	4,48 ab
FA	4,00 b
Testemunha	3,55 **

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

O acúmulo de fósforo nos grãos foi significativamente influenciado pela interação de fontes \times modos de aplicação de fósforo nos dois primeiros cultivos e apenas pelas fontes no terceiro cultivo (Tabela 5A). O tratamento-testemunha apresentou conteúdos de P inferiores à média dos tratamentos do fatorial em todas as safras (Tabelas 24, 25 e 26).

No ano 2000/2001, no modo de aplicação a lanço, o acúmulo de fósforo nos grãos foi maior quando se utilizou o ST e menor no caso do FA. Para as fontes TM e FA, a distribuição no sulco de plantio correspondeu a um maior conteúdo de P nos grãos, situação não verificada para o FR e ST. Para esse último, a aplicação localizada promoveu acúmulo significativamente menor do nutriente (Tabela 24).

O resultado verificado para o ST aplicado no sulco, em princípio, não era esperado. A baixa concentração de Zn observada na análise foliar referente a esse tratamento (Tabela 8) leva a crer que a quantidade relativamente alta de P solúvel aplicada no sulco de semeadura pode ter provocado alguma desordem nutricional relacionada ao balanço P/Zn (Sumner & Farina, 1986), acabando por limitar a própria absorção de fósforo pelo milho.

TABELA 24 Acúmulo de P nos grãos (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1^o cultivo, safra 2000/2001).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	21,0 a A	15,1 b B
TM	15,3 ab B	25,9 a A
FR	15,8 ab A	16,8 b A
FA	11,8 b B	18,4 b A
Testemunha	13,1 *	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

* = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,05$).

TABELA 25 Acúmulo de P nos grãos (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (2^o cultivo, safra 2001/2002).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	30,2 a A	33,2 a A
TM	35,9 a A	30,7 ab A
FR	33,9 a A	20,2 b B
FA	27,1 a A	23,6 b A
Testemunha	17,6 **	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 26 Acúmulo de P nos grãos (kg ha^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3^a cultivo, safra 2002/2003).

Fontes de P	Conteúdo de P nos grãos
ST	26,9 ab
TM	30,8 a
FR	27,4 ab
FA	24,0 b
Testemunha	13,7 **

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

No segundo cultivo, as diferenças de acúmulo de P foram minimizadas. Não houve variação significativa entre fontes aplicadas a lanço. Na aplicação localizada, os fosfatos naturais proporcionaram menor conteúdo de P, sendo que, para o FR, esse efeito foi estatisticamente relevante (Tabela 25).

Nos dois primeiros anos, notam-se baixos conteúdos de P relativos ao FR distribuído no sulco, os quais foram numericamente menores que os valores observados para o FA no mesmo modo de aplicação (Tabelas 24 e 25). Esses resultados suscitam a possibilidade da ocorrência de problemas de solubilização do fosfato reativo quando a aplicação foi concentrada no sulco de plantio.

Considerando que 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 é uma dose relativamente alta, a aplicação dos fosfatos naturais, de forma localizada, parece ter sido crítica para a solubilização, que seria restringida pela saturação de cálcio no ambiente de reação desses adubos no solo (Chien & Menon, 1995; Rajan et al., 1996; Komdörfer et al., 1999; Novais & Smyth, 1999). Segundo Chien et al. (1980), geralmente, a existência de um dreno de cálcio tende a ser mais efetiva na dissolução dos fosfatos de rocha do que o próprio dreno de fósforo.

As diferenças de acúmulo no terceiro cultivo são apresentadas na Tabela 26. As fontes ST, TM e FR proporcionaram conteúdos mais elevados de fósforo nos grãos em comparação ao FA, embora apenas para o TM essa diferença tenha sido significativa. Ressalta-se a equivalência estatística do FR às fontes ST e TM, confirmando os relatos de que, com o tempo, a liberação de P dos fosfatos reativos aumenta e equipara-se ou supera a dos fosfatos mais solúveis (Kaminski & Peruzzo, 1997; Horowitz & Meurer, 2003; Sousa & Lobato, 2003).

Considerando a média dos dois modos de aplicação, há uma tendência da absorção de fósforo do superfosfato triplo, nos três cultivos (18,1; 31,7 e 26,9 kg ha⁻¹), ser inferior àquelas observadas para o termofosfato (20,6; 33,3 e 30,8 kg ha⁻¹). Uma vez que existem diferenças quanto à solubilidade e outras características das fontes (Tabela 2), duas hipóteses podem ser levantadas para explicar esses resultados: a) a maior solubilidade do superfosfato seria um fator de predisposição à fixação de fósforo, favorecendo o dreno-solo em detrimento da planta, ao passo que o termofosfato, ao liberar o nutriente mais lentamente, otimizaria o processo de absorção pelo milho e minimizaria a fixação; b) o pH mais elevado e a presença de mais magnésio e silicato, como conseqüências da reação do termofosfato no solo, seriam fatores favoráveis à absorção do fósforo pelo milho. A natureza alcalina desse adubo contribui para amenizar os processos de acidificação e o silicato pode reduzir a adsorção do fosfato no solo, aumentando a disponibilidade do P aplicado, enquanto o magnésio é tido como nutriente que atua sinergicamente na absorção de fósforo (Adams, 1980; Goedert et al., 1986; Malavolta & Ponchio, 1987; Malavolta, 2003).

As respostas do milho, no que diz respeito ao acúmulo total de fósforo na planta (Tabelas 4B, 5B e 6B), seguem o mesmo comportamento observado para o acúmulo nos grãos, o que era esperado, haja vista que o grão é o dreno preferencial do nutriente na cultura (Büll, 1993; Coelho & França, 1995).

5.4.2 Eficiência de absorção, de utilização e de produção de grãos

A seguir são apresentados os dados de eficiência nutricional a fósforo, referentes ao primeiro e terceiro cultivos, visando estabelecer uma discussão dos resultados obtidos sob condições contrastantes de disponibilidade do nutriente, ou seja, na primeira e última safras avaliadas após a aplicação dos tratamentos. Somente no primeiro ano houve influência significativa da interação de fontes x modos de aplicação na eficiência de absorção e de utilização de P, bem como na eficiência de produção de grãos (Tabela 6A).

No primeiro cultivo, na aplicação a lanço, a maior eficiência de absorção foi obtida com o ST e a menor com o FA. Na aplicação localizada, o TM proporcionou a maior eficiência dentre as quatro fontes (Tabela 27). A forma de distribuição do adubo não afetou a eficiência de absorção de fósforo nos tratamentos com ST e FR.

TABELA 27 Eficiência de absorção de P (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1º cultivo, safra 2000/2001).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	293 a A	230 b A
TM	222 ab B	363 a A
FR	229 ab A	242 b A
FA	180 b B	267 b A

Eficiência de absorção (g kg^{-1}) = P acumulado na parte aérea/P aplicado.

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Conforme já comentado, a elevação do pH do solo e da disponibilidade de magnésio e silício provavelmente está relacionada com a absorção expressivamente maior de fósforo quando o termofosfato foi usado no sulco de plantio.

Surpreende o fato de a absorção do fósforo do superfosfato triplo ter sido numericamente maior na aplicação a lanço em relação à distribuição do adubo no sulco, o contrário ocorrendo para os fosfatos naturais (Tabela 27).

A problemática da relação fósforo/zinco explicaria a situação pertinente ao superfosfato (Büll, 1993). Valores normais dessa relação para a cultura do milho situam-se em torno de 100 (Sumner & Farina, 1986) e para o tratamento ST no sulco o valor foi de 153, indicando condição de insuficiência do micronutriente, o que acaba por limitar o desenvolvimento do milho e a própria absorção de P. Komdörfer et al. (1999) também relataram decréscimo do teor foliar de Zn no milho em função do uso de superfosfato triplo, com possível comprometimento da produção de grãos. Contudo, nos trabalhos realizados em condições de campo no Brasil, não há comprovação de que a interação P x Zn realmente tenha maiores implicações sobre a produtividade do milho (Coelho & Alves, 2003).

No caso dos fosfatos naturais, a explicação mais razoável estaria ligada ao fato de que, dada a lenta e baixa solubilidade dessas fontes, o modo de aplicação localizada teria a vantagem de facilitar a aquisição do “pouco” P disponibilizado em virtude da proximidade do adubo em relação às raízes do milho. Na aplicação em área total, a difusão do nutriente até as raízes seria dificultada pela distância, de forma que uma quantidade ainda menor chegaria até a planta.

No terceiro cultivo, o fosfato de Araxá foi a fonte associada à menor eficiência de absorção, estando as demais equiparadas entre si (Tabela 28). Em relação ao primeiro ano, houve aumento na taxa de aproveitamento de todas as

fontes, principalmente dos fosfatos naturais. Essas constatações são também relatadas por outros autores (Rajan et al., 1996; Kaminski & Peruzzo, 1997; Horowitz & Meurer, 2003; Sousa e Lobato, 2003).

TABELA 28 Eficiência de absorção de P (g kg^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3^o cultivo, safra 2002/2003).

Fontes de P	Eficiência de absorção
ST	384 ab
TM	432 a
FR	390 ab
FA	348 b

Eficiência de absorção (g kg^{-1}) = P acumulado na parte aérea/P aplicado.

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

De qualquer forma, deve-se fazer a ressalva de que, no cálculo da eficiência de absorção proposto por Moll et al. (1982) (Tabela 4), não é descontado o P absorvido das reservas do próprio solo. Assim, considerando que nem todo o P acumulado na planta de milho foi oriundo dos fertilizantes fosfatados, a magnitude dos índices de eficiência de absorção obtidos não reflete unicamente os efeitos dos tratamentos, sendo afetada também pelo residual das abubações feitas previamente à instalação do experimento.

Devido ao forte dreno de fósforo que os grãos representam na planta de milho, pode-se observar que as respostas em eficiência de utilização (Tabelas 29 e 30) e eficiência de produção de grãos (Tabelas 31 e 32) seguem um mesmo padrão frente aos tratamentos. Tanto a eficiência de utilização quanto a de produção de grãos apresentaram relação inversa com a eficiência de absorção de P, ou seja, os tratamentos que propiciaram menor aquisição do nutriente

(Tabelas 27 e 28) foram os que ocasionaram maior eficiência de uso (Tabelas 29, 30, 31 e 32).

Essa constatação é de grande relevância, pois comprova que as diferenças de produtividade que seriam esperadas entre tratamentos foram amenizadas, em parte, pela capacidade dos genótipos de milho otimizarem a produção sob condições mais restritivas de disponibilidade de fósforo, via aumento da taxa de conversão do nutriente absorvido em grãos. De fato, a flexibilidade de ajuste na eficiência de uso de nutrientes e a robustez devem ser características inerentes aos híbridos de milho desenvolvidos para as condições do Cerrado, conferindo-lhes boa adaptação e estabilidade de produção em solos com suprimento subótimo de fósforo (Coelho & Alves, 2003). Por exemplo, a elevada eficiência verificada no tratamento-testemunha, já no terceiro cultivo sem fornecimento de P (Tabelas 30 e 32), é um forte indicativo de que o genótipo de milho utilizado naquela safra efetivamente contribuiu para que as diferenças de produção entre os diversos tratamentos não fossem mais acentuadas (Tabela 20).

É importante relatar ainda que, no terceiro cultivo, houve efeito isolado do modo de aplicação das fontes na eficiência de uso do P. Maior eficiência de utilização e de produção de grãos foi obtida com os fosfatos localizados no sulco de semeadura (217 e 247 kg kg⁻¹, respectivamente) em comparação com a distribuição em área total (189 e 212 kg kg⁻¹, respectivamente). Esses resultados não tiveram relação inversa com a eficiência de absorção, conforme discutido anteriormente. Visto que a aplicação localizada tende a favorecer a aquisição de P, especialmente tratando-se do residual da adubação fosfatada, a explicação parece ser a maior produção verificada na terceira safra nos tratamentos com a aplicação localizada do nutriente (Tabela 20). O valor da produção constitui o numerador nas fórmulas de cálculo da eficiência de utilização e de produção de grãos (Tabela 4).

TABELA 29 Eficiência de utilização de P (kg kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1ª cultivo, safra 2000/2001).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	186 b B	244 a A
TM	217 b A	154 b B
FR	210 b A	170 b B
FA	282 a A	194 ab B
Testemunha	226 ns	

Eficiência de utilização (kg kg^{-1}) = Produção de grãos/P acumulado na parte aérea. Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ns = média do tratamento-testemunha não difere em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,05$).

TABELA 30 Eficiência de utilização de P (kg kg^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3ª cultivo, safra 2002/2003).

Fontes de P	Eficiência de utilização
ST	199 ab
TM	189 b
FR	203 ab
FA	221 a
Testemunha	251 **

Eficiência de utilização (kg kg^{-1}) = Produção de grãos/P acumulado na parte aérea. Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ** = média do tratamento-testemunha difere (>) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 31 Eficiência de produção de grãos (kg kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1^o cultivo, safra 2000/2001).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	205 b B	294 a A
TM	250 b A	171 b B
FR	242 b A	194 b A
FA	341 a A	223 b B
Testemunha	258 ns	

Eficiência de produção de grãos (kg kg^{-1}) = Produção de grãos/P acumulado nos grãos. Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ns = média do tratamento-testemunha não difere em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,05$).

TABELA 32 Eficiência de produção de grãos (kg kg^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3^o cultivo, safra 2002/2003).

Fontes de P	Eficiência de produção de grãos
ST	226 ab
TM	209 b
FR	229 ab
FA	254 a
Testemunha	287 **

Eficiência de produção de grãos (kg kg^{-1}) = Produção de grãos/P acumulado nos grãos. Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ** = média do tratamento-testemunha difere (>) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

5.5 Considerações finais

Resultado interessante relacionado aos tratamentos com fosfatos naturais, notadamente o FR aplicado no sulco, foi o fato de a menor solubilização e conseqüente restrição do acúmulo de P não terem causado grande impacto na produção de grãos. De modo geral, as diferenças entre tratamentos, principalmente nos dois primeiros cultivos, expressaram-se mais na absorção de P do que propriamente na produtividade do milho. Cabe comentar sobre aspectos importantes ligados a essa situação.

A reserva de fósforo no solo, existente previamente à instalação do experimento, parece ter exercido influência no comportamento do milho frente às combinações de fontes e modos de aplicação do nutriente, conferindo padrões de resposta claramente distintos daqueles observados em solos de cerrado recém-abertos. Mesmo que realizadas há muito tempo, as adubações anteriores podem regular a intensidade de resposta do milho, modulando a eficiência de diferentes formas de manejo da adubação fosfatada em patamares muito próximos.

No presente estudo, a inexistência das diferenças acentuadas de resposta, que tipicamente ocorreriam frente aos tratamentos, deveu-se também a fatores ligados ao clima e à eficiência dos genótipos de milho a fósforo. Tais fatores são importantes componentes das condições experimentais, os quais, se por um lado são fontes de interferência e dificultam a discussão, por outro, conferem caráter mais aplicado aos resultados e fornecem boas noções acerca da adubação fosfatada como prática cotidiana na agricultura.

Nesse contexto, é importante frisar também os efeitos do tempo e do número de cultivos que acabam por atenuar, ou mesmo anular, a influência do tipo de fosfato e da forma de aplicação dos mesmos, situação que será

evidenciada na abordagem das respostas acumuladas dos três cultivos no Capítulo 3.

Levando em conta que a utilização em larga escala de fosfatos reativos é relativamente recente na agricultura brasileira, a discussão ora apresentada acrescenta informações que interessam à pesquisa relacionada a novos sistemas de produção.

Além disso, uma vez que o solo não mais foi revolvido após a aplicação dos tratamentos, a não ser para abertura dos sulcos, o manejo adotado na condução do experimento assemelha-se ao cultivo com preparo mínimo do solo. Dessa forma, acredita-se que tais informações seriam pertinentes também ao sistema de plantio direto, com a ressalva de que as linhas de semeadura foram sempre mantidas em seu posicionamento original, coincidindo com o ponto de aplicação dos fosfatos no caso da aplicação localizada (o que não necessariamente ocorre em plantios comerciais).

6 CONCLUSÕES

Nas condições experimentais desse estudo, concluiu-se que:

1. a adubação fosfatada com as quatro fontes, aplicadas em área total ou no sulco de semeadura, proporcionou ganhos de produtividade do milho. As respostas aos tratamentos foram mais discrepantes inicialmente e tenderam a igualar-se com os cultivos sucessivos;
2. nas duas primeiras safras, a interação de fontes e modos de aplicação interferiu na absorção de fósforo, mas não influenciou a produção de grãos, a qual foi afetada somente pelo tipo de fosfato. As fontes de solubilidade mais elevada (superfosfato triplo e termofosfato) ocasionaram maiores produções. Os fosfatos naturais (fosfato de Araxá e fosfato reativo de Arad) apresentaram aumento de eficiência com o tempo, equiparando-se às fontes mais solúveis no terceiro cultivo;
3. o efeito residual variou conforme o tratamento. O fosfato de Araxá apresentou menor potencial de suprimento de fósforo. O uso do termofosfato associou bons rendimentos e estabilidade de produção ao longo do período experimental. Contrariamente ao superfosfato triplo, o fosfato reativo foi a fonte de pior desempenho no ano da aplicação dos tratamentos, porém, apresentando pronunciado efeito residual, propiciou altas produções na terceira safra. A aplicação localizada do fosfato reativo resultou em maior produtividade no terceiro cultivo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, F. Interactions of phosphorus with other elements in soil and in plants. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 655-680.
- ALVAREZ V. , V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, G. E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J. M.; VIEIRA, J. R.; LOUREIRO, J. E. Milho. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. p. 314-316.
- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003**, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM
- BARBER, S. A. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 591-615.
- BARBOSA FILHO, M. P. Utilização de fosfatos naturais em solos de cerrado. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 28, p. 1-4, dez. 1984.
- BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (Ed.). *Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1993. p. 63-145.
- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; CAMARGO, C. E. O. Cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. p. 45-71.

