

EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DO MILHO EM RESPOSTA A FONTES E MODOS DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO¹

Ivânia Barbosa Araújo²
Álvaro Vilela de Resende³
Antonio Eduardo Furtini Neto²
Vera Maria de Carvalho Alves⁴
José Zilton Lopes Santos²

RESUMO

Em campo, num Argissolo Vermelho típico, textura argilosa, foi avaliada a eficiência nutricional do milho adubado com quatro diferentes fontes de fósforo (superfosfato triplo - ST, termofosfato magnesiano - TM, fosfato reativo de Arad - FR e fosfato de Araxá - FA), em dois modos de aplicação (a lanço em área total e no sulco de plantio). A dose aplicada correspondeu a 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, considerando-se o teor total de P₂O₅ das fontes. Utilizou-se ainda um tratamento adicional sem aplicação de P (testemunha). Foram analisados os teores de nutrientes nas folhas no florescimento e na parte aérea e nos grãos ao final do ciclo da cultura. Determinaram-se a produção de grãos e o acúmulo de P e foram calculados índices de eficiência nutricional do milho, em função dos tratamentos. Maior eficiência do fertilizante foi obtida com as fontes mais solúveis (ST e TM) distribuídas a lanço e com o fosfato reativo (FR) aplicado no sulco de plantio. O milho híbrido HT 971011 foi eficiente em utilizar o P absorvido, particularmente nos tratamentos com menor disponibilidade do nutriente no solo (FA e testemunha), porém mostrou-se pouco responsivo à adubação fosfatada.

Palavras-chave: *Zea mays*, fosfatos, manejo de adubação.

¹ Extraído da dissertação de mestrado apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal de Lavras/UFLA. Trabalho financiado pelo CNPq. Aceito para publicação em 02.11.2002.

² Dep. de Ciência do Solo da UFLA, Caixa Postal 37, 37200-000 Lavras, MG. E-mail: ivania.araujo@bol.com.br, afurtini@ufla.br

³ Embrapa Cerrados, Rodovia BR 020, Km 18, 73301-970 Planaltina, DF. E-mail: alvaro@cpac.embrapa.br

⁴ Embrapa Milho e Sorgo, Rodovia MG 424, Km 65, 35701-970 Sete Lagoas, MG. E-mail: vera@cnpmc.embrapa.br

ABSTRACT

NUTRITIONAL EFFICIENCY OF MAIZE IN RESPONSE TO PHOSPHORUS SOURCES AND PLACEMENT

A study was carried out to evaluate the nutritional efficiency of maize fertilized with four different phosphorus sources (triple superphosphate - TS, magnesium termophosphate - MT, Arad reactive rock phosphate - RP, and Araxá rock phosphate - AP) in two placement options (broadcasted on the whole area and banded in the seeding furrow) tested in field conditions on a clayey Typical Red Argisol. The applied P ratio corresponded to 180 kg ha⁻¹ of P₂O₅, based on the total P₂O₅ of each fertilizer. A check, without P, was used as an additional treatment. The nutrient concentrations in the leaves at the flowering and in shoot and in grain at harvest were measured. The grain yield and P accumulation, as well as nutritional efficiency indexes of the maize, in response to the treatments were determined. Greater fertilizer efficiency was obtained with the most soluble P sources (TS and MT) when broadcasted and with the reactive phosphate (RP) banded in the planting furrow. The maize hybrid (HT 971011) was efficient at using absorbed P, particularly in the treatments with low soil P availability (AP and check); however, it showed to have low responsiveness to the phosphated fertilization.

Key words: *Zea mays*, phosphates, fertilization management.

INTRODUÇÃO

A baixa eficiência dos adubos fosfatados nos solos tropicais é controlada, em parte, pelos fenômenos de adsorção de P, sendo reflexo das cargas superficiais, variáveis com o pH e influenciadas principalmente pela proporção relativa de óxidos de Fe e Al, caolinita e matéria orgânica dos solos (14). Além disso, durante a dissolução de fertilizantes fosfatados, quando os produtos de solubilidade atingem valores elevados, ocorre a precipitação de P com formas iônicas de Al e de Fe em solos ácidos ou Ca em solos neutros ou alcalinos, formando compostos pouco solúveis (25).