CANTARUTTI, R. B.; BRAGA, J. M.; NOVAIS, R. F.; THIÉBAUT, J. T. L. Época de aplicação de fosfato natural em relação a calagem, num solo com elevado teor de alumínio trocável. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 5, n. 2, p. 129-133, maio/ago. 1981.

CHIEN, S. H.; LÉON, L. A.; TEJADA, H. R. Dissolution of phosphate rocks in acid Colombian soils as related to soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, n. 6, p. 1267-1271, Nov./Dec. 1980.

CHIEN, S. H.; MENON, R. G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application, *Fertilizer Research*, Dordrecht, v. 41, n. 3, p. 227-234, 1995.

COELHO, A. M.; ALVES, V. M. C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003**, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. Nutrição e adubação. *Arquivo do Agrônomo*, Piracicaba, n. 2, p. 1-9, 1995.

EMBRAPA. Embrapa Solos, Embrapa Informática Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

ENGELSTAD, O. P.; TERMAN, G. L. Agronomic effectiveness of phosphate fertilizers. In: **KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J.** (Ed.). *The role of phosphorus in agriculture.* Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 311-332.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4. 0. In: **REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000**, São Carlos, SP. *Programa e resumos...* São Carlos: UFScar, 2000. p. 255-258.

GOEDERT, W. J.; LOBATO, E. Eficiência agrônômica de fosfatos em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 8, n. 1, p. 97-102, jan./abr. 1984.

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Fósforo. In: **GOEDERT, W. J.** (Ed.). *Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo.* São Paulo: Nobel, 1986. p. 129-166.

- GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L.; SANTOS, G. A.; FERNANDES, M. S.** Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 31, n. 4, p. 291-299, abr. 1996.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J.** Eficiência agrônômica de fosfatos naturais. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**, 2003, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.
- JARREL, W. M.; BEVERLY, R. B.** The dilution effect in plant nutrition studies. *Advances in Agronomy*, New York, v. 34, p. 197-224, 1981.
- KAMINSKI, J.; PERUZZO, G.** Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31 p. (Boletim técnico, n. 3).
- KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A.; HOROWITZ, N.** Eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 56, n. 2, p. 391-396, abr./jun. 1999.
- LOPES, A. S.** Fosfatos naturais. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. p. 65-66.
- MALAVOLTA, E.** Fósforo na planta e interação com outros elementos. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**, 2003, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.
- MALAVOLTA, E.; PONCHIO, C. O.** Utilização eficiente do fósforo no sistema solo-planta. In: **SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO**, 1987, São Paulo. Anais.... São Paulo: IBRAFOS, 1987. p. 75-132.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A.** Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B.** Diagnose foliar. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. p. 143-168.

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal, Madison*, v. 74, p. 562-564, May/June 1982.

NOVAIS, R. F. Utilização de fosfatos naturais de baixa reatividade. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.** Viçosa, 1999. p. 62-64.

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

OLIVEIRA, S. A. Análise foliar. In: **SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). Cerrado: correção do solo e adubação.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 245-256.

PROCHNOW, L. I.; ALCARDE, J. C.; CHIEN, S. H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. Anais...** Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Potafos, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. Métodos de análise de solos para fins de fertilidade. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 31 p. (Boletim, n. 81).

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C. A. Interpretação de resultados de análise de solo. In: **RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico, 1996. p. 8-13.

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

ROBERTS, T. L. Do we need more phosphorus calibration work? *Better Crops With Plant Food, Atlanta*, v. 78, n. 2, p. 18-20, 1994.

SÁ, J. C. M. Adubação fosfatada no sistema de plantio direto. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. Anais...** Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. *Informações Agrônomicas*, Piracicaba, n. 102, jun. 2003. 16 p. (Encarte Técnico).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: **SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.)**. *Cerrado: correção do solo e adubação*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 147-168.

SUMNER, M. E.; FARINA, M. P. W. Phosphorus interaction with other nutrients and lime in field cropping systems. *Advances in Soil Science*, New York, v. 5, p. 201-236, 1986. } *07-*

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. *Soil fertility and fertilizers*. 5. ed. Nova York: Macmillan Publishing Company, 1993. 634 p.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C. H.; ALOVISI, A. A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e do tempo de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1467-1476, out. 2002.

CAPÍTULO 3

Resende, Álvaro Vilela de. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado: resposta acumulada de três cultivos.** 2004. p. 81-119. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*

1 RESUMO

O uso eficiente de fertilizantes fosfatados nos solos da região tropical ainda constitui um desafio, principalmente considerando o manejo de longo prazo. Com base nas respostas acumuladas de três cultivos sucessivos de milho, compararam-se alternativas de fornecimento de fósforo, combinando fontes e modos de aplicação do nutriente, num Argissolo Vermelho já adubado em épocas passadas. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições, num esquema fatorial $4 \times 3 + 1$, envolvendo quatro fontes de P na quantidade de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato triplo – ST, termofosfato magnesiano – TM, fosfato reativo de Arad – FR e fosfato natural de Araxá – FA), três formas de aplicação (a lanço em área total no primeiro ano, localizada no sulco de plantio no primeiro ano e parcelada anualmente no sulco) e uma testemunha (sem P) como tratamento adicional. O fósforo foi fornecido considerando-se os teores totais do nutriente nas fontes. Após o primeiro cultivo, não mais foi feito preparo do solo, sendo os sulcos de semeadura abertos com enxada, seguindo sua localização original. Ao final dos três cultivos, foram totalizados a produção de biomassa e de grãos e o acúmulo de fósforo na parte aérea e nos grãos do milho. Foram calculados índices de eficiência de uso do P e de eficiência do fertilizante. Determinaram-se os teores de P residual no solo ao final do experimento. Foram detectadas mais diferenças entre tratamentos em termos de absorção de P do que de produtividade de grãos. A maioria dos tratamentos proporcionou incrementos de produção bastante semelhantes, o que, em parte, foi atribuído ao residual de adubações passadas e à eficiência genotípica do milho a fósforo. As fontes mais solúveis, ST e TM, apresentaram

* Comitê Orientador: Prof. Antônio E. Furtini Neto - UFLA (Orientador)
Prof. Joel Augusto Muniz - UFLA
Prof. Nilton Curi - UFLA
Prof. Valdemar Faquin - UFLA

desempenho similar. Para o FR, maior produção foi obtida com a aplicação parcelada no sulco, o que não se verificou no caso do FA. O parcelamento da dose total das fontes em aplicações anuais não comprometeu a produtividade do milho e propiciou maior efeito residual.

2 ABSTRACT

Resende, Álvaro Vilela de. Phosphorus sources and application methods for maize in soil of the Cerrado region: cumulative response of three cultivations. 2004. p. 81-119. Thesis (Doctorate in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG*

The efficient use of phosphate fertilizers in soils of the tropical region still constitutes a challenge, mainly considering the soil management in the long-run. Based on the cumulative response of three successive maize cultivations, alternatives of phosphorus supply combining P sources and application methods were compared in a Red Argisol which had been previously fertilized. Treatments arranged in a 4x3+1 factorial scheme combined four P sources in the amount of 180 kg ha⁻¹ P₂O₅ (triple superphosphate - TS, magnesium termophosphate - MT, Arad reactive rock phosphate - RP, and Araxá rock phosphate - AP), three application methods (broadcasted in the first year, banded in the seeding furrow in the first year, and annually parceled bands in the seeding furrow), and a check plot (without P) as an additional treatment. The applied P ratio was based on the total P₂O₅ content of each fertilizer. After the first cultivation, the soil was no longer revolved and the seeding furrows were opened manually following their original location. The cumulative biomass production, grain yield, and P accumulation in shoot and grain were determined. Phosphorus use and fertilizer efficiency indices were calculated. Residual available soil P was quantified at the end of the experiment. More differences among treatments were detected in P uptake than in grain yield. Most treatments provided similar yield increments which was partly attributed to the residual effect of previous fertilizations and the genetic efficiency in P use. The most soluble sources, TS and MT, presented comparable performances. Greater yield was obtained with the parceled application of RP in the seeding furrow, unlikely of the other rock phosphate (AP). The parcelling the total dose of fertilizers in annual applications didn't jeopardize the grain yield and propitiated greater residual effect.

*Guidance Committee: Prof. Antônio E. Furtini Neto - UFLA (Major Professor)
Prof. Joel Augusto Muniz - UFLA
Prof. Nilton Curi - UFLA
Prof. Valdemar Faquin - UFLA

3 INTRODUÇÃO

A produção em larga escala, de milho e de outros grãos no Cerrado, somente tornou-se viável com o desenvolvimento de tecnologias de melhoria da fertilidade dos solos da região, os quais são naturalmente muito limitados para a agricultura devido à forte acidez e pobreza generalizada de nutrientes (Lopes, 1983).

Nesse contexto, o adequado fornecimento de fósforo ganha importância, tendo em vista a complexa natureza das interações do nutriente com o solo e a planta. O requerimento de grandes quantidades de fosfatos na correção da fertilidade desses solos e a ausência de reservas abundantes de rochas fosfatadas de boa qualidade no país, associados ao elevado custo dos fertilizantes, justificam estudos para otimizar a eficiência no uso de adubos fosfatados.

De um lado têm-se variações quanto à natureza e à solubilidade de fosfatos naturais e industrializados e, de outro, a interação com os componentes edáficos influenciando fortemente a disponibilização do fósforo às plantas (Horowitz & Meurer, 2003; Prochnow et al., 2003). Além disso, a forma de utilização dos fertilizantes, as características da planta cultivada e as condições climáticas exercem papel regulador das respostas em produção (Goedert et al., 1986; Coelho & Alves, 2003; Sousa & Lobato, 2003).

Os fosfatos solúveis, ao disponibilizarem prontamente o fósforo, têm apresentado bons resultados em diferentes formas de aplicação. Os fosfatos naturais normalmente apresentam menor eficiência agrônômica, em especial no ano da aplicação e para culturas anuais, as quais apresentam alta demanda de P num curto espaço de tempo (Goedert & Lobato, 1984; Goedert et al., 1986; Goedert & Lopes, 1987; Raij, 1991; Sousa & Lobato, 2003). Tem-se evidenciado, também, a existência de diferenças entre os fosfatos naturais importados (reativos) e nacionais quanto ao potencial de suprimento de P. Os

fosfatos reativos parecem bastante promissores para uso direto na adubação em diversas combinações de culturas e sistemas de manejo do solo (Kaminski & Peruzzo, 1997; Horowitz & Meurer, 2003; Sousa & Lobato, 2003). Contudo, não é simples a predição das respostas à adubação com fosfatos naturais no decorrer do tempo. Ao considerar a produção acumulada de vários cultivos após a aplicação, é comum verificar que o desempenho dos fosfatos naturais assemelha-se ao das fontes mais solúveis. Isso se explica pelo fato de o fósforo prontamente liberado dos fertilizantes solúveis passar para formas menos disponíveis, enquanto os fosfatos naturais vão sendo solubilizados no decorrer do tempo (Novais & Smyth, 1999).

Estudos de longo prazo permitem comparar mais adequadamente a eficiência dos fosfatos naturais em relação às fontes de alta solubilidade, como os superfosfatos (Barbosa Filho, 1984; Rajan et al., 1996; Kaminski & Peruzzo, 1997). Contudo, são escassos os experimentos de campo de longa duração, sem os quais não é possível considerar o efeito residual que afeta intensamente a eficiência e economicidade da adubação com diferentes fontes de fósforo (Barbosa Filho, 1984; Sousa & Lobato, 2003). Da mesma forma, poucos são os trabalhos dessa natureza conduzidos em áreas que já receberam adubações anteriores e em sistemas de produção com menor revolvimento do solo.

Neste capítulo, objetivou-se comparar diferentes fontes e modos de aplicação de fósforo em solo da região do Cerrado já adubado anteriormente, considerando as respostas cumulativas obtidas após três cultivos sucessivos de milho.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Boa Vista, município de Itumirim, MG, situado a 21°19'02" de latitude sul e 44°52'14" de longitude oeste, a uma altitude média de 871m. O clima, de acordo com a classificação de Köppen, se encontra no limite entre Cwb e Cwa, caracterizando clima temperado a temperado subtropical, com inverno seco.

A área experimental apresenta Argissolo Vermelho distrófico típico (antigo Podzólico Vermelho-Escuro), textura argilosa. O local foi anteriormente cultivado e adubado e há cerca de dez anos não era utilizado para lavouras, permanecendo coberto por vegetação espontânea dominada por capim-braquiária (*Brachiaria brizantha*) e servindo ao pastejo bovino. As condições de fertilidade do solo, previamente à instalação do experimento, são expressas na Tabela 1. Salienta-se a baixa disponibilidade de fósforo pelos extratores Mehlich 1 (Alvarez V. et al., 1999) e resina de troca iônica (Raij et al., 1996).

A planta-teste foi o milho, sendo empregadas sementes de híbridos triplos desenvolvidos pela Embrapa Milho e Sorgo. Foram conduzidos três cultivos consecutivos em condições de sequeiro, nos anos agrícolas 2000/2001, 2001/2002 e 2002/2003. Os híbridos utilizados foram HT 9710-11, HT 7105-3 e BRS 3003, respectivamente, para o primeiro, segundo e terceiro cultivos. No presente capítulo, são considerados os dados de resposta cumulativa das três safras de milho.

4.1 Delineamento experimental e tratamentos

As parcelas foram delimitadas com área total de 27 m² (4,5 x 6 m), correspondendo a cinco linhas de milho com 6 m de comprimento e 0,9 m

espaçadas entre si. Nas avaliações do experimento, foi considerada uma área útil central de 10,8 m² (três linhas de 4 m de comprimento).

TABELA 1 Principais atributos químicos e físicos do solo (0-20 cm de profundidade) antes da aplicação dos tratamentos.

pH (H ₂ O)	5,2
P – Mehlich 1 (mg dm ⁻³)	2,0
P – Resina (mg dm ⁻³)	7,8
K (mg dm ⁻³)	34,0
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,2
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,3
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,5
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	5,0
SB (cmol _c dm ⁻³)	1,6
t (cmol _c dm ⁻³)	2,1
T (cmol _c dm ⁻³)	6,6
V (%)	24,2
m (%)	23,8
S – sulfato (mg dm ⁻³)	12,4
B (mg dm ⁻³)	0,6
Cu (mg dm ⁻³)	1,0
Fe (mg dm ⁻³)	46,6
Mn (mg dm ⁻³)	6,4
Zn (mg dm ⁻³)	0,5
P – remanescente (mg L ⁻¹)	16,8
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	37
Areia (g kg ⁻¹)	360
Silte (g kg ⁻¹)	100
Argila (g kg ⁻¹)	540

K = extrator Mehlich 1; Ca, Mg e Al = extração com KCl mol L⁻¹; Cu, Fe, Mn e Zn = extrator DTPA; B = extração em água quente. Metodologias descritas em Embrapa (1999).

Análises realizadas nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo da UFLA.

O estudo consistiu da avaliação da resposta do milho ao fornecimento de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, testando-se quatro fosfatos (ST – superfosfato triplo,

TM – termofosfato magnésiano Yoorin, FR – fosfato reativo de Arad, e FA – fosfato natural de Araxá) e três modos de aplicação dos mesmos (a lanço em área total no 1º ano, localizada no sulco de plantio no 1º ano, e parcelada no sulco em três anos). No terceiro modo de aplicação, a dose total de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi dividida em aplicações anuais no sulco de semeadura, fornecendo-se, portanto, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a cada cultivo. O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, combinando as quatro fontes de fósforo e as três formas de aplicação, mais uma testemunha sem fornecimento de fósforo (tratamento adicional). Assim sendo, na análise dos resultados acumulados após três safras, considerou-se o arranjo fatorial 4x3+1.

A quantidade a aplicar de cada fonte foi calculada com base no teor de P₂O₅ total dos fertilizantes (Tabela 2). Na aplicação a lanço, os fertilizantes foram distribuídos manualmente em toda a área da parcela experimental e incorporados, com enxada, a cerca de 10 cm de profundidade. Nas aplicações localizadas, os fertilizantes foram distribuídos no fundo do sulco de plantio.

TABELA 2 Caracterização química e física dos fertilizantes fosfatados.

Fertilizantes	Características						
	P ₂ O ₅ total	P ₂ O ₅ solúvel	Cão	MgO	SiO ₂	Equivalente CaCO ₃ ^a	Granulometria
	-----%-----						
ST	46,1	38,3*	13,0	-	-	-	Granulado
TM	18,1	17,6**	20,0	7,0	25,0	50	Pó
FR	33,0	10,0**	37,0	-	-	-	Farelado
FA	22,7	4,3**	40,0	-	-	-	Pó

ST – Superfosfato triplo; TM – Termofosfato magnésiano

FR – Fosfato reativo Arad; FA – Fosfato de Araxá

* P₂O₅ solúvel em água ** P₂O₅ solúvel em ácido cítrico a 2% (1:100).

^a Efeito alcalinizante dado em kg CaCO₃ para cada 100 kg do fertilizante.

4.2 Plantio e condução do experimento

No primeiro ano, previamente ao preparo do solo, a área recebeu calcário dolomítico em dosagem determinada pelo método da curva de incubação em laboratório ($1,5 \text{ t ha}^{-1}$, PRNT=100%), visando elevar o pH em água para valores próximos de 5,5. O preparo do solo foi feito com aração e gradagens. Cerca de 40 dias após a calagem, foram abertos os sulcos de semeadura com implemento tratorizado, sendo aplicados os tratamentos em seguida.

O preparo do solo foi realizado apenas na primeira safra. Após cada colheita, os restos culturais (parte aérea do milho) foram removidos das parcelas, deixando-se o solo em pousio. Para o segundo e terceiro cultivos, após a dessecação da vegetação espontânea surgida na entressafra, os sulcos de semeadura foram abertos com enxada, seguindo sua localização original. As parcelas referentes aos tratamentos com adubação fosfatada parcelada receberam os fosfatos concomitantemente à adubação de base.

Na Tabela 3, são descritas a data de plantio e as adubações relativas a cada cultivo. Na definição das quantidades de nutrientes, utilizaram-se informações de análises do solo, tomando-se como referência as recomendações de adubação de milho no estado de Minas Gerais, para expectativas de produtividade acima de 8 t ha^{-1} de grãos (Alves et al., 1999). Dependendo do ano em questão e dos insumos disponíveis, os nutrientes foram fornecidos como fertilizantes simples ou formulados.

As adubações de plantio foram feitas no fundo do sulco de semeadura, com o auxílio de um equipamento manual de distribuição de fertilizantes. O contato direto do adubo com as sementes foi evitado separando-os com uma fina camada de terra. Foram distribuídas cerca de dez sementes de milho por metro de sulco, com posterior desbaste, deixando-se cinco plantas por metro.

4.3 Colheita e avaliações

Por ocasião da colheita de cada cultivo, as plantas foram cortadas próximo ao solo, tomando-se o peso da parte aérea (exceto espiga) e, posteriormente, dos grãos. Amostras dos grãos foram tomadas para determinação da concentração de P conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). Tal análise também foi feita em amostras de folhas, colmo + pendão, palha e sabugo, obtidas de duas plantas e cinco espigas representativas de cada parcela. Considerando-se os teores de P e os pesos secos relativos às diferentes partes da planta, foram calculados os respectivos conteúdos de fósforo.

Os dados de produção e de conteúdo (acúmulo) de fósforo nas plantas de milho foram totalizados, calculando-se os resultados cumulativos obtidos após os três cultivos. O acúmulo total equivale, portanto, à absorção total ou extração de fósforo durante os três cultivos. A proporção de fósforo contida nos grãos, em relação ao que foi absorvido, corresponde à redistribuição do nutriente na planta de milho. Cálculos da remoção de fósforo com a colheita dos grãos foram feitos em referência à quantidade de P exportada por hectare e por tonelada de grãos.

Determinaram-se índices de eficiência nutricional relacionados à absorção e utilização de fósforo e à produção de grãos pelo milho. Foi obtido também o índice de eficiência do fertilizante. Os procedimentos de cálculo, conforme proposto por Moll et al. (1982), são apresentados na Tabela 4.

Para a determinação do índice de eficiência do fertilizante foi descontado, dos tratamentos com fornecimento de P, o valor da produção obtida na testemunha, de modo a eliminar o efeito do fósforo suprido pelo próprio solo na produtividade do milho. A eficiência de absorção foi calculada de duas maneiras, descontando-se, ou não, a contribuição das reservas de P do solo para

a absorção total do nutriente (absorção no tratamento com fosfato – absorção na testemunha). Tal procedimento permitiu evidenciar como a eficiência de absorção foi afetada especificamente pelos tratamentos com fornecimento de P.

TABELA 4 Índices de eficiência nutricional e de eficiência do fertilizante.

Índices de Eficiência	Formas de cálculo*
Eficiência de absorção – IEA (g kg^{-1})	Pp/Pa
Eficiência de utilização – IEU (kg kg^{-1})	Prod/Pp
Eficiência de produção de grãos – IEP (kg kg^{-1})	Prod/Pg
Eficiência do fertilizante – IEF (kg kg^{-1})	Prod/Pa

* Pp = fósforo acumulado na parte aérea; Pa = quantidade de fósforo aplicada; Prod = produção de grãos; Pg = fósforo acumulado nos grãos.

Após a colheita da terceira safra, foi feita amostragem de solo para análise, na profundidade de 0-20 cm, com pontos de coleta nas linhas e entrelinhas, totalizando dez amostras simples por parcela. O fósforo foi determinado com o uso da resina de troca iônica (Rajj & Quaggio, 1983), de forma a quantificar o P disponível residual referente a cada tratamento.

4.4 Análises estatísticas

Os dados experimentais foram submetidos a análises de variância e testes de médias com auxílio do programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000). As médias dos tratamentos componentes do fatorial foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Por meio do teste F ($P \leq 0,05$), obteve-se a significância do contraste comparando a média dos tratamentos do fatorial com a testemunha.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Produção de biomassa e de grãos

Houve interação de fontes e modos de aplicação de fósforo sobre o peso de plantas e a produção de grãos, totalizados ao final dos três cultivos de milho (Tabela 7A). As duas variáveis foram influenciadas de forma semelhante pelos tratamentos (Tabelas 5 e 6).

TABELA 5 Peso de plantas (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (acumulado de três cultivos).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	19.167 a A	18.156 a A	18.079 ab A
TM	17.500 a A	20.000 a A	17.593 ab A
FR	15.556 a B	18.627 a AB	20.185 a A
FA	17.431 a A	17.191 a A	16.150 b A
Testemunha	12.539 **		

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

Não houve diferença significativa entre fontes, considerando o modo de aplicação a lanço ou no sulco. Quando a adubação no sulco foi parcelada, o fosfato reativo (FR) e o fosfato de Araxá (FA) foram as fontes que proporcionaram, respectivamente, a maior e a menor produção de grãos, mas ambas não diferiram estatisticamente do superfosfato triplo (ST) e do termofosfato (TM) (Tabela 6). Todavia, é preciso ponderar que, apesar de

determinados tratamentos terem sido considerados iguais segundo os critérios estatísticos, as produções correspondentes variaram em mais de 1,5 t ha⁻¹ de grãos (Tabela 6), o que, em termos práticos, é uma diferença considerável.

TABELA 6 Produção de grãos (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (acumulada de três cultivos).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	17.998 a A	18.413 a A	17.786 ab A
TM	18.065 a A	19.171 a A	17.609 ab A
FR	16.476 a B	17.925 a AB	19.433 a A
FA	16.920 a A	17.189 a A	15.827 b A
Testemunha	12.535 **		

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

Somente para o FR, a produção de biomassa e o rendimento de grãos dependeram de como o adubo foi distribuído. Melhores respostas foram obtidas conforme a seqüência dos modos de aplicação: a lanço em área total < localizada no sulco < parcelada no sulco (Tabelas 5 e 6). Na condição parcelada, o FR tendeu a superar as fontes mais solúveis ST e TM. A explicação provável desse resultado deve estar associada às características peculiares de solubilidade e à dinâmica de liberação de fósforo do fosfato reativo. Os fosfatos reativos caracterizam-se por apresentar solubilidade intermediária entre os fosfatos acidulados (ex: ST) e os fosfatos naturais brasileiros (ex: FA), o que lhes confere capacidade de liberação gradual do fósforo no solo. Essa liberação se dá por meio de processos semelhantes àqueles que controlam a solubilização

dos fosfatos naturais brasileiros, porém, de forma mais intensa (Rajan et al., 1996; Novais & Smyth, 1999; Horowitz & Meurer, 2003).

A aplicação e incorporação do FR a lanço em área total não foi a melhor opção, possivelmente devido ao contato do adubo com maior volume de solo ocasionar a fixação do fósforo liberado, antes que o nutriente pudesse ser absorvido pelo milho. Segundo Novais & Smyth (1999), essa situação é típica nos solos tropicais mais intemperizados, nos quais os componentes do solo representam o dreno preferencial de P e a aplicação a lanço pode não ser adequada para atender à demanda da planta. A limitada velocidade de dissolução do FR, associada à dependência do processo de difusão para que ocorra o contato com a raiz, faz com que a interação com o solo seja mais crítica, principalmente no caso do fosfato disposto na entrelinha do milho, longe das raízes. A adsorção atua mais rapidamente do que difusão na depleção do fósforo liberado para a solução do solo, principalmente nos solos com forte caráter-dreno de P (Novais & Smyth, 1999).

A distribuição do FR de forma localizada no sulco de semeadura e, todo de uma só vez, também não foi alternativa favorável à obtenção de maior rendimento de grãos. A dose utilizada (180 kg ha^{-1} de P_2O_5), provavelmente, ocasionou elevada concentração dos produtos da dissolução, Ca^{2+} e H_2PO_4^- , saturando o ambiente de reação do fosfato e acabando por restringir a própria solubilização. A existência de componentes do solo, ou plantas, atuando como drenos de fósforo e, principalmente de cálcio, é tida como fator preponderante para a dissolução e efetividade dos fosfatos naturais (Chien et al., 1980; Chien & Menon, 1995; Rajan et al., 1996; Novais & Smyth, 1999), mormente os reativos (Robinson et al., 1992). Nesse particular, é interessante notar que o milho não parece ser um dreno-Ca tão eficiente quanto outras culturas, como a soja (Raij & Van Diest, 1979). Ao que tudo indica, a saturação do meio com cálcio impediu maior disponibilização de fósforo do FR para o milho nesse

tratamento, sobretudo nos dois primeiros cultivos (Capítulo 2), quando o sistema solo-planta não representou um dreno-Ca suficientemente forte para estimular a dissolução do fosfato.

Quando a aplicação do FR no sulco foi parcelada, obteve-se a melhor resposta em produção do milho. Aparentemente, o fornecimento de apenas 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a cada cultivo não comprometeu a solubilização do fosfato e o P liberado próximo à zona de crescimento das raízes do milho foi suficiente para atender à demanda da cultura nas condições de solo da área experimental. O mesmo não ocorreu com o uso do FA, evidenciando grande diferença entre os dois fosfatos nesse modo de aplicação.

Na realidade, a produção final proporcionada pelo FA foi semelhante nos três métodos de aplicação, indicativo de que a limitada solubilidade deve ter sido o principal fator condicionante da eficiência dessa fonte, independente do manejo da adubação. Em se tratando dos fosfatos naturais brasileiros, o revolvimento do solo constitui uma prática fundamental para o aumento da eficiência com o passar do tempo. Portanto, em sistemas de produção que não envolvem preparo do solo, não deve-se esperar que a melhoria de desempenho do fosfato de Araxá seja similar à obtida com o preparo convencional (Lopes, 1999, Sousa & Lobato, 2003).

Apesar dos presumíveis efeitos contrastantes dos tratamentos na disponibilização de fósforo para a cultura, é nítida a tendência de nivelamento das respostas acumuladas após três safras de milho (Tabela 6), principalmente quando o nutriente foi aplicado todo de uma só vez no primeiro cultivo (modos de aplicação “lanço” e “sulco”). As respostas cumulativas expressaram bem a tendência que vinha sendo delineada nos resultados isolados observados ao longo dos três cultivos (Capítulo 2), qual seja, com o tempo, os efeitos de fontes e modos de aplicação de fósforo perdem importância e praticamente anulam-se as diferenças iniciais entre tratamentos. A ocorrência de diferenças estatísticas

nos dados relativos à adubação parcelada reforça a idéia de que os efeitos são mais contrastantes quando as respostas são avaliadas próximo ao momento da aplicação dos fosfatos.

Essas considerações são concordantes com os padrões normalmente encontrados em estudos de longa duração. Confirmaram-se as premissas de que fontes mais solúveis proporcionam maior ganho inicial de produtividade, ao passo que o prolongado efeito residual das fontes de menor solubilidade pode, com o tempo, compensar a defasagem em relação às primeiras, notadamente no caso dos fosfatos reativos (Kaminski & Peruzzo, 1997; Horowitz & Meurer, 2003; Sousa & Lobato, 2003).

Para Novais & Smyth (1999), não há aumento de eficiência de fosfatos naturais com o tempo de contato do produto com o solo. Para que a planta fosse beneficiada nessa situação, indicando aumento da eficiência, a taxa de liberação de P dos fosfatos deveria superar a taxa de formação de P não-lábil no solo. Na verdade, o que ocorre é uma redução gradativa da efetividade das fontes, tão mais intensa quanto maior a reatividade (solubilidade) do fosfato. Assim, a dita “melhoria da eficiência de fosfatos naturais com o aumento do tempo de contato com o solo” deve-se, na realidade, ao fato de que a diminuição da eficiência com o tempo ocorre de forma mais pronunciada para as fontes mais solúveis.

É preciso perceber, ainda, que um maior ou menor efeito residual de fontes solúveis resulta do grau de solubilidade dos produtos das reações do P dissolvido do fertilizante com os componentes do solo. No caso dos fosfatos naturais, o efeito residual é ditado pela taxa de dissolução e pela permanência do próprio fosfato natural no solo ao longo do tempo (Rajan et al., 1996).

É importante ressaltar que as condições de fertilidade do solo, previamente à instalação do experimento, também devem ter contribuído de forma expressiva para o nivelamento dos efeitos de tratamentos. Prova disso é a considerável magnitude das produções observadas no tratamento-testemunha



(Tabelas 5, 6 e 7B) e nos tratamentos com aplicação de fosfatos naturais em apenas um terço da dose total a cada cultivo (Tabela 7B). Certamente, tais resultados somente foram possíveis devido às reservas já existentes no solo. Apesar de os extratores Mehlich-1 e resina não terem sido sensíveis à presença dessas reservas (Tabela 1), esse argumento é bastante razoável, tendo em vista o fato de a área ter recebido adubações em épocas passadas.

Em solos com elevado FCP, como no caso do presente trabalho (P-remanescente = $16,8 \text{ mg L}^{-1}$), o nível de fertilidade original pode ser determinante da eficiência dos fosfatos naturais, à semelhança do que ocorre para as fontes solúveis. Segundo Rajan et al. (1996), teoricamente, após a dissolução do fosfato natural (favorecida pela baixa concentração de P na solução do solo – elevado FCP), o P é fixado imediatamente se a disponibilidade do nutriente estiver abaixo do nível crítico, mas permanece mais disponível se o solo já tiver certa reserva do nutriente. Isso explicaria o desempenho relativamente satisfatório observado para os fosfatos naturais, mesmo o FA, nas condições deste estudo.

Além disso, pode-se inferir que o grau de tamponamento do solo em questão proporcionou disponibilidade de P compatível com a exigência do milho para os níveis de produtividade obtidos no tratamento-testemunha, sem reduzir os teores originais do nutriente com os cultivos (Tabela 8B). Essa situação coaduna com a hipótese levantada no Capítulo 1, relativa à influência da presença do capim-braquiária e do revolvimento mínimo do solo na área experimental, resultando em maior biodisponibilidade de fósforo (Goedert et al., 1986; Sousa et al., 2002; Sá, 2003; Sousa & Lobato, 2003). Nesse contexto, é plausível a hipótese de que tenha sido substancial a participação de formas orgânicas no suprimento total do nutriente para o milho.

A influência climática foi outro fator condicionante das respostas da cultura, conforme evidenciado pelos tetos de produtividade muito distintos

Pela análise dos dados de extração e exportação de P por hectare (Tabela 7), verifica-se que houve importante restrição no suprimento do nutriente no tratamento-testemunha. A amplitude relativamente pequena dos valores de P exportado, referentes aos tratamentos com fornecimento de P (63,7 a 86,2 kg ha⁻¹), está coerente com a semelhança das produtividades obtidas. No modo de aplicação parcelada, as fontes não diferiram entre si. De maneira geral, quando o fósforo foi fornecido todo no primeiro ano ("lanço" e "sulco"), as fontes mais solúveis, ST e TM, favoreceram maior exportação do nutriente. Tendo em vista que as produtividades obtidas nesses dois modos de aplicação não diferiram significativamente entre os quatro fosfatos (Tabela 6), pode-se supor que houve consumo de luxo no caso das fontes de maior solubilidade.

A exportação de P com o uso do FR variou conforme o modo de aplicação (Tabela 7). Para explicação da resposta ao FR parcelado, são válidos os argumentos já expostos na discussão das variáveis de produção. Ressalva deve ser feita quanto à tendência de menor absorção de P com a aplicação no sulco em relação à distribuição a lanço, contrária à tendência verificada para a produção de grãos (Tabela 6).

Uma possível justificativa estaria relacionada à maior acessibilidade ao nutriente e à facilidade de absorção propiciada pela aplicação localizada do fosfato na linha de plantio. Melhores condições de absorção na fase inicial de desenvolvimento do milho podem definir maior produção mesmo que a absorção total, ao final do ciclo, não seja elevada. Na aplicação a lanço, a aquisição de P seria mais dependente do crescimento radicular e boa parte da absorção total ocorreria numa idade mais avançada da planta, com prejuízo da produtividade. Segundo Fancelli & Dourado Neto (1996), o potencial de produção do milho é definido muito cedo, no estágio fenológico 2, quando a quarta folha está completamente desenvolvida. O número de fileiras de grãos e o tamanho da espiga são definidos, respectivamente, nos dois estádios

TABELA 7 Extração de P pelo milho e exportação de P nos grãos em função de fontes e modos de aplicação de fósforo (acumuladas de três cultivos).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
.....Extração de P (kg ha ⁻¹).....			
ST	90,3 a A	85,6 b A	91,7 ab A
TM	94,3 a A	99,1 a A	85,2 ab A
FR	85,8 ab AB	76,5 b B	97,2 a A
FA	73,9 b A	76,7 b A	77,6 b A
Testemunha	50,5 **		
.....Exportação de P (kg ha ⁻¹).....			
ST	79,6 a A	73,5 ab A	79,3 a A
TM	83,3 a A	86,2 a A	73,9 a A
FR	76,5 ab AB	64,8 b B	81,5 a A
FA	63,7 b A	65,0 b A	67,5 a A
Testemunha	44,4 **		
.....Exportação de P (kg t ⁻¹).....			
ST	4,4 a A	4,0 ab A	4,4 a A
TM	4,6 a A	4,5 a A	4,2 a A
FR	4,7 a A	3,6 b B	4,2 a A
FA	3,8 b A	3,8 b A	4,3 a A
Testemunha	3,6 **		

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

Pela análise dos dados de extração e exportação de P por hectare (Tabela 7), verifica-se que houve importante restrição no suprimento do nutriente no tratamento-testemunha. A amplitude relativamente pequena dos valores de P exportado, referentes aos tratamentos com fornecimento de P (63,7 a 86,2 kg ha⁻¹), está coerente com a semelhança das produtividades obtidas. No modo de aplicação parcelada, as fontes não diferiram entre si. De maneira geral, quando o fósforo foi fornecido todo no primeiro ano (“lanço” e “sulco”), as fontes mais solúveis, ST e TM, favoreceram maior exportação do nutriente. Tendo em vista que as produtividades obtidas nesses dois modos de aplicação não diferiram significativamente entre os quatro fosfatos (Tabela 6), pode-se supor que houve consumo de luxo no caso das fontes de maior solubilidade.