Entre as estratégias apontadas por Sanchez e Salinas (26) para contornar a escassez do fósforo nos trópicos, além da determinação de métodos mais eficientes de aplicação dos fertilizantes e da pesquisa de fontes alternativas, estão a seleção e o uso de espécies e variedades mais tolerantes a baixos níveis de P no solo. A integração de sistemas de manejo e nutrição de plantas é importante para proporcionar o rendimento potencial das culturas em solos de baixa fertilidade (4).

A escolha do modo de aplicação do fósforo depende das características do fertilizante e do solo (22), sendo sua eficiência influenciada também por outros fatores, como as condições climáticas (12) e a própria planta (9). Como alternativa aos fertilizantes fosfatados solúveis, tem sido aumentado o uso de fosfatos naturais de menor solubilidade. Entretanto, os resultados de pesquisa e as indicações técnicas

para uso desses produtos (15, 19) ainda suscitam dúvidas sobre a melhor forma de manejo da adubação.

Alguns trabalhos têm mostrado grande adaptação da planta à utilização do P absorvido em solos distintos quanto à capacidade tampão de fosfato. Maior competição com o solo pelo fósforo aplicado como fertilizante faz com que a planta se ajuste para melhor utilizar o teor de P que lhe é colocado à disposição (10, 18, 21). Dessa forma, pode-se levantar a hipótese de que a aplicação de um fertilizante com liberação mais lenta de P force a planta a ser mais eficiente no uso do nutriente suprido ao longo do período de cultivo, com a vantagem de menor probabilidade de fixação do P antes que a planta esteja apta a absorvê-lo (sistema radicular formado).

Objetivou-se neste trabalho avaliar a eficiência nutricional do milho em resposta a fontes e modos de aplicação de fósforo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em campo (sequeiro), na Fazenda Boa Vista, município de Itumirim-MG, num Argissolo Vermelho típico (Podzólico Vermelho-Escuro), textura argilosa, originalmente sob vegetação de cerrado e com baixa disponibilidade de fósforo. A planta-teste foi o milho híbrido triplo HT 971011, desenvolvido pela Embrapa – CNPMS.

Utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de um fatorial (4×2) + 1, combinando quatro fontes de fósforo (ST - superfosfato triplo, TM - termofosfato magnésiano Yoorin, FR - fosfato reativo de Arad e FA - fosfato natural de Araxá) e duas formas de aplicação (a lanço em área total e localizada no sulco), tendo uma testemunha que não recebeu fósforo constituído o tratamento adicional.

Empregou-se uma dose de calcário dolomítico para elevar o pH em água próximo a 5,5. Na época do plantio, as fontes fosfatadas foram aplicadas na dose de 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 , considerando-se o teor de P_2O_5 total dos fertilizantes (Quadro 1). Na aplicação a lanço, os fertilizantes foram distribuídos manualmente em toda a área da parcela experimental e incorporados a 10 cm de profundidade. Na aplicação localizada, os fertilizantes foram distribuídos no fundo do sulco de plantio.

De acordo com a análise do solo e as recomendações de adubação do milho no Estado de Minas Gerais (1), foram aplicados 21 kg ha^{-1} de N (sulfato de amônio), 90 kg ha^{-1} de K_2O (cloreto de potássio) e 2 kg ha^{-1} de Zn (sulfato de zinco) no sulco de plantio. O plantio foi realizado em 25/11/2000. Após 15 dias, foi efetuado o desbaste, mantendo-se cinco

plantas por metro, em fileiras espaçadas de 0,9 m. Três adubações de cobertura com uréia foram aplicadas aos 25, 33 e 42 dias após o plantio, totalizando 170 kg ha⁻¹ de N.

QUADRO 1 - Caracterização química e física das fontes de P

Fontes de P	Características						
	P ₂ O ₅ total	P ₂ O ₅ solúvel	CaO	MgO	S	Equivalente CaCO ₃ ⁽³⁾	Granulometria
-----%-----							
ST	46,0	40,0 ⁽¹⁾	13	-	1,5	0	Granulado
TM	18,0	16,5 ⁽²⁾	20	7	-	50	Pó
FR	33,0	10,0 ⁽²⁾	37	-	-	-	Farelado
FA	24,0	4,0 ⁽²⁾	40	-	-	-	Pó

⁽¹⁾ P₂O₅ solúvel em água.
⁽²⁾ P₂O₅ solúvel em ácido cítrico a 2% (1:100).
⁽³⁾ Efeito alcalinizante dado em kg CaCO₃ para cada 100 kg do fertilizante.