A exportação de P com o uso do FR variou conforme o modo de aplicação (Tabela 7). Para explicação da resposta ao FR parcelado, são válidos os argumentos já expostos na discussão das variáveis de produção. Ressalva deve ser feita quanto à tendência de menor absorção de P com a aplicação no sulco em relação à distribuição a lanço, contrária à tendência verificada para a produção de grãos (Tabela 6).

Uma possível justificativa estaria relacionada à maior acessibilidade ao nutriente e à facilidade de absorção propiciada pela aplicação localizada do fosfato na linha de plantio. Melhores condições de absorção na fase inicial de desenvolvimento do milho podem definir maior produção mesmo que a absorção total, ao final do ciclo, não seja elevada. Na aplicação a lanço, a aquisição de P seria mais dependente do crescimento radicular e boa parte da absorção total ocorreria numa idade mais avançada da planta, com prejuízo da produtividade. Segundo Fancelli & Dourado Neto (1996), o potencial de produção do milho é definido muito cedo, no estágio fenológico 2, quando a quarta folha está completamente desenvolvida. O número de fileiras de grãos e o tamanho da espiga são definidos, respectivamente, nos dois estádios

seguintes, de oito e doze folhas. Cantarella (1993) reporta informações de outros autores de que, quando a planta de milho acumula 50% da matéria seca total, 56% da absorção máxima de fósforo já ocorreram. De acordo com Mengel & Kirkby (1987), citados por Büll (1993), o suprimento inadequado de P no início do desenvolvimento do milho redundava em menor produção de grãos.

A exportação calculada em termos de kg de P por tonelada de grãos produzidos (Tabela 7) pondera melhor as variações da absorção de P e da produção de grãos observadas entre tratamentos. Considerando todos os tratamentos, inclusive a testemunha, a quantidade exportada variou de 3,6 a 4,8 kg t⁻¹. Na média, cada tonelada de grão produzida correspondeu à exportação de 4,2 kg de P, quantidade próxima do valor de 4,0 kg t⁻¹ indicado por Cantarella et al. (1996).

5.2.2 Eficiência de uso de fósforo

Com base nos resultados de eficiência de absorção de P (Tabela 8), verifica-se que o FA foi a fonte com menor capacidade de suprimento do nutriente para o milho. Em valores absolutos, maior eficiência foi obtida com o método de aplicação parcelada para o ST, FR e FA, e com a aplicação da dose total no sulco para o TM. A eficiência de absorção de P do FR dependeu significativamente do modo de aplicação, sendo maior com o fornecimento parcelado.

É necessário observar que, na eficiência de absorção determinada segundo a proposição de Moll et al. (1982) (Tabela 4), não é descontada a contribuição das reservas do solo. Isso explica os valores de eficiência de absorção acima de 1.000 g kg⁻¹ obtidos para alguns tratamentos (Tabela 8). Quando, no cálculo da eficiência, foi deduzida a absorção verificada no tratamento-testemunha (média de 50,5 kg ha⁻¹ de P), os índices de recuperação

de P passaram a variar de 298 a 618 g kg⁻¹, evidenciando mais as diferenças entre tratamentos (Tabela 9). Constata-se, ainda, que as reservas de fósforo do solo representaram parte muito expressiva do total do nutriente absorvido pelo milho.

TABELA 8 Eficiência de absorção de P (g kg⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos, incluindo a contribuição das reservas de P do solo).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	1.148 ab A	1.088 ab A	1.165 ab A
TM	1.199 a A	1.259 a A	1.083 ab A
FR	1.091 ab AB	972 b B	1.235 a A
FA	939 b A	975 b A	987 b A

Eficiência de absorção (g kg⁻¹) = P acumulado na parte aérea/P aplicado.

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Na média dos modos de aplicação, o uso das fontes ST, TM, FR e FA correspondeu, respectivamente, à recuperação de cerca de 49, 54, 46 e 33% do P fornecido. Conforme discutido no Capítulo 2, o melhor aproveitamento do P do termofosfato pode estar relacionado à presença de magnésio e de silício e ao poder neutralizante da acidez, característicos dessa fonte (Adams, 1980; Goedert et al., 1986; Malavolta & Ponchio, 1987; Tisdale et al., 1993, Malavolta, 2003). A recuperação do P de fosfato de Araxá foi a menor dentre as fontes estudadas. Destaca-se ainda o melhor aproveitamento do fosfato reativo (59%), quando aplicado parceladamente no sulco a cada cultivo.

TABELA 9 Eficiência de absorção de P (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos, descontada a contribuição das reservas de P do solo).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	506 ab A	446 ab A	524 ab A
TM	557 a A	618 a A	441 ab A
FR	450 ab AB	330 b B	593 a A
FA	298 b A	333 b A	346 b A

Eficiência de absorção (g kg^{-1}) = P acumulado na parte aérea/P aplicado.

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Independente do tratamento, a recuperação aparentemente pequena do fósforo aplicado, após três cultivos de milho, é um indicativo de que o solo, apesar de ter sido adubado em outras épocas, ainda mantém forte caráter-dreno de P. Isso significa que se, por um lado, o tamponamento do solo garantiu razoável produtividade no tratamento-testemunha, por outro lado, atuou como condicionante da dinâmica do fósforo liberado das fontes, adsorvendo o nutriente e diminuindo sua disponibilidade para o milho.

De qualquer modo, a magnitude dos valores de recuperação obtidos não foi tão pequena, considerando o marcado caráter-dreno de P dos solos da região do Cerrado. Sousa & Lobato (2003) apresentam dados de recuperação total de 35% a 62% do P aplicado, após 13 colheitas de milho em latossolo argiloso de cerrado. A fonte utilizada foi o superfosfato simples, em doses variando de 160 a 1.280 kg ha^{-1} de P_2O_5 , aplicadas a lanço de uma única vez ou parceladas no sulco. Os maiores índices de recuperação foram obtidos para as menores doses do nutriente. Os mesmos autores relatam que, num latossolo muito argiloso adubado com superfosfato simples em doses de 100 a 800 kg ha^{-1} de P_2O_5 , a recuperação média de P após 17 anos foi de 36% e 61%, respectivamente,

quando a área foi plantada exclusivamente com culturas anuais e quando intercalou-se *Brachiaria humidicola* por nove anos durante o período. Numa análise conjunta, esses resultados evidenciam a influência da natureza do solo e da seqüência de culturas na eficiência de aproveitamento do P no sistema.

Reportando ao presente estudo, é válido lembrar que, nos últimos anos que precederam a instalação do experimento, o local esteve tomado por capim-braquiária (*Brachiaria brizantha*). Assim sendo, fundamenta-se ainda mais a hipótese de que o histórico da área tenha influenciado as respostas aos tratamentos, com provável participação de formas orgânicas no suprimento de fósforo para o milho. Além disso, tomando-se como base os valores relativamente baixos de recuperação de P normalmente obtidos em solos de cerrado e considerando que foram feitos somente três cultivos após a aplicação dos tratamentos, deduz-se que as taxas de recuperação do nutriente (30% a 62%) no Argissolo estudado devem ter sido incrementadas em virtude da condição diferenciada de fertilidade da área à época da instalação do experimento, ou seja, devido ao fato de a área já ter sido adubada anteriormente.

No cálculo do índice de eficiência de utilização (IEU), considerou-se a produção de grãos por unidade de nutriente absorvido pela planta (Tabela 4). Em geral, a eficiência de utilização (Tabela 10) manteve relação inversa com a eficiência de absorção (Tabela 9). Os tratamentos que supriram menores quantidades de P levaram o milho a otimizar o uso do nutriente, resultando em maior quantidade de grãos produzidos por unidade de P absorvido. As plantas de milho cultivadas no tratamento-testemunha apresentaram eficiência de utilização significativamente superior à média daquelas que receberam P na adubação. As diferenças estatísticas entre tratamentos comprovam que, até certo ponto, os genótipos de milho utilizados no experimento foram capazes de compensar uma condição de menor disponibilidade de fósforo com o aumento da conversão do nutriente em produto colhido. É plausível inferir que a

plasticidade dos híbridos de milho ligada à eficiência genotípica a fósforo contribuiu para o nivelamento das respostas obtidas em condições variáveis de suprimento do nutriente.

TABELA 10 Eficiência de utilização de P (kg kg⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	203 ab A	216 ab A	196 a A
TM	192 b A	195 b A	208 a A
FR	193 b B	236 a A	201 a B
FA	230 a A	225 a A	205 a A
Testemunha	249 **		

Eficiência de utilização (kg kg⁻¹) = Produção de grãos/P acumulado na parte aérea.
 Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.
 ** = média do tratamento-testemunha difere (>) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

O índice de eficiência de produção (IEP) permite avaliar a produção de grãos obtida por unidade de nutriente acumulado nesse compartimento da planta, podendo ser influenciado pela capacidade da planta redistribuir o P absorvido. Como, em todos os tratamentos, a maior parte do P absorvido pelo milho foi direcionada para os grãos, a eficiência de produção (kg de grãos por kg de P acumulado nos grãos, Tabela 11) seguiu, basicamente, as mesmas tendências verificadas para a eficiência de utilização (kg de grãos por kg de P acumulado na planta, Tabela 10).

TABELA 11 Eficiência de produção de grãos (kg kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	231 ab A	251 ab A	228 a A
TM	218 b A	224 b A	240 a A
FR	216 b B	279 a A	239 a B
FA	268 a A	266 a A	236 a A
Testemunha	284 **		

Eficiência de produção de grãos (kg kg^{-1}) = Produção de grãos/P acumulado nos grãos. Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (>) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

No presente estudo, a combinação de fontes e modos de aplicação de fósforo não teve influência sobre a redistribuição (Tabela 7A), a qual, em valores absolutos, variou de 84% a 89% entre os tratamentos. Demonstra-se, assim, que os híbridos de milho utilizados não apresentaram capacidade de redistribuir diferencialmente o fósforo conforme o tratamento e, portanto, essa característica não esteve envolvida nas respostas em produção. A eficiência genotípica no uso do P estaria então relacionada à maior eficiência de utilização e, possivelmente, maior eficiência de aquisição (considerando a elevada absorção de P no tratamento-testemunha, apesar da menor disponibilidade no solo).

5.2.3 Eficiência do fertilizante

A eficiência do fertilizante, avaliada em termos de produção de grãos por unidade de P aplicado (Tabela 12), constitui uma das maneiras de se

comparar diferentes fertilizantes fosfatados. Em geral, em cada modo de aplicação, as fontes mais solúveis, ST e TM, propiciaram resultados similares. Houve tendência de maior eficiência dessas fontes quando foram aplicadas em dose total no primeiro ano e de forma localizada no sulco de semeadura. O FR teve pior desempenho quando distribuído a lanço, com melhoria significativa na aplicação parcelada no sulco, inclusive superando, em valor absoluto, a eficiência das fontes de maior solubilidade. Já o FA tendeu a apresentar baixa eficiência, especialmente quando parcelado.

TABELA 12 Eficiência do fertilizante (kg kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	70 a A	75 a A	67 ab A
TM	70 a A	84 a A	65 ab A
FR	50 a B	69 a AB	88 a A
FA	56 a A	59 a A	42 b A

Eficiência do fertilizante (kg kg^{-1}) = Produção de grãos/P aplicado. Cálculo efetuado descontando-se, do numerador, a produção obtida no tratamento testemunha.

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Considerando esses resultados, pode-se inferir que a utilização de doses moderadas do fosfato reativo, fornecidas anualmente, traria maior retorno em produtividade. Possivelmente, esse manejo associa melhores condições de solubilização do produto e de absorção (acessibilidade às raízes) pelo milho. Essa estratégia não se aplicaria ao fosfato de Araxá, o qual pareceu ser mais dependente do tempo de contato com o solo (aplicação no primeiro ano, a lanço ou no sulco) para ter maior efetividade como fonte de fósforo para o milho.

Confirmando os comentários já feitos na discussão do presente trabalho, os dados de eficiência do fertilizante (Tabela 12) evidenciam que as respostas a distintas estratégias de adubação fosfatada podem equiparar-se nas avaliações de longo prazo. Parecem consistentes os pressupostos de que, com o tempo, os fosfatos naturais solubilizam-se, enquanto o fósforo prontamente liberado das fontes mais solúveis torna-se menos disponível no solo. Também é coerente a idéia de que essa indisponibilização deve ocorrer em maior intensidade para os fosfatos solúveis, em comparação aos fosfatos menos reativos (Novais & Smyth, 1999). Como consequência desses eventos, ao longo do tempo, diminuem as diferenças na disponibilização (acumulada) de P às plantas nos diversos tratamentos.

Ao que tudo indica, além da dinâmica dos fosfatos, houve participação de outros fatores como condicionantes da eficiência dos fertilizantes. Até certo ponto, o solo atuou como fonte de P, conforme revelado nos resultados de absorção do nutriente e de produção referentes ao tratamento-testemunha. O tamponamento do solo deve ter contribuído para amenizar o déficit de produção que seria esperado nos tratamentos com menor capacidade de suprimento do nutriente (por exemplo, na testemunha e nos tratamentos com FA). Da mesma forma, a eficiência genotípica a fósforo provavelmente conferiu maior potencial produtivo aos híbridos nos referidos tratamentos.

5.3 Efeito residual

Os tratamentos com aplicação a lanço dos quatro fertilizantes fosfatados não provocaram grandes alterações nos valores de P-disponível (Tabela 8B) avaliado pela resina de troca iônica, no primeiro ano e nem ao final do experimento (residual). Conforme os conceitos clássicos sobre o comportamento dos fosfatos e a dinâmica do P no solo, poder-se-ia esperar que,

na aplicação a lanço, houvesse melhores condições para a solubilização de fosfatos de baixa reatividade, como o fosfato de Araxá (Raij, 1991; Rajan et al., 1996; Lopes, 1999). Em princípio, isso não se refletiu no rendimento de grãos (Tabela 6) e nos níveis de disponibilidade de fósforo residual no solo após os três cultivos (Tabela 13). A incorporação de fosfatos naturais em maior volume de solo aumenta sua solubilização, mas, ao mesmo tempo, favorece a adsorção do P liberado do fosfato devido ao maior contato com as partículas de solo (Rajan et al., 1996; Novais, 1999).

TABELA 13 Fósforo disponível residual (mg dm^{-3}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo, após três cultivos de milho (extraído com resina de troca iônica).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	10,0 a B	10,2 a B	17,1 b A
TM	9,7 a B	10,5 a B	16,3 bc A
FR	12,1 a B	13,2 a B	24,9 a A
FA	9,8 a A	11,1 a A	12,0 c A
Testemunha	8,7 **		

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

Apesar do incremento inicial na disponibilidade do nutriente (Tabela 8B), a aplicação localizada da dose total dos fosfatos no primeiro ano também não proporcionou maior efeito residual (Tabela 13). Comprova-se, portanto, que o solo da área experimental realmente apresenta pronunciado caráter-dreno de P.

Excetuando-se o fosfato de Araxá, a estratégia de fornecimento do P de forma parcelada foi mais efetiva em manter o efeito residual das fontes (Tabela 13), provavelmente devido à condição diferencial de absorção e de exposição dos fosfatos à interação com o solo (menor tempo de contato). O parcelamento preveniu, tanto o consumo de luxo pelo milho, quanto o processo de fixação devido ao tempo de permanência dos fosfatos em contato com o solo.

Maior efeito residual e boa produção de grãos foram propiciados pelo fosfato reativo parcelado e devem ser resultantes de uma velocidade intermediária de liberação de P, que não comprometeu a absorção pelo milho, mas que, aparentemente, minimizou os processos de fixação do nutriente em comparação às fontes de maior solubilidade. Considerando que adsorção e difusão são processos que concorrem na depleção do P-solução oriundo do fertilizante, o resultado obtido com o FR é coerente com a afirmação de Novais & Smyth (1999), de que, em solo-dreno, pode ser mais conveniente o uso de fontes menos solúveis, desde que a menor solubilidade não implique em restrição do processo de difusão, o qual garante o suprimento de P à planta. No caso, o FA parece não atender esse requisito.

De acordo com Rajan et al. (1996), aplicações parceladas de fosfatos naturais durante vários anos podem promover efeito residual significativo, pois, como a taxa de dissolução é lenta, com o tempo acumulam-se partículas do próprio fosfato, as quais serão solubilizadas posteriormente. Dessa forma, os fosfatos naturais (de boa qualidade) são as fontes ideais para o manejo de longo prazo, pois acabam sendo uma fonte de liberação controlada de fósforo. No Brasil, diversos autores também têm relatado experiências positivas com o uso de fosfatos naturais reativos em diferentes sistemas de manejo da adubação (Goedert & Lobato, 1984; Oliveira et al., 1984; Kaminsky & Peruzzo, 1997; Komdörfer et al., 1999; Horowitz & Meurer, 2003; Souza & Lobato, 2003).

5.4 Considerações finais

Nas condições de solo, clima e manejo geral da área e para os tetos de produtividade alcançados no experimento (em torno de 8 t ha^{-1} de grãos), parece clara a conveniência de se adotar a estratégia de adubação parcelada, como forma de otimizar o manejo da fertilidade do solo, aliando aspectos técnicos e econômicos do fornecimento de fósforo para o milho. Tudo leva a crer que os 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 , aplicados anualmente, foram suficientes para propiciar ganhos de produtividade, repor o P exportado e, ainda, incrementar o P disponível no solo, com um excedente capaz de melhorar a fertilidade para os cultivos seguintes.

Além das características intrínsecas aos fosfatos estudados, condições peculiares da área experimental (residual de adubações passadas e tamponamento do solo) parecem ter influenciado a interação das fontes com o solo, o qual, em determinadas situações de suprimento restrito de P, atuou como fonte, mas, ao mesmo tempo, representou forte dreno do nutriente liberado das fontes mais solúveis. Paralelamente, as condições climáticas e a eficiência dos híbridos de milho utilizados interferiram, em maior ou menor extensão, nas produtividades obtidas. Considerando o efeito conjunto desses fatores e os resultados obtidos em médio prazo, os distintos tratamentos provocaram diferenças relativamente pequenas na absorção de P, sem maiores impactos na produtividade. Nessas circunstâncias, a definição da melhor estratégia para o fornecimento de fósforo passa a depender essencialmente de uma avaliação econômica dos tratamentos, assunto tratado no capítulo seguinte.