Amostras de solo foram coletadas na área antes da aplicação dos tratamentos e aos 25 dias após a semeadura do milho nas linhas de plantio das parcelas, para caracterização do efeito dos tratamentos (Quadro 2). Dados de pH, Ca, Mg, Al e K foram obtidos com base nos métodos de Vettori (28), com modificações da EMBRAPA (7): pH em água, relação 1:2,5; Ca, Mg e Al, usando extrator KCl mol L⁻¹; e K, pelo extrator Mehlich-1. O P disponível foi determinado por extração com resina de troca iônica, conforme Raij e Quaggio (23).

Para a determinação da concentração de nutrientes, foram coletadas amostras de folhas do milho no florescimento (primeira folha oposta e abaixo da espiga). Com a mesma finalidade, na colheita, duas plantas e cinco espigas representativas de cada parcela foram separadas em folhas, colmos + pendões, palhas, sabugos e grãos, sendo esses materiais moídos e analisados conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (16). Mediu-se também a produção de matéria seca da parte aérea (sem espiga), de espigas e de grãos. Considerando-se os teores de P nas diferentes partes da planta e os respectivos pesos da matéria seca, foi obtido o conteúdo do nutriente na parte aérea (incluindo espiga) e nos grãos.

Conforme proposto por Moll et al. (17), índices de eficiência nutricional foram calculados (Quadro 3) visando à avaliação da contribuição dos processos de aquisição, translocação e utilização do P na resposta do milho aos tratamentos.

QUADRO 2 - Principais atributos químicos e físicos do solo (0-20 cm de profundidade) aos 25 dias após a semeadura do milho

Fontes de P	pH (H ₂ O)	P ...mg dm ⁻³ ...	K	Ca	Mgcmol _c dm ⁻³	Al	H+Al	V%	m
Lanço									
ST	5,0	9,7	206	1,6	0,5	0,5	6,5	29,7	17,3
TM	5,2	12,6	232	1,8	0,6	0,4	5,4	35,5	12,7
FR	5,0	10,6	224	1,2	0,4	0,6	6,2	26,0	23,7
FA	4,9	7,1	182	1,4	0,7	0,6	6,1	28,9	23,7
Sulco									
ST	5,1	22,9	157	1,9	0,6	0,4	5,9	33,2	14,3
TM	5,1	46,1	171	1,8	1,1	0,3	4,8	39,6	9,7
FR	5,0	21,4	185	1,4	0,6	0,5	5,4	31,4	16,7
FA	4,8	17,4	184	1,4	0,3	0,6	5,9	26,6	25,7
Testemunha	4,8	7,8	196	1,3	0,6	0,6	6,3	26,9	22,3

Dados obtidos da área antes da aplicação dos tratamentos: P disponível = 7,8 mg dm⁻³; P-remanescente = 12,3 mg dm⁻³; e matéria orgânica, areia, silte e argila = 33, 350, 140 e 510 g kg⁻¹, respectivamente.

Os dados experimentais foram submetidos a análises de variância. Utilizaram-se o teste de Tukey ($P < 0,05$), na comparação de médias de tratamentos do fatorial, e contrastes (teste F, $P < 0,05$), nas comparações envolvendo a testemunha (tratamento adicional) e o conjunto dos tratamentos do fatorial.

QUADRO 3 - Procedimentos de cálculo dos índices de eficiência nutricional

Índices de eficiência	Formas de cálculo ⁽¹⁾
Eficiência de absorção – IEA (kg kg ⁻¹)	Pp/Pa
Eficiência de redistribuição – IER (kg kg ⁻¹)	Pg/Pp
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

⁽¹⁾ Pp = fósforo acumulado na parte aérea das plantas; Pa = quantidade de fósforo aplicada (em kg ha⁻¹ de P₂ O₅); Pg = fósforo acumulado nos grãos; e Prod = produção de grãos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de matéria seca da parte aérea e de grãos

Dada a natureza distinta das quatro fontes testadas, em relação à interação com os componentes do solo e capacidade de liberação de fósforo, poder-se-ia esperar efeitos claramente diferenciados nas fontes e

modos de aplicação. Em princípio, os resultados da produção de matéria seca da parte aérea e de grãos não confirmaram essa expectativa.

Os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si quanto à produção de matéria seca da parte aérea (Quadro 4). Em relação à produção de grãos, a influência do modo de aplicação no desempenho das fontes fosfatadas foi verificada apenas com o fosfato reativo (FR). A distribuição localizada dessa fonte no sulco de plantio ocasionou maior produção de grãos em comparação com a aplicação a lanço (Quadro 4). No modo de aplicação no sulco, a produção com o fosfato de Araxá (FA) foi menor que aquelas obtidas com o uso das demais fontes. Na aplicação a lanço, as fontes mais solúveis, superfosfato triplo (ST) e termofosfato (TM), proporcionaram maior peso de grãos; todavia, estatisticamente, não diferiram do FA.

A explicação para os resultados obtidos, provavelmente, não se deve à causa isolada, mas a uma combinação de fatores. Deve-se considerar inicialmente a ocorrência de deficiência hídrica durante a condução do experimento (3), associada à eficiência nutricional da planta, que poderia contribuir, de certa forma, para a obtenção de respostas equiparáveis entre tratamentos distintos. A literatura mostra que a resposta ao fornecimento de nutrientes é altamente dependente das condições de umidade do solo ao longo do ciclo da cultura, especialmente no caso do fósforo e potássio, que dependem do fluxo difusivo no solo para serem absorvidos pela planta (22).

QUADRO 4 - Produção de matéria seca da parte aérea e de grãos em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho

Modos de aplicação	Fontes				Testemunha
	ST	TM	FR	FA	
Matéria seca da parte aérea (kg ha ⁻¹)					
Lanço	4167 a A	4074 a A	4606 a A	4815 a A	
Sulco	4815 a A	4931 a A	5115 a A	4236 a A	4144 ns
Grãos (kg ha ⁻¹)					
Lanço	8369 a A	8436 a A	6831 b B	7334 a AB	
Sulco	7454 a AB	7608 a AB	8397 a A	6047 a B	6875*

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas, na coluna, e maiúsculas, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P < 0,05).
 ns = média do tratamento-testemunha não difere da média do fatorial pelo teste F (P < 0,05).
 *Média do tratamento-testemunha difere da média do fatorial pelo teste F (P < 0,05).

Teores e acúmulo de nutrientes

Pela análise do Quadro 5 verifica-se, entre tratamentos contrastantes, grande similaridade dos teores foliares de P no florescimento, em contraposição a diferenças significativas dos teores nos

grãos. A aplicação localizada dos fertilizantes no sulco de plantio possibilitou maiores teores de P nos grãos, à exceção do ST, que apresentou tendência contrária. Neste tratamento observou-se também menor teor foliar de Zn (Quadro 5), o qual ficou abaixo da faixa de suficiência do micronutriente (15 – 50 mg kg⁻¹) indicada para a cultura (5, 16).

QUADRO 5 – Teores de fósforo (P) na folha e nos grãos e teor de zinco (Zn) na folha do milho em função de fontes e modos de aplicação de fósforo

Modos de aplicação	Fontes				Testemunha
	ST	TM	FR	FA	
Teor de P na folha (g kg ⁻¹)					
Lanço	2,3 a A	2,2 a A	1,9 a A	1,8 a A	1,6**
Sulco	2,3 a A	2,5 a A	2,1 a A	2,2 a A	
Teor de P nos grãos (g kg ⁻¹)					
Lanço	4,9 a A	4,0 b AB	4,2 b AB	3,0 b B	3,9 ns
Sulco	3,5 b B	5,9 a A	5,2 a A	4,7 a AB	
Teor de Zn na folha (mg kg ⁻¹)					
Lanço	22,2 a A	22,4 a A	23,9 b A	26,4 a A	31,2**
Sulco	14,8 b B	21,6 a B	29,3 a A	29,1 a A	
Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas, na coluna, e maiúsculas, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P < 0,05).					
** média do tratamento-testemunha difere da média do fatorial pelo teste F (P < 0,01).					
ns = média do tratamento-testemunha não difere da média do fatorial pelo teste F (P < 0,05).					