6 CONCLUSÕES

Nas condições em que o estudo foi conduzido e considerando as respostas de médio prazo (três safras), pôde-se concluir que:

1. diferenças entre tratamentos foram detectadas em termos de quantidade de P absorvida, mas não tiveram correspondente efeito sobre a produtividade do milho. De modo geral, o uso de fontes com solubilidade variável e em distintos modos de aplicação proporcionou incrementos semelhantes na produção acumulada dos três cultivos;
2. as fontes mais solúveis, superfosfato triplo e termofosfato, apresentaram desempenho similar para a maioria das variáveis analisadas;
3. somente para o fosfato reativo de Arad, o rendimento de grãos dependeu de como o adubo foi distribuído. Melhores respostas foram obtidas conforme a seqüência dos modos de aplicação: a lanço em área total < localizada no sulco < parcelada no sulco;
4. quando usado de forma parcelada, o fosfato reativo tendeu a apresentar eficiência superior à do superfosfato triplo e do termofosfato. Já o fosfato de Araxá apresentou menor capacidade de suprimento de P para o milho, não havendo vantagem para nenhum dos métodos de aplicação testados;
5. o parcelamento da dose total dos fosfatos em aplicações anuais no sulco de semeadura não comprometeu a produtividade do milho e propiciou maior efeito residual, notadamente no caso do fosfato reativo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, F. Interactions of phosphorus with other elements in soil and in plants. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 655-680.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. p. 25-32.
- ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, G. E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J. M.; VIEIRA, J. R.; LOUREIRO, J. E. Milho. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. p. 314-316.
- BARBOSA FILHO, M. P. Utilização de fosfatos naturais em solos de cerrado. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 28, p. 1-4, dez. 1984.
- BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicabá: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1993. p. 63-145.
- CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1993. p. 147-196.
- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; CAMARGO, C. E. O. Cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. p. 45-71.
- CHIEN, S. H.; LÉON, L. A.; TEJADA, H. R. Dissolution of phosphate rocks in acid Colombian soils as related to soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 6, p. 1267-1271, Nov./Dec. 1980.

- CHIEN, S. H.; MENON, R. G.** Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fertilizer Research*, Dordrecht, v. 41, n. 3, p. 227-234, 1995.
- COELHO, A. M.; ALVES, V. M. C.** Adubação fosfatada na cultura do milho. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003**, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. (CD-rom).
- EMBRAPA.** Embrapa Solos, Embrapa Informática Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.
- FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D.** Cultura do milho: aspectos fisiológicos e manejo da água. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 73; p. 1-4, mar. 1996.
- FERREIRA, D. F.** Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4. 0. In: **REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45.**, 2000, São Carlos, SP. Programa e resumos... São Carlos: UFScar, 2000. p. 255-258.
- GOEDERT, W. J.; LOBATO, E.** Eficiência agronômica de fosfatos em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 8, n. 1, p. 97-102, jan./abr. 1984.
- GOEDERT, W. J.; LOPES, A. S.** Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para culturas anuais, perenes, pastagens e reflorestamento. In: **SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO, 1987**, São Paulo. Anais... São Paulo: IBRAFOS, 1987. p. 24-49.
- GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.** Fósforo. In: **GOEDERT, W. J. (Ed.) Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo.** São Paulo: Nobel, 1986. p. 129-166.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J.** Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003**, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.
- KAMINSKI, J.; PERUZZO, G.** Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31 p. (Boletim técnico, n. 3).

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

LOPES, A. S. Fosfatos naturais. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS.** Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, 1999. p. 65-66.

LOPES, A. S. Solos sob “Cerrado”: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 162 p.

MALAVOLTA, E. Fósforo na planta e interação com outros elementos. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003,** Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

MALAVOLTA, E.; PONCHIO, C. O. Utilização eficiente do fósforo no sistema solo-planta. In: **SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO, 1987,** São Paulo. Anais... São Paulo: IBRAFOS, 1987. p. 75-132.

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

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, Madison, v. 74, n. 3, p. 562-564, May/June 1982.

NOVAIS, R. F. Utilização de fosfatos naturais de baixa reatividade. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS.** Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, 1999. p. 62-64.

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

OLIVEIRA, E. L.; MUZZILLI, O.; IGUE, K.; TORNERO, M. T. T. Avaliação da eficiência agrônômica de fosfatos naturais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 8, n. 1, p. 63-67, jan./abr. 1984.

- PROCHNOW, L. I.; ALCARDE, J. C.; CHIEN, S. H.** Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003**, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.
- RAIJ, B. van.** Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Potafos, 1991. 343 p.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.** Métodos de análise de solos para fins de fertilidade. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 31 p. (Boletim, n. 81).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C. A.** Interpretação de resultados de análise de solo. In: **RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.).** Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. p. 8-13.
- RAIJ, B. van; VAN DIEST, A.** Utilization of phosphate from different sources by six plant species. *Plant and Soil*, The Hague, v. 51, n. 4, p. 577-589, 1979.
- RAJAN, S. S. S.; WATKINSON, J. H.; SINCLAIR, A. G.** Phosphate rocks for direct application to soils. *Advances in Agronomy*, New York, v. 57, p. 77-159, 1996.
- ROBINSON, J. S.; SYERS, J. K.; BOLAN, N. S.** Importance of proton supply and calcium-sink size in the dissolution of phosphate rock materials of different reactivity in soil. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 43, n. 3, p. 447-459, Sept. 1992.
- SÁ, J. C. M.** Adubação fosfatada no sistema de plantio direto. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003**, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.** Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 102, jun. 2003. 16 p. (Encarte Técnico).
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A.** Adubação com fósforo. In: **SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.).** Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 147-168.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. Soil fertility and fertilizers. 5. ed. Nova York: Macmillan Publishing Company, 1993. 634 p.

CAPÍTULO 4

Resende, Álvaro Vilela de. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado: eficiência agrônômica e econômica.** 2004. p. 121-150. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*

1 RESUMO

Devido ao pronunciado efeito residual da adubação fosfatada, as respostas obtidas no ano da aplicação não são suficientes para a avaliação da eficiência técnica e principalmente econômica do uso de fosfatos. No presente trabalho, com base na produção acumulada de três cultivos de milho, avaliou-se a eficiência agrônômica e econômica de fontes e modos de aplicação de fósforo num Argissolo Vermelho já adubado em épocas passadas. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições, num esquema fatorial $4 \times 3 + 1$, envolvendo quatro fontes de P na quantidade de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato triplo – ST, termofosfato magnesiano – TM, fosfato reativo de Arad – FR e fosfato natural de Araxá – FA), três formas de aplicação (a lanço em área total no primeiro ano, localizada no sulco de plantio no primeiro ano e parcelada anualmente no sulco) e uma testemunha (sem P) como tratamento adicional. O fósforo foi fornecido considerando-se os teores totais do nutriente nas fontes. Após o primeiro cultivo, não mais foi feito preparo do solo, sendo os sulcos de semeadura abertos com enxada, seguindo sua localização original. Totalizaram-se a produção de biomassa e de grãos e o acúmulo de fósforo pelo milho ao final dos três cultivos. Foram determinados índices de eficiência técnica em referência à testemunha e ao superfosfato triplo (eficiência agrônômica). Calculou-se a relação benefício/custo correspondente a cada tratamento. Os índices de eficiência técnica foram similares para vários dos tratamentos. Para o FR, a eficiência agrônômica foi maior com o parcelamento da aplicação anualmente no sulco, o que não se verificou no caso do FA. Os tratamentos com maior eficiência agrônômica (ST e TM) não corresponderam

* Comitê Orientador: Prof. Antônio E. Furtini Neto - UFLA (Orientador)
Prof. Joel Augusto Muniz - UFLA
Prof. Nilton Curi - UFLA
Prof. Valdemar Faquin - UFLA

aos de maior eficiência econômica. Os dois fosfatos naturais (FR e FA) apresentaram relação benefício/custo mais compensadora.

2 ABSTRACT

Resende, Álvaro Vilela de. Phosphorus sources and application methods for maize in soil of the Cerrado region: agronomic and economic efficiency. 2004. p. 121-150. Thesis (Doctorate in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, MG*

In view of the pronounced residual effect of the phosphated fertilization, the responses obtained in the same year of application are insufficient to assess the technical and, mainly, the economic efficiency of phosphate fertilizers. Based on the cumulative yield of three maize cultivations, we evaluated the agronomic and economic efficiency of P sources and application methods in a Red Argisol which had been previously fertilized. A randomized complete block design with four replications was used. Treatments arranged in a 4x3+1 factorial scheme combined four P sources in the amount of 180 kg ha⁻¹ P₂O₅ (triple superphosphate - TS, magnesium termophosphate - MT, Arad reactive rock phosphate - RP, and Araxá rock phosphate - AP), three application methods (broadcasted on the first year, banded in the seeding furrow in the first year, and annually parceled bands in the seeding furrow), and a check plot (without P) as an additional treatment. The applied P ratio was based on the total P₂O₅ content of each fertilizer. After the first cultivation, the soil was no longer revolved and the seeding furrows were opened manually following their original location. The cumulative biomass production, grain yield, and P accumulation by maize were determined. Indices of agronomic efficiency were calculated taking the check plot and triple superphosphate treatments as references (agronomic efficiency). The cost/benefit ratio was calculated. The agronomic efficiency was similar for most treatments. Annual parcelling of the total P dose in the seeding furrow propitiated greater agronomic efficiency for RP, unlikely of the other rock phosphate (AP). Treatments with greater agronomic efficiency (TS and MT) did not present greater economic efficiency. The two rock phosphates (RP and AP) presented more attractive cost/benefit ratios.

*Guidance Committee: Prof. Antônio E. Furtini Neto - UFLA (Major Professor)
Prof. Joel Augusto Muniz - UFLA
Prof. Nilton Curi - UFLA
Prof. Valdemar Faquin - UFLA

3 INTRODUÇÃO

Na agricultura do Cerrado, o fósforo aplicado na adubação tende a ficar menos disponível para a absorção vegetal ao reagir com os componentes do solo. Desse modo, quantidades elevadas do nutriente devem ser fornecidas nas adubações para promover alguma saturação do solo e gerar um excedente que atenda às exigências das culturas (Goedert et al., 1986; Raij, 1991; Novais & Smyth, 1999).

Os gastos com a adubação fosfatada representam parte considerável do custo das lavouras na região e variam dependendo da fonte de P utilizada e do prazo considerado para o retorno do investimento (Sousa et al., 2002). Em condições de sequeiro, a adubação fosfatada corresponde a 19,5% do custo de conversão de um hectare de cerrado nativo em área de produção comercial de grãos (Lobato & Sousa, 2002). No milho, em sistemas mais tecnificados, os gastos com correção do solo e adubação representam, em média, 40% a 45% do custo de produção (Coelho & Alves, 2003), mas a cultura costuma proporcionar retornos positivos ao investimento em adubação fosfatada (Scolari et al., 1982; Prado & Fernandes, 2001).

Boas produtividades e menores custos são condições sempre almejadas pelos agricultores. Entretanto, em face da gama de variáveis que interferem na efetividade das fontes de P e no potencial de resposta das culturas, a definição da melhor estratégia de manejo da adubação fosfatada não é tarefa simples, mesmo porque, alta eficiência técnica (produtividade elevada) não necessariamente corresponde à alta eficiência econômica (retorno financeiro elevado).

O manejo da fertilidade do solo, principalmente em relação ao fósforo, deve ser estrategicamente planejado numa perspectiva de longo prazo, uma vez que o custo da adubação e as respostas em produtividade estão sujeitas a muitas incertezas e podem variar de um ano para outro (Fixen & Halvorson, 1991;

Reetz Junior & Fixen, 1992; Sousa & Lobato, 2003). Um aspecto importante é que a relação benefício/custo do uso de fosfatos pode diferir muito quando considera-se a produção obtida no ano da aplicação ou a produção acumulada de vários cultivos. Tendo em vista que uma fração relativamente pequena do fósforo é aproveitada no primeiro ano e o restante permanece no solo, em formas de maior ou menor disponibilidade às plantas, o efeito residual passa a ser um componente muito importante na avaliação econômica de práticas de adubação fosfatada (Goedert & Lobato, 1984; Sousa & Lobato, 2003). Quando amortizado num período mais longo, o investimento financeiro na construção da fertilidade do solo é menos impactante no orçamento global das propriedades rurais.

No presente capítulo, objetivou-se, com base nos resultados acumulados de três cultivos sucessivos de milho num solo da região do Cerrado, já adubado anteriormente, avaliar a combinação de fontes e modos de aplicação de fósforo quanto à eficiência agronômica e econômica.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Boa Vista, município de Itumirim-MG, situado a 21°19'02" de latitude sul e 44°52'14" de longitude oeste, a uma altitude média de 871m. O clima, de acordo com a classificação de Köppen, se encontra no limite entre Cwb e Cwa, caracterizando clima temperado a temperado subtropical, com inverno seco.

A área experimental apresenta Argissolo Vermelho distrófico típico (antigo Podzólico Vermelho-Escuro), textura argilosa. O local foi anteriormente cultivado e adubado e há cerca de dez anos não era utilizado para lavouras, permanecendo coberto por vegetação espontânea dominada por capim-braquiária (*Brachiaria brizantha*) e servindo ao pastejo bovino. As condições de fertilidade do solo, previamente à instalação do experimento, estão expressas na Tabela 1. Salienta-se a baixa disponibilidade de fósforo pelos extratores Mehlich 1 (Alvarez V. et al., 1999) e resina de troca iônica (Raij et al., 1996).

A planta-teste foi o milho, sendo utilizados híbridos triplos desenvolvidos pela Embrapa Milho e Sorgo. Foram conduzidos três cultivos consecutivos em condições de sequeiro, nos anos agrícolas 2000/2001, 2001/2002 e 2002/2003. Os híbridos de milho foram HT 9710-11, HT 7105-3 e BRS 3003, respectivamente, para o primeiro, segundo e terceiro cultivos.

4.1 Delineamento experimental e tratamentos

As parcelas foram delimitadas com área total de 27 m² (4,5 x 6 m), correspondendo a cinco linhas de milho com 6 m de comprimento e 0,9 m espaçadas entre si. Nas avaliações do experimento foi considerada uma área útil central de 10,8 m² (três linhas de 4 m de comprimento).

TABELA 1 Principais atributos químicos e físicos do solo (0-20 cm de profundidade) antes da aplicação dos tratamentos.

pH (H ₂ O)	5,2
P - Mehlich 1 (mg dm ⁻³)	2,0
P - Resina (mg dm ⁻³)	7,8
K (mg dm ⁻³)	34,0
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,2
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,3
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,5
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	5,0
SB (cmol _c dm ⁻³)	1,6
t (cmol _c dm ⁻³)	2,1
T (cmol _c dm ⁻³)	6,6
V (%)	24,2
m (%)	23,8
S - sulfato (mg dm ⁻³)	12,4
B (mg dm ⁻³)	0,6
Cu (mg dm ⁻³)	1,0
Fe (mg dm ⁻³)	46,6
Mn (mg dm ⁻³)	6,4
Zn (mg dm ⁻³)	0,5
P - remanescente (mg L ⁻¹)	16,8
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	37
Areia (g kg ⁻¹)	360
Silte (g kg ⁻¹)	100
Argila (g kg ⁻¹)	540

K = extrator Mehlich 1; Ca, Mg e Al = extração com KCl mol L⁻¹; Cu, Fe, Mn e Zn = extrator DTPA; B = extração em água quente. Metodologias descritas em Embrapa (1999).

Análises realizadas nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo da UFLA.

O estudo consistiu da avaliação da resposta do milho ao fornecimento de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, testando-se quatro fosfatos (ST – superfosfato triplo, TM – termofosfato magnésiano Yoorin, FR – fosfato reativo de Araçá, e FA – fosfato natural de Araxá) e três modos de aplicação dos mesmos (a lanço em área total no 1º ano, localizada no sulco de plantio no 1º ano e parcelada no

sulco em três anos). O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, segundo um esquema fatorial $4 \times 3 + 1$, combinando as quatro fontes de fósforo e as três formas de aplicação, mais uma testemunha sem fornecimento de fósforo (tratamento adicional). No terceiro modo de aplicação dos fosfatos, a dose total de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 foi dividida em aplicações anuais no sulco de plantio, fornecendo-se, portanto, 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 a cada cultivo.

A quantidade a aplicar de cada fonte foi calculada com base no teor de P_2O_5 total dos fertilizantes (Tabela 2). Na aplicação a lanço, os fertilizantes foram distribuídos manualmente em toda a área da parcela experimental e incorporados, com enxada, a cerca de 10 cm de profundidade. Nas aplicações localizadas, os fertilizantes foram distribuídos no fundo do sulco de plantio.

TABELA 2 Caracterização química e física dos fertilizantes fosfatados.

Fertilizantes	Características						Granulometria
	P_2O_5 total	P_2O_5 solúvel	CaO	MgO	SiO_2	Equivalente CaCO_3 [#]	
	-----%						
ST	46,1	38,3*	13,0	-	-	-	Granulado
TM	18,1	17,6**	20,0	7,0	25,0	50	Pó
FR	33,0	10,0**	37,0	-	-	-	Farelado
FA	22,7	4,3**	40,0	-	-	-	Pó

ST - Superfosfato triplo; TM - Termofosfato magnésiano

FR - Fosfato reativo Arad; FA - Fosfato de Araxá

* P_2O_5 solúvel em água ** P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2% (1:100).

[#] Efeito alcalinizante dado em kg CaCO_3 para cada 100 kg do fertilizante.