À exceção do ST no sulco, observa-se que o uso de fontes mais solúveis (ST e TM) e a distribuição dos fertilizantes de forma localizada ocasionaram maior absorção de fósforo, conforme evidenciado pelos acúmulos nos grãos e total (Quadro 6). Esses resultados corroboram as sugestões de Novais e Smyth (22), pois na aplicação localizada e, principalmente no caso de fontes de maior solubilidade, pequeno volume de solo é saturado com o P liberado dos fertilizantes e os sítios de adsorção nos componentes do solo são inicialmente ocupados (dreno-solo), ficando o restante do P proveniente dessas fontes mais disponível, favorecendo a absorção pelas raízes (dreno-planta).

A explicação para o comportamento do milho no tratamento com ST aplicado no sulco de plantio, no que diz respeito à menor absorção de P (Quadro 6) e produção de grãos (Quadro 4), deve estar relacionada aos efeitos da interação P x Zn sobre o metabolismo do milho. O excesso de P nas proximidades das raízes, liberado pela rápida solubilização do ST, pode provocar inibição da absorção e translocação de Zn (5, 16) ou ocasionar desbalanço interno entre esses nutrientes (3, 27). Como conseqüência, ocorrem desordens ligadas às funções metabólicas do Zn

(5). A presença do micronutriente na planta está relacionada a processos de síntese de substâncias promotoras de crescimento, como o ácido indolacético, e sua deficiência no milho leva à redução da taxa de crescimento e da produção de grãos (6, 24), o que pode resultar na diminuição da capacidade de absorção e da própria demanda de fósforo pela planta.

QUADRO 6 - Conteúdo (kg ha ⁻¹) de P nos grãos e conteúdo total de P na parte aérea do milho em função de fontes e modos de aplicação de fósforo					
Modos de aplicação	Fontes				Testemunha
	ST	TM	FR	FA	
Grãos					
Lanço	40,87 a A	33,77 b AB	28,47 b BC	22,38 b C	27,12*
Sulco	25,89 b B	45,09 a A	43,27 a A	31,21 a B	
Total na parte aérea					
Lanço	50,98 a A	45,85 b A	38,13 b BC	33,74 b C	35,96*
Sulco	38,78 b B	56,07 a A	56,42 a A	42,62 a B	

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas, na coluna, e maiúsculas, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P < 0,05).

* Média do tratamento-testemunha difere da média do fatorial pelo teste F (P < 0,05).

Índices de eficiência nutricional a fósforo

Houve interação de fontes e modos de aplicação em relação aos índices de avaliação da eficiência nutricional propostos por Moll et al. (17). Quando os fertilizantes fosfatados foram aplicados a lanço, a eficiência de absorção (IEA) tendeu a ser decrescente (Quadro 7) com o decréscimo na solubilidade das fontes fosfatadas, na seqüência ST > TM > FR > FA. Como a dose de P utilizada no cálculo do IEA (Quadro 3) foi aplicada com base no teor de P₂O₅ total dos fertilizantes, a absorção parece ter sido condizente com a maior ou menor facilidade de aquisição do nutriente pelas raízes, na medida em que as fontes diferem bastante quanto à solubilidade (Quadro 1).

A aplicação dos fertilizantes TM, FR e FA no sulco de plantio favoreceu maior absorção do P fornecido, provavelmente por minimizar o contato do adubo com o solo e, conseqüentemente, restringir os processos de fixação de fósforo. Na aplicação localizada, a eficiência de absorção do fósforo advindo do ST foi comprometida, provavelmente em razão da interação P x Zn, conforme discutido anteriormente.

Em cada modo de aplicação as diferenças entre os valores do P absorvido em função das fontes não excederam 10% em relação ao total aplicado no solo, de acordo com os parâmetros utilizados no cálculo do

IEA (Quadro 3). Isso parece demonstrar que o híbrido de milho possui capacidade de absorção mais ou menos constante, mesmo em condições de menor disponibilidade de fósforo no solo, característica esta que pode estar associada à habilidade da planta na aquisição de P a partir de formas menos disponíveis (22), como seria o caso das fontes FR e FA.