4.2 Plantio e condução do experimento

No primeiro ano, previamente ao preparo do solo, a área recebeu calcário dolomítico em dosagem determinada pelo método da curva de

incubação em laboratório ($1,5 \text{ t ha}^{-1}$, PRNT=100%), visando elevar o pH em água para valores próximos de 5,5. O preparo do solo foi feito com aração e gradagens. Cerca de 40 dias após a calagem, foram abertos os sulcos de semeadura com implemento tratorizado, sendo aplicados os tratamentos em seguida.

O preparo do solo foi realizado apenas na primeira safra. Após cada colheita, os restos culturais (parte aérea do milho) foram removidos das parcelas, deixando-se o solo em pousio. Para o segundo e terceiro cultivos, após a dessecação da vegetação espontânea surgida na entressafra, os sulcos de semeadura foram abertos com enxada, seguindo sua localização original. As parcelas referentes aos tratamentos com adubação fosfatada parcelada receberam os fosfatos concomitantemente à adubação de base.

Na Tabela 3, são descritas a data de plantio e as adubações relativas a cada cultivo. Na definição das quantidades de nutrientes, utilizaram-se informações de análises do solo, tomando-se como referência as recomendações de adubação de milho no estado de Minas Gerais, para expectativas de produtividade acima de 8 t ha^{-1} de grãos (Alves et al., 1999). Dependendo do ano em questão e dos insumos disponíveis, os nutrientes foram fornecidos como fertilizantes simples ou formulados.

As adubações de plantio foram aplicadas no fundo do sulco de semeadura com auxílio de um equipamento manual de distribuição de fertilizantes. O contato direto do adubo com as sementes foi evitado separando-os com uma fina camada de terra. Foram distribuídas cerca de dez sementes de milho por metro de sulco, com posterior desbaste, deixando-se cinco plantas por metro.

TABELA 3 Datas de semeadura e adubações de plantio e de cobertura dos três cultivos de milho.

Ano agrícola	Data de plantio	Adubação de plantio (kg ha ⁻¹)					Adubação de cobertura (kg ha ⁻¹)	
		N	K ₂ O	S	B	Zn	N	K ₂ O
2000/01	25/11/00	21 ^a	90 ^b	24 ^{ac}	-	2,0 ^c	56 ^d x 3	3 ^d x 3
2001/02	20/11/01	21 ^a	90 ^b	24 ^{ac}	-	2,0 ^c	78 ^d x 2	4 ^d x 2
2002/03	09/11/02	73 ^o	73 ^o	-	1,2 ^o	3,4 ^o	40 ^o x 2	40 ^o x 2

Fertilizantes: ^a Sulfato de amônio; ^b Cloreto de potássio; ^c Sulfato de zinco; ^d Uréia + Cloreto de potássio; ^o NPK 20-00-20 + B e Zn.

As adubações de cobertura foram iniciadas a partir do estágio de 6 a 8 folhas, com intervalo médio de 10 dias entre aplicações, tendo os fertilizantes sido aplicados em filete ao lado da linha de plantas, sem incorporação. Procedimentos específicos para o controle de plantas daninhas e de insetos praga foram adotados quando necessário, com o uso de herbicidas e inseticidas apropriados, nas dosagens recomendadas para a cultura do milho.

Na Figura 1 são apresentados os dados pluviométricos referentes aos principais períodos de condução do experimento. Visualiza-se a inconstância do regime pluviométrico no primeiro cultivo, com períodos de suprimento subótimo de água, mormente no mês de janeiro, precedendo o florescimento do milho. De modo geral, as condições climáticas durante o segundo e terceiro cultivos foram bem mais favoráveis à cultura, com maior quantidade de chuva e distribuição mais regular em relação ao cultivo inicial.

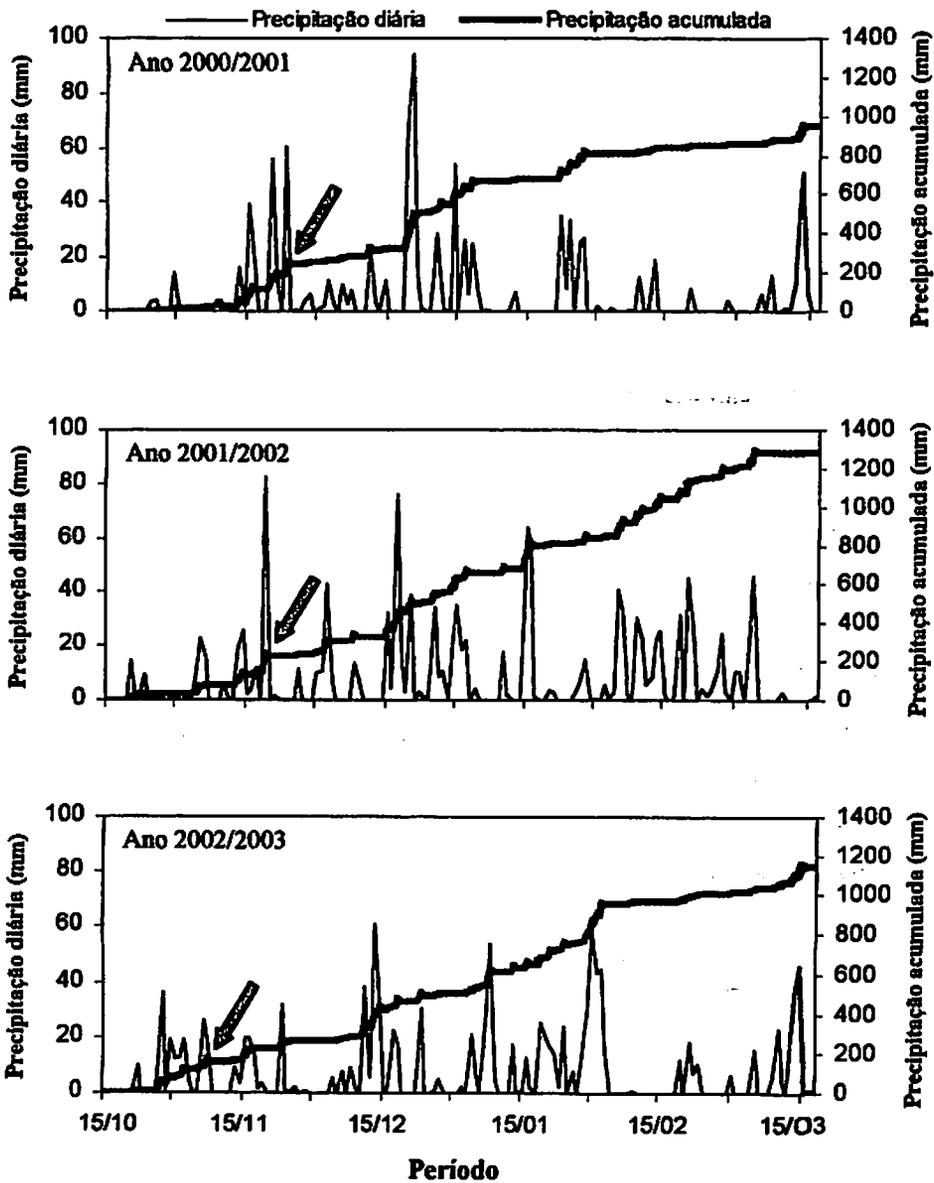


FIGURA 1 Dados pluviométricos referentes aos períodos de condução dos três cultivos de milho (as setas indicam a época da sementeira).

4.3 Colheita e avaliações

Em cada cultivo, por ocasião da colheita, determinaram-se o peso de plantas e de espigas e a produção de grãos nas parcelas úteis. Amostras de plantas e grãos foram coletadas para determinação da concentração de P, conforme Malavolta et al. (1997). Considerando-se os teores de fósforo e o peso dos diferentes compartimentos da planta, foram calculados os respectivos conteúdos do nutriente (acúmulo) relativos a cada tratamento. Os dados de produção de grãos e acúmulo de fósforo foram totalizados, obtendo-se os resultados cumulativos após três cultivos de milho.

As combinações de fontes e modos de aplicação de P foram comparadas em relação à sua eficiência relativa, tomando-se como referencial (eficiência relativa = 100%) a produção de grãos do tratamento que não recebeu adubação fosfatada (testemunha).

Foi determinado o índice de eficiência agrônômica de aquisição de P (EAA) e de produção de grãos (EAP) das fontes, segundo Novais & Smyth (1999). Considerou-se, para cada modo de aplicação, o superfosfato triplo como referência para aplicação da fórmula, em que *Resp* é a resposta do milho em absorção ou produção:

$$\text{Eficiência Agrônômica (EA)} = \frac{\text{Resp Fonte} - \text{Resp Testemunha}}{\text{Resp Super Triplo} - \text{Resp Testemunha}} \times 100$$

4.4 Análises estatísticas

Quando pertinente, os dados experimentais foram submetidos a análises de variância e testes de médias com auxílio do programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000). As médias dos tratamentos componentes do fatorial foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Nas análises dos resultados acumulados após três safras, considerou-se o arranjo fatorial $4 \times 3 + 1$. Já para as avaliações em anos isolados, tal arranjo não pode ser mantido, pois, no terceiro modo de aplicação, a dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 só se completou ao final de três anos. Nesse caso, os 13 tratamentos foram simplesmente comparados entre si (Teste de Scott-Knott), sem levar em conta a possibilidade de interação dos fatores Fontes x Modos de aplicação.

4.5 Análise econômica

A avaliação econômica dos resultados foi realizada mediante ponderação da produtividade obtida nos diferentes tratamentos e do custo por unidade de P_2O_5 dos adubos fosfatados, tendo como constantes os gastos com os demais fatores de produção e desconsiderando eventuais diferenças de custo na aplicação dos fosfatos.

A análise econômica foi baseada nos preços de R\$2,13; R\$3,04; R\$1,62; e R\$0,84 por kg de P_2O_5 total posto em Lavras, MG, o que corresponde ao custo por tonelada de produto de R\$980,00; R\$550,00; R\$535,00 e R\$190,00; respectivamente, para as fontes ST, TM, FR e FA. A tomada de preços foi feita em fevereiro de 2004 e a equivalência em dólar pode ser obtida considerando-se a cotação de R\$2,9303 para o dólar americano (US\$).

Calculou-se a relação benefício/custo referente aos tratamentos com fornecimento de P, de acordo com os respectivos ganhos de produtividade proporcionados em relação ao tratamento-testemunha. Foi usado o preço de referência de R\$18,81 a saca de milho de 60 kg, de acordo com a cotação média do mês de janeiro de 2004 (FGV, 2004).

Como os dados de produção acumulada de grãos foram semelhantes entre os tratamentos com as quatro fontes (Capítulo 3), foram estimados os pontos de equivalência de preço da tonelada de fertilizante (% do custo do

superfosfato triplo), os quais permitiriam obter, com o uso do termofosfato, fosfato reativo ou fosfato de Araxá, a mesma relação eficiência/custo do superfosfato triplo. Em outras palavras, esses pontos de equivalência indicariam, de acordo com a eficiência agronômica das fontes, o limite de custo da tonelada de adubo, abaixo do qual, o uso do TM, FR e FA seria economicamente mais vantajoso em relação ao uso do ST (fonte de referência). Os pontos de equivalência foram obtidos considerando-se o custo do TM, FR e FA como incógnitas em equações para igualar a relação eficiência/custo desses fertilizantes à eficiência/custo do ST.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Eficiência agronômica

Para a variável eficiência relativa, houve efeito de tratamentos em cada cultivo de milho e da interação de fontes e modos de aplicação de P na avaliação da resposta cumulativa (Tabela 9A). Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os resultados de eficiência relativa dos tratamentos, considerando, respectivamente, a avaliação das produções isoladas ou total dos cultivos.

Pelas respostas em cada cultivo (Tabela 4), observa-se que, no primeiro ano, os incrementos em produtividade devido ao fornecimento de P foram inferiores aos obtidos nos anos seguintes. Atribui-se esse resultado à forte limitação climática ocorrida em 2000/2001 (Figura 1), quando a escassez de chuvas e períodos de veranico restringiram seriamente o potencial de resposta do milho à adubação (Tabela 7B). É provável que tal limitação tenha prejudicado principalmente a resposta às fontes de maior solubilidade. Nos cultivos subseqüentes, a quantidade e distribuição de chuvas foram mais favoráveis à cultura.

Houve aumento de eficiência das fontes menos solúveis, FR e FA, com o tempo, o que não ocorreu no caso do ST, especialmente observando-se os dados do segundo e terceiro cultivos (Tabela 4). Esses resultados corroboram os dados de diversos outros trabalhos nos quais têm-se indicações de que, em longo prazo, os fosfatos naturais, notadamente os reativos, podem ser bastante efetivos em suprir fósforo às culturas (Rajan et al., 1996; Kaminski & Peruzzo, 1997; Horowitz & Meurer, 2003; Sousa & Lobato, 2003).

Chama atenção a sensível melhoria, com o tempo, da eficiência do tratamento em que a dose total do FR foi aplicada no sulco no primeiro ano. Nesse caso, a explicação parece estar relacionada às condições que interferem

na dissolução dos fosfatos reativos, especificamente a elevada saturação de cálcio no ambiente de reação do produto, impedindo maior liberação inicial de P (Chien et al., 1980; Chien & Menon, 1995; Rajan et al., 1996; Novais & Smyth, 1999; Komdörfer et al., 1999), conforme discutido no Capítulo 3.

TABELA 4 Eficiência relativa¹ de produção de grãos (%) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho, em três cultivos.

Fonte de P	Modo de aplicação	Ano agrícola		
		2000/2001	2001/2002	2002/2003
ST	Lanço	129 a	150 a	148 b
TM	Lanço	114 b	155 a	155 b
FR	Lanço	113 b	141 b	134 c
FA	Lanço	119 a	134 b	150 b
ST	Sulco	130 a	153 a	153 b
TM	Sulco	133 a	154 a	169 a
FR	Sulco	96 b	144 b	181 a
FA	Sulco	120 a	137 b	152 b
ST	Sulco parcelado	111 b	151 a	155 b
TM	Sulco parcelado	102 b	140 b	173 a
FR	Sulco parcelado	141 a	150 a	173 a
FA	Sulco parcelado	104 b	120 c	152 b
Testemunha	-	100 b	100 d	100 d

¹ Tratamento-testemunha = 100%.

Em cada coluna, médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Em geral, em cada cultivo, as diferenças entre tratamentos não foram tão intensas quanto normalmente seria esperado, havendo certa tendência de

equiparação da eficiência (Tabela 4), o que refletiu na produção acumulada dos três cultivos (Tabela 5). Fatores ligados ao histórico da área (adubações em épocas passadas), ao tamponamento do solo (atuando como fonte de P nos tratamentos mais restritivos e como dreno nos tratamentos com maior disponibilização do nutriente) e à eficiência dos híbridos de milho (elevada eficiência de uso de P) parecem estar envolvidos, de forma aditiva, na equiparação dos resultados de longo prazo (Capítulo 3).

Em virtude do exposto, apesar de expressivos, os incrementos relativos de produtividade nos tratamentos com fornecimento de P (Tabela 5) não são da mesma magnitude daqueles verificados nos experimentos de adubação fosfatada em solos virgens de cerrado, nos quais, via de regra, a produção do tratamento-testemunha é extremamente baixa (Sousa & Lobato, 2003).

TABELA 5 Eficiência relativa¹ de produção de grãos (%) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	144 a A	147 a A	142 ab A
TM	144 a A	153 a A	140 ab A
FR	131 a B	143 a AB	155 a A
FA	135 a A	137 a A	126 b A
Testemunha	100 **		

¹ Tratamento-testemunha = 100%.

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

De acordo com os resultados obtidos nas condições experimentais do presente trabalho, têm-se indicativos de que a aplicação do FR no sulco,

principalmente de maneira parcelada, permite auferir maior retorno no uso desse fosfato (Tabela 5). Contrariamente, no caso do FA, o parcelamento não parece contribuir para maior eficiência, o que, de certa forma, reforça a premissa de que o tempo de contato com o solo é fundamental para a solubilização dos fosfatos naturais brasileiros (Barbosa Filho, 1984; Goedert et al., 1986; Lopes, 1999; Novais & Smyth, 1999).

A avaliação de fontes de fósforo de reatividade variável costuma ser feita comparativamente às respostas obtidas para uma fonte solúvel. Nesse sentido, são apresentados os dados de eficiência agrônômica, em termos de aquisição de P (Tabela 6) e de produção de grãos (Tabela 7), tomando-se como referencial o superfosfato triplo (eficiência = 100%). A eficiência agrônômica de aquisição foi influenciada pelas fontes de P, ao passo que a eficiência quanto à produção de grãos foi afetada pela interação das fontes e modos de aplicação do nutriente (Tabela 9A).

TABELA 6 Eficiência agrônômica¹ de aquisição de P (%) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos).

Fontes de P	Eficiência agrônômica – aquisição de P
ST	100 ab
TM	125 a
FR	101 ab
FA	67 b

¹ Tratamento com superfosfato triplo como referência.

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se, pelos dados de eficiência de aquisição (Tabela 6), que, na média dos três modos de aplicação, o termofosfato tendeu a proporcionar maior aproveitamento de P e o fosfato de Araxá foi a fonte de menor capacidade de

suprimento do nutriente. Destaca-se, ainda, a igualdade estatística do fosfato reativo ao superfosfato triplo e termofosfato.

A maior eficiência de aquisição de P do termofosfato pode ser devido ao efeito sinérgico da reação alcalina dessa fonte e da presença de silício e magnésio sobre a disponibilidade e absorção de fósforo (Adams, 1980; Goedert et al., 1986; Malavolta & Ponchio, 1987; Malavolta, 2003). O pior desempenho do fosfato de Araxá deve-se, certamente, à baixa reatividade característica desse fosfato (Barbosa Filho, 1984; Goedert & Lobato, 1984; Goedert & Lopes, 1987; Lopes, 1999; Novais & Smyth, 1999; Sousa & Lobato, 2003). Já no caso do fosfato reativo, estudos têm revelado que a solubilização é algo diferente do que acontece com os fosfatos naturais brasileiros, de modo que a liberação de fósforo se dá de forma mais fácil e intensa, viabilizando sua utilização para culturas anuais (Kaminski & Peruzzo, 1997; Lopes, 1999; Horowitz & Meurer, 2003), mesmo em aplicações localizadas no sulco de semeadura quando o solo já tem maior disponibilidade de P (Sousa & Lobato, 2003).