QUADRO 7 - Índices de eficiência (kg kg ⁻¹) do milho ao fósforo, em função de diferentes fontes e modos de aplicação do nutriente.					
Modos de aplicação	Fontes				Testemunha
	ST	TM	FR	FA	
IE absorção					
Lanço	0,27 a A	0,25 b B	0,21 b B	0,19 b B	
Sulco	0,21 b B	0,31 a A	0,31 a A	0,24 a B	
IE redistribuição					
Lanço	0,82 a A	0,74 b B	0,75 a B	0,66 b C	
Sulco	0,67 b B	0,80 a A	0,77 a AB	0,73 a B	0,75 ns
IE utilização					
Lanço	168,8 aB	184,0 a B	179,8 a B	225,3 a A	
Sulco	195,5 a A	136,6 b B	148,5 b B	165,5 a AB	192,5 ns
IE produção de grãos					
Lanço	204,5 b B	250,2 a B	241,7 a B	341,1 a A	
Sulco	294,1 a A	170,8 b B	193,4 a B	223,4 b AB	157,7 ns
IE do fertilizante					
Lanço	46,5 a A	46,9 a A	37,9 b B	42,3 a AB	
Sulco	41,4 a AB	42,3 a AB	46,6 a A	37,2 a B	
Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas, na coluna, e maiúsculas, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P < 0,05).					
ns=média do tratamento-testemunha não difere da média do fatorial pelo teste F (P < 0,05).					

Como ao final do ciclo a maior parte do P acumulado na planta de milho foi mobilizada para os grãos, a eficiência de redistribuição (IER) apresenta estreita relação com a eficiência de absorção (Quadro 7), parecendo indicar que o transporte interno de P na planta seria mera consequência da absorção, sendo influenciado pelas mesmas condições que a afetam. Assim sendo, à exceção do ST no sulco, pelas razões já discutidas no tocante à interação P x Zn, os mais altos valores de IER, obtidos com as fontes de maior solubilidade e no modo de aplicação localizada, indicam incremento na alocação do nutriente para a formação de grãos quando maiores quantidades de P foram prontamente disponibilizadas para as raízes desde a fase inicial da cultura.

Segundo esse raciocínio, comparativamente às demais fontes, o uso do FA, que possui menor e mais lenta solubilização, limitou não só a

aquisição de fósforo, mas também a redistribuição do que foi absorvido, comprometendo a produção de grãos pelo não-atendimento da demanda de P ao longo das fases de desenvolvimento do milho.

Estando na dependência da relação entre os valores de produção de grãos e da quantidade de P acumulada na planta, a eficiência de utilização (IEU) foi maior (Quadro 7) nos tratamentos que proporcionaram menor acúmulo do nutriente na planta (Quadro 6), uma vez que os ganhos em produção não foram proporcionais às quantidades de fósforo absorvidas. A ausência de diferença significativa entre a testemunha e os tratamentos que receberam adubação fosfatada, quanto à eficiência de utilização, evidencia a alta capacidade do híbrido em utilizar o P em condições de baixo suprimento, sem, contudo, mostrar intensa resposta ao fornecimento do nutriente, não sendo possível estabelecer uma relação definida entre IEU (Quadro 7) e produtividade (Quadro 4) do milho em decorrência dos tratamentos.

Em virtude da alta taxa de redistribuição de P, a eficiência de produção de grãos (IEP) seguiu as mesmas tendências discutidas em relação ao IEU (Quadro 7). As maiores eficiências na produção de grãos, verificadas nos tratamentos com menor acúmulo de P nesse compartimento (FA a lanço e ST no sulco - Quadro 6), confirmam que a capacidade de utilização interna de P contribuiu para a redução das discrepâncias de produção entre os tratamentos. Por outro lado, os menores valores de IEP obtidos nos tratamentos TM e FR no sulco, os quais proporcionaram os mais elevados valores de P acumulado no grão, revelam que fatores intrínsecos ou não ao híbrido foram condicionantes restritivos para que o P adicionalmente absorvido e direcionado aos grãos resultasse em ganho de produtividade.