De maneira análoga à eficiência relativa (Tabela 5), a eficiência agrônômica para produção de grãos variou menos do que se poderia esperar em função da combinação de fontes e modos de aplicação de P (Tabela 7). Foram detectadas diferenças entre fontes apenas quando a aplicação foi parcelada. No caso, o FR e o FA apresentaram, respectivamente, a maior e a menor eficiência, mas não diferiram estatisticamente do ST e do TM. Somente a eficiência do fosfato reativo foi dependente do modo de aplicação, sendo maior quando o produto foi utilizado de forma parcelada em aplicações anuais no sulco.

Os dois fosfatos naturais apresentaram desempenho contrastante, notadamente na aplicação parcelada no sulco. Os resultados evidenciam que o fosfato de Araxá e o fosfato reativo são realmente produtos muito distintos quanto ao potencial de suprimento de P ao longo do tempo. Aparentemente, na aplicação a lanço, os dois fosfatos tiveram comportamento bastante similar.

Entretanto, na aplicação localizada no sulco, o fosfato reativo despontou como fonte mais promissora. O parcelamento da aplicação no sulco incrementou em muito a resposta do milho ao fosfato reativo, mas não contribuiu para maior eficiência do fosfato de Araxá. Os aspectos de causa e efeito que justificariam esses resultados estão relacionados primariamente à origem geológica distinta desses fosfatos. Isso implica em diferenças de reatividade ou solubilidade dos dois produtos (Chien & Menon, 1995; Rajan et al., 1996; Kaminski & Peruzzo, 1997; Novais & Smyth, 1999), cujos detalhes foram abordados na discussão dos capítulos anteriores.

TABELA 7 Eficiência agronômica¹ de produção de grãos (%) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (total de três cultivos).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	100 a A	100 a A	100 ab A
TM	104 a A	114 a A	98 ab A
FR	74 a B	94 a B	133 a A
FA	79 a A	79 a A	62 b A

¹ Tratamento com superfosfato triplo como referência.

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

5.2 Eficiência econômica

Analisando a relação benefício/custo dos tratamentos (Tabela 8), depreende-se que, embora associado à obtenção de boas produtividades, o termofosfato foi a fonte de menor vantagem econômica, devido ao custo proporcionalmente mais elevado em relação às demais. O alto custo parece

realmente ser a principal limitação do uso do termofosfato, haja vista que, agronomicamente, o produto costuma superar em eficiência os superfosfatos (Goedert & Lopes, 1987).

Apesar da tendência de apresentarem menor efetividade em termos agronômicos (Tabela 7), as fontes menos solúveis, FR e FA, foram economicamente mais viáveis. Dependendo do modo de aplicação, o uso do fosfato de Araxá resultou em relação benefício/custo duas vezes mais compensadora que a obtida com o superfosfato triplo (Tabela 8). Essa situação deve-se a uma conjunção de fatores. Pelo próprio fato de avaliar-se a produção acumulada de vários cultivos, normalmente já há alguma redução nas diferenças entre tratamentos com adubação fosfatada (Goedert & Lobato, 1984; Sousa & Lobato, 2003). Além disso, as condições de solo (existência de certa reserva de P em decorrência de adubações passadas) e da planta (eficiência genotípica a P) parecem ter favorecido as respostas do milho nos tratamentos com menor disponibilização de fósforo (Capítulo 3), fazendo com que as discrepâncias de produtividade não fossem tão acentuadas como tipicamente seria esperado. Um terceiro aspecto a ser considerado é que, nos últimos tempos, a utilização agrícola do fosfato de Araxá decresceu substancialmente e o menor preço do produto em comparação às outras fontes, pode, em parte, ser reflexo da baixa demanda.

A variação da eficiência agronômica em cada modo de aplicação (Tabela 7) condicionou a economicidade dos fosfatos naturais. A distribuição localizada e, principalmente, de forma parcelada, melhorou significativamente a relação benefício/custo obtida com o fosfato reativo. Contrariamente, o parcelamento prejudicou o desempenho econômico do fosfato de Araxá (Tabela 8).

TABELA 8 Relação benefício/custo em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (acumulada de três cultivos).

Fontes de P	Modos de aplicação			Média
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado	
ST	4,5	4,8	4,3	4,5
TM	3,2	3,8	2,9	3,3
FR	4,2	5,8	7,4	5,8
FA	9,1	9,7	6,9	8,6
Média	5,3	6,0	5,4	5,6

É importante mencionar que, no cálculo da relação benefício/custo, foi considerado o investimento em adubação fosfatada realizado de uma única vez, o que não necessariamente se aplicaria ao modo de fornecimento parcelado de P. Assim sendo, com o parcelamento da adubação, tem-se ainda a possibilidade de ratear o investimento ao longo do período dos três cultivos, o que poderia representar uma vantagem adicional significativa.

Dada a semelhança dos tratamentos quanto à eficiência agrônômica, as informações oriundas de uma avaliação econômica criteriosa adquirem importância ainda maior, como subsídio para tomada de decisão na escolha da fonte e do método de aplicação de fósforo.

Os resultados da Tabela 9 permitem conhecer, para o termofosfato, fosfato reativo e fosfato de Araxá, qual o custo proporcional da tonelada desses produtos, em relação ao superfosfato triplo, que permitiria obter a mesma eficiência/custo do superfosfato. Em outras palavras, os valores apresentados na referida tabela são estimativas de qual deveria ser o preço dos fosfatos para igualar a relação eficiência/custo de todos eles, tomando como referência os dados relativos ao superfosfato triplo e considerando a dose padronizada de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Embora restrinjam-se ao caso do presente experimento, tais estimativas constituem um bom exemplo para discussão e uma forma de

comparação interessante para outras áreas com características de resposta à adubação semelhantes às encontradas neste estudo (áreas já adubadas anteriormente e com respostas similares para diferentes estratégias de manejo da adubação).

Verifica-se que, na média das três formas de aplicação, o custo do termofosfato deveria corresponder a, no máximo, 41,4% do preço do superfosfato triplo para viabilizar sua utilização nas condições do experimento. De acordo com a cotação atual desses produtos, essa proporção é de 56,1% (Tabela 9). Inversamente, nas mesmas circunstâncias, o fosfato de Araxá poderia custar até 36,1%, mas o custo atual é de 19,4% em relação ao superfosfato triplo. Interessante notar que o fosfato reativo foi mais influenciado pelo modo de aplicação, sendo que maiores vantagens, ponderando custo e eficiência agrônômica, foram obtidas conforme a seqüência: aplicação a lanço < aplicação no sulco < aplicação no sulco parcelada.

TABELA 9 Ponto de equivalência de preço da tonelada de fertilizante (% do custo do superfosfato triplo), o qual permitiria a mesma relação eficiência/custo do superfosfato triplo.

Fontes de P	Modos de aplicação			Média	% atual
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado		
TM	40,8	44,8	38,5	41,4	56,1
FR	53,1	67,5	95,5	72,0	54,6
FA	38,9	38,9	30,5	36,1	19,4

Com base nos resultados de três safras e considerando os preços atuais dos fertilizantes, pode-se concluir que o fosfato de Araxá e o fosfato reativo seriam as melhores alternativas na escolha de fontes de fósforo para o milho, apresentando melhor compatibilização do custo do fertilizante e da resposta em produção de grãos para o investimento em 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Todavia, essas

alternativas não estão vinculadas à obtenção de produtividades iguais às proporcionadas pelo superfosfato triplo, mas iguais às aquelas observadas nos respectivos tratamentos. Portanto, os valores percentuais da tabela servem como indicadores do custo, abaixo do qual haveria lucro com determinado tratamento comparativamente ao uso da fonte padrão (superfosfato triplo).

5.3 Considerações finais

As características de solo e planta, de certa forma peculiares a este estudo, conduziram a padrões de resposta que diferem do que seria normalmente esperado num experimento de adubação em solo de cerrado pobre em fósforo. Entretanto, a obtenção de eficiência similar para tratamentos bastante diferentes é uma perspectiva concreta nas áreas de cerrado submetidas ao cultivo e adubadas há mais tempo, situações em que o solo adquire caráter-fonte de fósforo mais pronunciado ou reduz o caráter-dreno. Dynia & Camargo (1997) verificaram que, após 17 cultivos (arroz, feijão, trigo e milho) durante seis anos e meio com adubações de manutenção, houve redução da capacidade de adsorção de P de um latossolo argiloso de cerrado, significando a possibilidade de diminuição na adubação fosfatada.

Os resultados de médio prazo (três safras) confirmam a premissa de que o tempo de contato com o solo é um forte condicionante da eficiência agrônômica do fosfato nacional (FA), como enfatizado por diversos autores (Barbosa Filho, 1984; Goedert et al., 1986; Lopes, 1999; Novais & Smyth, 1999). Por outro lado, além do tempo de contato, a distribuição em um volume de solo mais restrito parece ser um ponto chave para a eficiência do fosfato importado (FR), como destacado por Novais (1999). Enfim, as estratégias para otimizar o retorno com o uso de fosfatos naturais devem envolver o manejo diferenciado dessas duas fontes. Já no caso das fontes de maior solubilidade

(TM e ST), a forma de aplicação passa a ser um detalhe menos importante para a eficiência agrônômica no contexto da produção acumulada de vários cultivos.

Resguardada a importância das avaliações agrônômicas, é preciso sempre levar em conta o retorno econômico das diferentes combinações de fontes e métodos de aplicação de fósforo, principalmente quando as produtividades obtidas tendem à equidade, como no presente estudo. No caso em questão, ficou claro que os tratamentos mais convenientes quanto ao aspecto econômico não necessariamente correspondem àqueles agronomicamente mais promissores. De modo geral, apesar de não proporcionar as produtividades mais elevadas, o uso dos fosfatos naturais (FR e FA) foi mais compensador nas condições experimentais deste estudo.

Considerando o exposto nas discussões dos capítulos anteriores e, mais especificamente, os resultados da avaliação técnico-econômica, pode-se sugerir que alguns tratamentos devem ser mais apropriados ao manejo da adubação fosfatada na área estudada. A aplicação parcelada dos fertilizantes e, em especial, a opção pelo fosfato reativo, permitiriam associar boas produtividades, menor fixação de fósforo, melhor efeito residual (manutenção da fertilidade do solo) e maior lucratividade. Mantidas as tendências de resposta observadas para o milho, tal estratégia de manejo aproximaria-se da condição ideal apontada por Helyar (1998), pela qual a maximização da eficiência de uso do fósforo nos sistemas agrícolas é obtida minimizando-se as quantidades de P requeridas para manter um nível economicamente ótimo de fertilidade do solo. De acordo com essa diretriz, a eficiência definitiva é alcançada em sistemas em que a quantidade de P na adubação de manutenção é igual à quantidade exportada com as colheitas.

6 CONCLUSÕES

Nas condições experimentais desse estudo, concluiu-se que:

1. os índices de eficiência técnica, relativos à produção acumulada de três cultivos de milho, foram similares para vários dos tratamentos. O fosfato reativo de Arad foi a única fonte cuja eficiência agrônômica dependeu do modo de aplicação, sendo maior quando o adubo foi aplicado no sulco e parcelado anualmente. As fontes diferiram entre si, quanto à eficiência agrônômica, apenas na aplicação parcelada. O fosfato reativo e o fosfato de Araxá apresentaram, respectivamente, a maior e a menor eficiência nesse modo de aplicação;
2. a eficiência técnica dos fosfatos naturais (FR e FA) aumentou continuamente no decorrer dos três cultivos, o que não se verificou para as fontes de maior solubilidade (TM e ST);
3. os tratamentos com maior eficiência econômica não corresponderam aos de maior eficiência agrônômica. O termofosfato foi tecnicamente promissor, mas, em retorno econômico, foi superado pelas demais fontes. Os dois fosfatos naturais apresentaram relação benefício/custo mais compensadora;
4. o parcelamento da adubação proporcionou maior eficiência agrônômica e econômica para o fosfato reativo, o que não ocorreu no caso do fosfato de Araxá.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, F. Interactions of phosphorus with other elements in soil and in plants. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 655-680.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa, 1999. p. 25-32.

ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, G. E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J. M.; VIEIRA, J. R.; LOUREIRO, J. E. Milho. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa, 1999. p. 314-316.

BARBOSA FILHO, M. P. Utilização de fosfatos naturais em solos de cerrado. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 28, p. 1-4, dez. 1984.

CHIEN, S. H.; LÉON, L. A.; TEJADA, H. R. Dissolution of phosphate rocks in acid Colombian soils as related to soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, n. 6, p. 1267-1271, Nov./Dec. 1980.

CHIEN, S. H.; MENON, R. G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fertilizer Research*, Dordrecht, v. 41, n. 3, p. 227-234, 1995.

COELHO, A. M.; ALVES, V. M. C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: *SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA*, 2003, Piracicaba. Anais... Pppiraacabá: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

DYNIA, J. F.; CAMARGO, O. A. Efeitos da adubação fosfatada e da calagem sobre a adsorção de fósforo em um Latossolo Vermelho-Escuro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 32, n. 8, p. 865-868, ago. 1997.

EMBRAPA. Embrapa Solos, Embrapa Informática Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4. 0. In: **REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos, SP. Programa e resumos....** São Carlos: UFScar, 2000. p. 255-258.

FIXEN, P. E.; HALVORSON, A. D. Optimum phosphorus management for small grain production. **Better Crops With Plant Food, Atlanta, v. 75, n. 3, p. 26-29, 1991.**

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV. FGV Dados: Commodities, preços médios no mercado interno (Mercado físico) – Preço médio do milho amarelo semiduro, bolsa de cereais de São Paulo. 2004. Disponível em: <http://fgvdados.fgv.br/dsp_series.asp> Acesso em: 24 mar. 2004.

GOEDERT, W. J.; LOPES, A. S. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para culturas anuais, perenes, pastagens e reflorestamento. In: **SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO, 1987, São Paulo. Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1987. p. 24-49.

GOEDERT, W. J.; LOBATO, E. Eficiência agronômica de fosfatos em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 8, n. 1, p. 97-102, jan./abr. 1984.**

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Fósforo. In: **GOEDERT, W. J. (Ed.). Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo.** São Paulo: Nobel, 1986. p. 129-166.

HELYAR, K. R. Efficiency of nutrient utilization and sustaining soil fertility with particular reference to phosphorus. **Field Crops Research, Amsterdam, v. 56, n. 1/2, p. 187-195, Mar. 1998.**

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. Anais...** Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31 p. (Boletim técnico, n. 3).

LOBATO, E.; SOUSA, D. M. G. Fertilidade do solo e máxima eficiência produtiva. In: **SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). Cerrado: correção do solo e adubação.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 257-282.

LOPES, A. S. Fosfatos naturais. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.** Viçosa, 1999. p. 65-66.

MALAVOLTA, E. Fósforo na planta e interação com outros elementos. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003,** Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

MALAVOLTA, E.; PONCHIO, C. O. Utilização eficiente do fósforo no sistema solo-planta. In: **SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO, 1987,** São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1987. p. 75-132.

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

NOVAIS, R. F. Utilização de fosfatos naturais de baixa reatividade. In: **COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.** Viçosa, 1999. p. 62-64.

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

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Aspectos econômicos da adubação fosfatada para cultura do milho. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 617-621, jul./set. 2001.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Potafos, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C. A. Interpretação de resultados de análise de solo. In: **RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.).** **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. p. 8-13.

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

REETZ JUNIOR, H. F.; FIXEN, P. E. Economics of long-term vs short-term soil fertility management. *Better Crops With Plant Food*, Atlanta, v. 76, n. 2, p. 8-11, 1992.

SCOLARI, D.; LOBATO, E.; MAGALHÃES, J. C. A. J. Um estudo econômico sobre fósforo e calcáreo em solos de cerrado do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 17, n. 4, p. 505-511, abr. 1982.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 102, jun. 2003. 16 p. (Encarte Técnico).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: **SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.).** Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 147-168.

CONCLUSÕES GERAIS

Nas condições experimentais do estudo, concluiu-se que:

1. a adubação fosfatada com as quatro fontes, aplicadas em área total ou no sulco de semeadura, proporcionou ganhos de produtividade do milho. As respostas aos tratamentos foram mais discrepantes inicialmente e tenderam a igualar-se com os cultivos sucessivos;
2. nas duas primeiras safras, as fontes de solubilidade mais elevada (superfosfato triplo e termofosfato) tenderam a ocasionar maiores produções. Os fosfatos naturais (fosfato de Araxá e fosfato reativo de Arad) apresentaram aumento de eficiência com o tempo, equiparando-se às fontes mais solúveis no terceiro cultivo;
3. o fosfato de Araxá apresentou menor potencial de suprimento de fósforo. O uso do termofosfato associou bons rendimentos e estabilidade de produção ao longo do período experimental. Contrariamente ao superfosfato triplo, o fosfato reativo foi a fonte de pior desempenho no ano da aplicação dos tratamentos, porém, propiciou altas produções na terceira safra;
4. nos resultados acumulados dos três cultivos, foram detectadas mais diferenças entre tratamentos quanto à absorção de P e, nem tanto, em termos de produtividade. De modo geral, o uso de fontes com solubilidade variável e em distintos modos de aplicação proporcionou incrementos semelhantes na produção acumulada;
5. somente para o fosfato reativo de Arad, o rendimento final de grãos dependeu de como o adubo foi distribuído. Melhores respostas foram obtidas conforme a seqüência dos modos de aplicação: a lanço em área total < localizada no sulco < parcelada no sulco;

6. o parcelamento da dose total dos fosfatos em aplicações anuais no sulco de semeadura não comprometeu a produtividade do milho e propiciou maior efeito residual, notadamente no caso do fosfato reativo;
7. os índices de eficiência técnica, relativos à produção acumulada de três cultivos de milho, foram similares para vários dos tratamentos. Os tratamentos com maior eficiência econômica não corresponderam aos de maior eficiência agrônômica. O termofosfato foi tecnicamente promissor, mas, em retorno econômico, foi superado pelas demais fontes. Os dois fosfatos naturais apresentaram relação benefício/custo mais compensadora, notadamente o fosfato de Araxá;
8. o parcelamento da adubação em aplicações anuais no sulco de semeadura resultou em maior eficiência agrônômica e econômica para o fosfato reativo. O mesmo não ocorreu no caso do fosfato de Araxá, para o qual parece não haver clara vantagem agrônômica para nenhum dos métodos de aplicação, tendo o parcelamento implicado em menor relação benefício/custo.

ANEXOS

ANEXO A		Página
TABELA 1A	Resumo das análises de variância para teor foliar de fósforo nos três cultivos de milho	155
TABELA 2A	Resumo das análises de variância para número de plantas e número de espigas, nos três cultivos de milho	156
TABELA 3A	Resumo das análises de variância para peso de plantas e peso de espigas, nos três cultivos de milho	157
TABELA 4A	Resumo das análises de variância para produção de grãos e teor de fósforo nos grãos, nos três cultivos de milho	158
TABELA 5A	Resumo das análises de variância para acúmulo de fósforo nos grãos (APG) e acúmulo total de fósforo nas plantas (APT), nos três cultivos de milho	159
TABELA 6A	Resumo das análises de variância para os índices de eficiência de absorção (IEA) e de utilização (IEU) de fósforo e de produção de grãos (IEP), no primeiro e terceiro cultivos de milho	160
TABELA 7A	Resumo das análises de variância para peso de plantas, produção de grãos, extração, porcentagem de redistribuição e exportação de P, acumulados de três cultivos de milho	161

TABELA 8A	Resumo das análises de variância para os índices de eficiência de absorção (IEA) e de utilização (IEU) de fósforo, eficiência de produção de grãos (IEP) e eficiência do fertilizante (IEF) acumulados de três cultivos, e fósforo disponível residual no solo após três cultivos de milho	162
TABELA 9A	Resumo das análises de variância para eficiência relativa dos tratamentos em três cultivos de milho e eficiência relativa, eficiência agrônômica de aquisição e eficiência agrônômica de produção de grãos ao final dos três cultivos (acumulado)	163

TABELA 1A. Resumo das análises de variância para teor foliar de fósforo nos três cultivos de milho.

Fontes de variação	G.L.	QM		
		2000/2001	2001/2002	2002/2003
		Teor foliar de P	Teor foliar de P	Teor foliar de P
Fontes de P	3	0,34 *	0,43 **	0,07 ns
Modos de aplicação	1	0,30 ns	0,04 ns	0,00 ns
Fontes x Modos	3	0,06 ns	0,44 **	0,45 **
Fatorial vs Adicional	1	1,16 **	0,63 **	0,62 **
Tratamentos	(8)	0,34 **	0,41 **	0,27 **
Blocos	3	0,04 ns	0,02 ns	0,08 ns
Resíduo	24	0,08	0,06	0,03
Total	35			
C.V. tratamentos (%)		13,75	12,06	8,40

ns = não significativo

* e ** = significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 2A. Resumo das análises de variância para número de plantas e número de espigas, nos três cultivos de milho.

Fontes de variação	G.L.	QM					
		2000/2001		2001/2002		2002/2003	
		Nº de plantas	Nº de espigas	Nº de plantas	Nº de espigas	Nº de plantas	Nº de espigas
Fontes de P	3	5215617,9 ns	10037955,9 ns	4750881,7 ns	10744050,2 ns	34896001,4 **	58444027,3 ns
Modos de aplicação	1	963619,0 ns	107300,3 ns	0,3 ns	4530050,0 ns	2169965,3 ns	180148671,1 *
Fontes x Modos	3	41331817,3 ns	47043771,5 ns	500117,2 ns	12886428,3 ns	2670391,1 ns	14111777,2 ns
Fatorial vs Adicional	1	47560,4 ns	12968900,1 ns	5251770,4 ns	11077924,5 ns	167211756,3 **	352256576,9 **
Tratamentos	(8)	17581685,6 ns	23040172,8 ns	2625595,9 ns	10812426,3 ns	35260112,4 **	93759082,7 **
Blocos	3	179622274,4 **	165522981,1 **	39458284,1 **	94596044,9 **	61249206,9 **	104948073,4 *
Resíduo	24	23424034,1	22096055,8	6792630,3	15718245,7	6982095,8	24140644,4
Total	35						
C.V. tratamentos (%)		11,4	10,7	4,8	7,8	5,5	10,8

ns = não significativo

* e ** = significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 3A. Resumo das análises de variância para peso de plantas e peso de espigas, nos três cultivos de milho.

Fontes de variação	G.L.	QM					
		2000/2001		2001/2002		2002/2003	
		Peso plantas	Peso espigas	Peso plantas	Peso espigas	Peso plantas	Peso espigas
Fontes de P	3	156636,1 ns	2208272,2 *	7683779,4 *	3477925,2 **	136696,1 ns	609626,6 ns
Modos de aplicação	1	575128,1 ns	15664,5 ns	386980,0 ns	125751,1 ns	2804304,0 ns	5815755,1 **
Fontes x Modos	3	575758,9 *	961505,6 ns	857090,8 ns	140537,7 ns	4964730,2 **	2078460,0 *
Fatorial vs Adicional	1	465290,9 ns	3129585,0 *	37932775,8 **	37193875,0 **	10682597,5 **	28320338,0 **
Tratamentos	(8)	404700,5 ns	1581822,9 *	7992795,8 **	6021876,9 **	3598897,6 **	5275044,1 **
Blocos	3	2182824,2 **	1373648,3 ns	2476605,6 ns	1070431,3 ns	15826998,3 **	938656,3 ns
Resíduo	24	182892,6	485106,6	1887022,2	491672,7	1019043,6	639646,7
Total	35						
C.V. tratamentos (%)		9,6	12,2	19,1	6,5	17,7	10,2

ns = não significativo

* e ** = significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 4A. Resumo das análises de variância para produção de grãos e teor de fósforo nos grãos, nos três cultivos de milho.

Fontes de variação	G.L.	QM					
		2000/2001		2001/2002		2002/2003	
		Produção	Teor de P	Produção	Teor de P	Produção	Teor de P
Fontes de P	3	1021456,8 *	1,9 **	1665926,5 **	0,6 ns	370765,4 ns	1,0 *
Modos de aplicação	1	7230,0 ns	5,0 **	81406,1 ns	3,7 **	3689007,0 **	4,8 **
Fontes x Modos	3	444292,6 ns	4,7 **	24691,5 ns	1,6 *	1315609,1 *	0,2 ns
Fatorial vs Adicional	1	1488260,2 *	0,9 ns	20722849,0 **	0,8 ns	16923107,5 **	3,0 **
Tratamentos	(8)	731592,3 *	3,2 **	3234513,6 **	1,4 **	3208904,8 **	1,4 **
Blocos	3	634874,8 ns	0,2 ns	445353,6 ns	0,7 ns	546660,7 ns	0,7 ns
Resíduo	24	224253,0	0,3	266917,2	0,4	387149,9	0,3
Total	35						
C.V. tratamentos (%)		12,2	13,4	7,0	16,4	10,6	11,7

ns = não significativo

* e ** = significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 5A. Resumo das análises de variância para acúmulo de fósforo nos grãos (APG) e acúmulo total de fósforo nas plantas (APT), nos três cultivos de milho.

Fontes de variação	G.L.	2000/2001			2001/2002			2002/2003		
		APG	APT	APG	APT	APG	APT	APG	APT	
Fontes de P	3	46,0 *	46,8 *	114,1 **	151,1 **	62,8 *	59,1 *			
Modos de aplicação	1	76,6 *	97,7 **	188,7 **	128,8 *	22,6 ns	10,2 ns			
Fontes x Modos	3	103,2 **	97,5 **	95,2 *	85,6 *	6,5 ns	9,6 ns			
Fatorial vs Adicional	1	67,8 *	89,7 *	491,2 **	797,3 **	654,9 **	778,5 **			
Tratamentos	(8)	74,0 **	77,5 *	163,5 **	204,5 **	110,7 **	124,3 **			
Blocos	3	12,9 ns	15,6 ns	76,8 *	88,8 *	21,8 ns	18,3 ns			
Resíduo	24	11,3	12,3	21,2	25,2	15,0	16,2			
Total	35									
C.V. tratamentos (%)		19,8	18,1	16,4	15,2	15,0	13,9			

ns = não significativo
 * e ** = significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 6A. Resumo das análises de variância para os índices de eficiência de absorção (IEA) e de utilização (IEU) de fósforo e de produção de grãos (IEP), no primeiro e terceiro cultivos de milho.

Fontes de variação	G.L.	QM		G.L.	QM			
		2000/2001	2002/2003		2000/2001		2002/2003	
		IEA	IEA		IEU	IEP	IEU	IEP
Fontes de P	3	7610,3 *	9556,0 *	3	4693,6 **	8607,2 **	1463,2 *	2751,6 *
Modos de aplicação	1	15708,8 *	1667,5 ns	1	8819,9 **	12090,1 **	6246,8 **	10011,1 **
Fontes x Modos	3	15835,6 **	1558,1 ns	3	8097,6 **	16253,4 **	307,1 ns	541,0 ns
Fatorial vs Adicional	-	-	-	1	1235,8 ns	1144,0 ns	7993,1 **	11755,6 **
Tratamentos	-	-	-	(8)	6053,7 **	10977,0 **	2443,8 **	3955,6 **
Blocos	3	1594,8 ns	3336,3 ns	3	307,2 ns	716,3 ns	594,8 ns	2173,0 *
Resíduo	21	2091,5	2690,4	24	681,5	1268,1	430,9	721,0
Total	31			35				
C.V. tratamentos (%)		18,1	13,4		12,5	14,7	10,0	11,4

ns = não significativo

* e ** = significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 7A. Resumo das análises de variância para peso de plantas, produção de grãos, extração, porcentagem de redistribuição e exportação de P, acumulados de três cultivos de milho.

Fontes de variação	G.L.	QM					
		Peso de plantas	Produção	Extração	Redistribuição	Exportação por hectare	Exportação por tonelada de grão
Fontes de P	3	6081046,6 ns	6559382,4 **	622,7 **	5,8 ns	543,8 **	0,53 *
Modos de aplicação	2	4680112,3 ns	2681951,3 ns	48,2 ns	24,3 **	58,2 ns	0,70 *
Fontes x Modos	6	9626043,1 *	3710388,7 *	212,4 *	6,1 ns	154,8 *	0,39 *
Fatorial vs Adicional	1	106739241,0 **	99801603,7 **	4694,3 **	8,2 ns	3355,9 **	1,66 **
Tratamentos	(12)	16008238,7 **	12258832,1 **	661,1 **	9,2 **	502,7 **	0,58 **
Blocos	3	86805431,9 **	3786898,4 *	386,2 **	22,1 **	231,5 *	0,23 ns
Resíduo	36	3838598,3	1198378,8	72,9	3,1	64,5	0,14
Total	51						
C.V. tratamentos (%)		11,2	6,3	10,2	2,3	11,1	9,0

ns = não significativo

* e ** = significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 8A. Resumo das análises de variância para os índices de eficiência de absorção (IEA) e de utilização (IEU) de fósforo, eficiência de produção de grãos (IEP) e eficiência do fertilizante (IEF) acumulados de três cultivos, e fósforo disponível residual no solo após três cultivos de milho.

Fontes de variação	G.L.	QM			G.L.	QM		
		IEA ¹	IEA ²	IEF		IEU	IEP	P residual
Fontes de P	3	100658,9 **	100522,5 **	1065,8 **	3	989,1 *	1851,0 *	75,5 **
Modos de aplicação	2	7729,1 ns	7771,0 ns	434,1 ns	2	1103,9 *	2344,7 *	242,9 **
Fontes x Modos	6	34238,2 *	34352,9 *	603,1 *	6	808,9 *	1369,6 *	26,1 **
Fatorial vs Adicional	-	-	-	-	1	6257,5 **	6616,0 **	69,4 **
Tratamentos	-	-	-	-	(12)	1357,2 **	2089,7 **	78,2 **
Blocos	3	63917,9 **	138534,5 **	3576,6 **	3	685,0 ns	834,7ns	6,0 ns
Resíduo	33	11881,0	11876,7	185,6	36	249,9	449,5	6,2
Total	47				51			
C.V. tratamentos (%)		10,0	24,0	20,6		7,5	8,7	19,6

¹ IEA incluindo a contribuição das reservas de P do solo; ² IEA descontada a contribuição das reservas de P do solo.

ns = não significativo

* e ** = significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 9A. Resumo das análises de variância para eficiência relativa dos tratamentos em três cultivos de milho e eficiência relativa, eficiência agrônômica de aquisição e eficiência agrônômica de produção de grãos ao final dos três cultivos (acumulado).

Fontes de variação	G.L.	QM			G.L.	QM	G.L.	QM		
		Eficiência relativa						Eficiência relativa	Eficiência agr. aquisição	Eficiência agr. produção
		2000/01	2001/02	2002/03						
Fontes de P	-	-	-	-	3	417,4 **	3	6821,0 **	2485,9 **	
Modos de aplicação	-	-	-	-	2	170,7 ns	2	315,1 ns	359,6 ns	
Fontes x Modos	-	-	-	-	6	236,1 *	6	2021,6 ns	1312,2 *	
Fatorial vs Adicional	-	-	-	-	1	6351,9 **	-	-	-	
Tratamentos	12	764,4 **	981,9 **	1687,7 **	(12)	780,2 **	-	-	-	
Blocos	3	587,4 *	297,3 ns	260,9 ns	3	241,1 *	3	2792,1 ns	2157,5 **	
Resíduo	36	180,0	122,2	192,2	36	76,3	33	1271,7	394,8	
Total	51				51		47			
C.V. tratamentos (%)		11,5	7,9	9,0		6,3		36,4	21,0	

ns = não significativo

* e ** = significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente.

TABELA 1B	Teor foliar de P (g kg^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo)	165
TABELA 2B	Teor foliar de P (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (2 ^o cultivo)	165
TABELA 3B	Teor foliar de P (g kg^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo)	166
TABELA 4B	Acúmulo total de P (kg ha^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1 ^o cultivo)	166
TABELA 5B	Acúmulo total de P (kg ha^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (2 ^o cultivo)	167
TABELA 6B	Acúmulo total de P (kg ha^{-1}) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3 ^o cultivo)	167
TABELA 7B	Produção de grãos (kg ha^{-1}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho em três cultivos sucessivos	168
TABELA 8B	Fósforo disponível pela resina de troca iônica (mg dm^{-3}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho	169

TABELA 1B. Teor foliar de P (g kg⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (1^o cultivo).

Fontes de P	Teor foliar de P
ST	2,3 ab
TM	2,4 a
FR	2,1 ab
FA	2,0 b
Testemunha	1,6 **

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 2B. Teor foliar de P (g kg⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (2^o cultivo).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	2,0 a B	2,4 a A
TM	2,1 a A	2,3 a A
FR	2,2 a A	1,5 b B
FA	1,8 a A	1,7 b A
Testemunha	1,6 **	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 3B. Teor foliar de P (g kg⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (3^o cultivo).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	1,9 b B	2,4 a A
TM	1,9 b A	2,0 b A
FR	2,3 a A	1,7 b B
FA	2,1 ab A	2,0 b A
Testemunha	1,6 **	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 4B. Acúmulo total de P (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (1^o cultivo).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	23,1 a A	18,1 b A
TM	17,5 ab B	28,6 a A
FR	18,0 ab A	19,0 b A
FA	14,2 b B	21,0 b A
Testemunha	14,9 *	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

* = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,05$).

TABELA 5B. Acúmulo total de P (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (2^o cultivo).

Fontes de P	Modos de aplicação	
	Lanço	Sulco
ST	35,5 ab A	38,7 a A
TM	42,0 a A	37,4 a A
FR	38,2 ab A	25,7 b B
FA	31,4 b A	29,3 ab A
Testemunha	19,8 **	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 6B. Acúmulo total de P (kg ha⁻¹) em função de fontes de fósforo na cultura do milho (3^o cultivo).

Fontes de P	Conteúdo total de P
ST	30,3 ab
TM	34,0 a
FR	30,7 ab
FA	27,4 b
Testemunha	15,8 **

Médias seguidas de mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 7B. Produção de grãos (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho em três cultivos sucessivos.

Tratamentos	Safrá		
	2000/01	2001/02	2002/03
Testemunha	3.316	5.269	3.951
ST lanço	4.282	7.883	5.834
TM lanço	3.794	8.160	6.111
FR lanço	3.731	7.444	5.301
FA lanço	3.951	7.043	5.926
ST sulco	4.313	8.059	6.042
TM sulco	4.408	8.097	6.667
FR sulco	3.190	7.574	7.160
FA sulco	3.967	7.204	6.019
ST sulco parcelado	3.683	7.968	6.134
TM sulco parcelado	3.384	7.396	6.829
FR sulco parcelado	4.659	7.921	6.852
FA sulco parcelado	3.463	6.345	6.019

TABELA 8B. Fósforo disponível pela resina de troca iônica (mg dm^{-3}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho.

Tratamentos	Safrá		
	2000/01 ^a	2001/02 ^b	2002/03 ^c
Testemunha	8	7	9
ST lanço	10	9	10
TM lanço	11	8	10
FR lanço	10	8	12
FA lanço	8	9	10
ST sulco	30	28	10
TM sulco	38	10	11
FR sulco	19	13	13
FA sulco	18	11	11
ST sulco parcelado	19	38	17
TM sulco parcelado	43	13	16
FR sulco parcelado	20	24	25
FA sulco parcelado	15	18	12

^a Amostragem feita na linha de plantio aos 25 dias após a semeadura do milho.

^b Amostragem feita na linha de plantio aos 30 dias após a semeadura do milho.

^c Amostragem com pontos de coleta nas linhas e entrelinhas do milho, após a colheita da 3ª safra (P disponível residual).