Quanto aos índices de eficiência do fertilizante (IEF), as principais diferenças estatísticas ocorreram entre as fontes, "dentro" de cada modo de aplicação (Quadro 7). Quando aplicadas a lanço, as fontes mais solúveis (ST e TM) foram mais eficientes que os fosfatos naturais (FR e FA), o que deve estar ligado ao equilíbrio diferenciado que se estabelece na interação entre o P dissolvido das fontes e os componentes coloidais do solo, de forma que os fosfatos solúveis liberaram o nutriente em quantidades mais elevadas, minimizando os efeitos da competição entre solo e planta pelo fósforo fornecido, condição não alcançada com o uso dos fosfatos naturais, em que a menor quantidade de P liberada atende primeiramente à demanda do solo, dreno preferencial no sistema (22).

Os fosfatos naturais FR e FA aplicados localizadamente surtiram efeitos opostos, resultando, respectivamente, no maior e menor IEF observados nas fontes neste modo de aplicação (Quadro 7). A explicação para esse fato pode estar associada a diferenças no ajuste das taxas de liberação de fósforo pelos dois fosfatos naturais e de demanda do nutriente

para o desenvolvimento do milho. Com base nessa hipótese, o FR, sendo um fosfato “mole” (13), sofre dissolução mais facilmente que o fosfato “duro” FA, fornecendo P em intensidade mais adequada ao rápido crescimento do milho; contudo, oferece menor chance de desbalanços nutricionais comparativamente a fontes de alta solubilidade (ST). Dentre os fosfatos naturais, a aplicação localizada parece ser mais crítica para a solubilização do FA, a qual seria mais dependente das condições de acidez e da saturação de cálcio no ambiente de reação do produto no solo (2, 20, 22), o que justificaria a menor eficiência do FA aplicado no sulco de plantio sobre a produção do milho.

Estudos têm mostrado que, geralmente, fontes solúveis apresentam desempenho similar em ambas as formas de aplicação, podendo a aplicação a lanço proporcionar maiores rendimentos em relação à localizada quando ocorre déficit hídrico (8, 12), evento este constatado durante a condução do presente estudo (3). Já os termofosfatos, fosfatos reativos (11) e fosfatos naturais brasileiros (15) aplicados a lanço apresentam maior eficiência. Outros autores, entretanto, têm relatado resultados distintos (13, 22), pelos quais sugere-se a viabilidade da aplicação localizada de fosfatos de menor solubilidade.

Dentre os índices utilizados na avaliação da eficiência nutricional do híbrido neste estudo, as eficiências de absorção (IEA) e redistribuição (IER) de fósforo foram incrementadas conforme o aumento da solubilidade das fontes, ao passo que as eficiências de utilização (IEU) e produção de grãos (IEP) seguiram tendência inversa. Dessa forma, o efeito dos tratamentos parece ter sido mais bem expresso pelo índice de eficiência do fertilizante (IEF), o qual refletiu melhor a interação dos fatores relacionados ao comportamento das fontes de P e do híbrido.

Adicionalmente, com base nos índices de eficiência, infere-se que o híbrido de milho possui mecanismos de utilização eficiente de P que operam em condições de menor disponibilidade, conferindo-lhe tolerância à carência do nutriente no solo. Por outro lado, apesar de absorver e redistribuir eficientemente o P, não há equivalente capacidade de conversão em grãos com o aumento da disponibilidade do nutriente no solo, caracterizando baixa responsividade do híbrido ao fornecimento do nutriente.

CONCLUSÕES

1) Maior produção de milho é obtida com os fertilizantes mais solúveis, superfosfato e termofosfato, distribuídos a lanço em área total, e com o fosfato reativo de Arad aplicado no sulco de plantio. O fosfato de Araxá é a fonte de pior desempenho na aplicação localizada.

2) O índice de eficiência do fertilizante expressa melhor o efeito dos tratamentos, refletindo a interação de aspectos relacionados ao comportamento das fontes fosfatadas e do híbrido de milho.

3) O híbrido de milho utilizado é eficiente em utilizar o P, notadamente nos tratamentos com menor disponibilidade do nutriente no solo (fosfato de Araxá e testemunha), porém é pouco responsivo quanto à conversão do P absorvido em produção de grãos nos tratamentos que proporcionam maior disponibilidade do nutriente.

REFERÊNCIAS

1. 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: Ribeiro, A.C.; Guimarães, P.T.G. & Alvarez V., V.H. (eds). 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.314-6.
2. ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. Rev. Bras. Ci. Solo, 16:349-53, 1992.
3. ARAÚJO, I.B. Fontes e modos de aplicação de fósforo na produção e nutrição mineral do milho em primeiro cultivo. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2001. 76p. (Dissertação de mestrado).
4. BALIGAR, V.C. & FAGERIA, N.K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: Moniz, A.C.; Furlani, A.M.C.; Schaffert, R.E.; Fageria, N.K.; Rosolem, C.A. & Cantarella, H. (eds). Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production. Campinas, Brazilian Soil Science Society, 1997. p.75-95.
5. BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: Büll, L.T & Cantarella, H. (eds). Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1993. p.63-145.
6. DECARO, S.T.; VITTI, G.C.; FORNASIERI FILHO, D. & MELLO, W.J. Efeito de doses e fontes de zinco na cultura do milho (*Zea mays* L.). Revista de Agricultura, 58:25-36, 1983.
7. EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2a ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
8. FAGERIA, N.K. Eficiência de uso de fósforo pelos genótipos de feijão. Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambiental, 2:128-31, 1998.
9. FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambiental, 2:6-16, 1998.
10. FERNÁNDEZ R., I. E. J. Reversibilidade de fósforo não-lábil em diferentes solos, em condições naturais e quando submetidos à redução microbiológica ou química. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 94p. (Tese de doutorado).
11. GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Avaliação agrônoma de fosfatos em solo de cerrado. Rev. Bras. Ci. Solo, 8:97-102, 1984.
12. GOEDERT, W.J. & SOUSA, D.M.G. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: Seminário Fósforo, Cálcio, Magnésio, Enxofre e Micronutrientes: Situação Atual e Perspectiva na Agricultura. São Paulo, 1984. Anais, São Paulo, Manah, 1986. p.21-53.
13. KAMINSKI, J. & PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Santa Maria, Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31p. (Boletim Técnico n° 3).

14. LIMA, J.M.; ANDERSON, S.J. & CURTI, N. Phosphate-induced clay dispersion as related to aggregate size and composition in Hapludoxs. *Soil Sci. Soc. America J.*, 64:892-7, 2000.
15. LOPES, A.S. Fosfatos naturais. In: Ribeiro, A.C.; Guimarães, P.T.G. & Alvarez V., V.H. (eds). *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.65-6.
16. MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.
17. MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J. & JACKSON, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy J.*, 74:562-4, 1982.
18. MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 9:237-43, 1985.
19. NOVAIS, R.F. Utilização de fosfato naturais de baixa reatividade. In: Ribeiro, A.C.; Guimarães, P.T.G. & Alvarez V., V.H. (eds). *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.62-4.
20. NOVAIS, R.F.; BAHIA FILHO, A.F.C., RIBEIRO, A.C. & VASCONCELOS, C.A. Solubilização de fosfatos incubados com amostras de Latossolo submetidas a diferentes números de revolvimento. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 9:23-6, 1985.
21. NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; CASALI, V.W.D. & FABRES, A.S. The influence of the soil phosphate capacity factor on soil and plant phosphorus critical levels of different vegetables. In: Fragozo, M.A.C. & Beusichem, M.L.V. (eds). *Optimization of plant nutrition.* Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1993. p.73-6.
22. NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, UFV-DPS, 1999. 399p.
23. RAIJ, B. van. & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solos para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico, 1983. 31p. (Boletim nº 81).
24. RITCHEY, K.D.; COX, F.R.; GALRÃO, E.Z. & YOST, R.S. Disponibilidade de zinco para as culturas do milho, sorgo e soja em Latossolo Vermelho-Escuro argiloso. *Pesq. Agropec. Bras.*, 21:215-25, 1986.
25. 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. (eds). *The role of phosphorus in agriculture.* Madison, American Society of Agronomy, 1980. p.263-310.
26. SANCHEZ, P.A. & SALINAS, J.G. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in Tropical America. *Advances in Agronomy*, 34:279-406, 1981.
27. SUMNER, M.E. & FARINA, M.P.W. Phosphorus interaction with other nutrients and lime in field cropping systems. *Advances in Soil Science*, 5:201-36, 1986.
28. VETTORI, L. Métodos de análises de solos. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico nº 7).