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

Localização do fósforo em sistema de produção plantio direto

Felipe Brendler Oliveira

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

**Piracicaba
2013**

Felipe Brendler Oliveira
Engenheiro Agrônomo

Localização do fósforo em sistema de produção plantio direto

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LAÉRCIO FAVARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

**Piracicaba
2013**

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

Oliveira, Felipe Brendler

Localização do fósforo em sistema de produção plantio direto / Felipe Brendler
Oliveira.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - -
Piracicaba, 2013.
47 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Composição mineral 2. Crescimento vegetal 3. Eficiência nutricional 4. Fósforo
5. Milho 6. Plantio direto 7. Soja 8. Umidade do solo I. Título

CDD 633.15
O48L

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

À minha avó Noêmia,
À minha irmã Fernanda,
sempre ao meu lado, mesmo quando
separados pela distância
geográfica

DEDICO

Ao meu Tio Junior,
grande incentivador de todas
as minhas conquistas

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre estar ao meu lado e permitir que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, por me mostrar que a vida não é perfeita.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo durante o mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado e pela infraestrutura oferecida.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Laércio Favarin pela amizade, alegria, paciência, dedicação e conhecimentos transmitidos.

À minha namorada e colega de profissão Ana Paula Schwantes, por todo amor, carinho, compreensão e por sempre estar ao meu lado.

Aos colegas do Grupo de ecofisiologia e nutrição de plantas em sistema de produção (ENUSP), Rodrigo Estevam Munhoz de Almeida (Txarli), grande amigo sem igual, incentivador e companheiro de jornadas; Ana Paula Neto, sempre olhando o lado bom das pessoas; Adriene Woods Pedrosa, com suas sábias palavras em todos os momentos; Tiago Tezotto (Sauipe), meu pequeno grande amigo, sempre disposto a ajudar; Clovis Pierozan Junior (Cróvão), o paranaense mais gaúcho que conheço; Bruno Cocco Lago (Boia), sempre fazendo-nos sorrir; Silas Maciel de Oliveira, (Lasco), com toda sua seriedade e competência; Rafaela Migliavacca (Mastite) e Pedro Carvalho (Leva Prego), antes estagiários e agora os mais novos colegas de pós-graduação; e também aos estagiários Ana Luisa (Cervicin), Bruno Carvalho (Lecxotã), Caio Furtado (Du crime), Davi Filho (Maomé), Gabriela Barbosa (Torraka), Luiza Macedo (Ú-tima) e Heitor Rocha Ayres (Cida); a todos vocês, meu sincero agradecimento pela amizade, companheirismo, por tornar o mais árduo dos trabalhos durante a implantação e condução dos experimentos em uma atividade simples e empolgante graças ao espírito de equipe e apoio de todos.

Ao Dr. José Luiz Motta de Almeida, e demais profissionais da Fazenda Serrado Chão Quente, em Taquarituba-SP que possibilitaram a realização dos experimentos de campo.

À Luciane Aparecida Lopes Toledo, pela paciência e carinho com que exerce seu o trabalho junto aos alunos do programa de pós-graduação em Fitotecnia.

A todos os funcionários da equipe de apoio e de campo do Departamento de Produção Vegetal, ESALQ/USP.

À bibliotecária Eliana Maria Garcia e todos os funcionários pela atenção dada junto ao Sistema de Submissão de Teses.

Aos colegas de apartamento Leandro e Aloísio, pelas conversas sobre a vida, experiências, apoio e paciência.

Aos colegas e amigos de graduação, mesmo distantes, obrigado pela força.

A todos que de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho,

MUITO OBRIGADO!

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica:
a vontade!”

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo geral.....	17
1.2 Objetivos específicos.....	17
Referências.....	18
2 RESPOSTA DO MILHO AO MODO DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO.....	21
Resumo.....	21
Abstract.....	21
2.1 Introdução.....	21
2.2 Material e Métodos.....	22
2.3 Resultados e Discussão.....	25
2.4 Conclusão.....	31
Referências.....	31
3 RESPOSTA DA SOJA A LOCALIZAÇÃO DO FÓSFORO EM RAZÃO DA UMIDADE DO SOLO.....	35
Resumo.....	35
Abstract.....	35
3.1 Introdução.....	35
3.2 Material e Métodos.....	36
3.3 Resultados e Discussão.....	39
3.4 Conclusão.....	45
Referências.....	46

RESUMO

Localização do fósforo em sistema de produção plantio direto

O fósforo (P) é um elemento finito e essencial à produção agrícola. A pequena disponibilidade do nutriente em solos tropicais é atribuída ao baixo teor e a forte interação com óxidos e minerais de argila, o que reduz a fração solúvel. Em razão do não revolvimento do solo em plantio direto, a adubação fosfatada pode ser feita no sulco de semeadura ou aplicado a lanço, na superfície do solo. Muitos produtores optaram pela adubação de P a lanço, em razão do menor custo operacional, graças ao aumento do rendimento das operações mecanizadas como a semeadura. O uso dessa prática cresceu nos últimos anos, sem que se saiba o comportamento das plantas. Há relatos de acúmulo de P nos primeiros 5 cm da camada superficial, devido aos vários anos de aplicação a lanço, o que prejudicará o rendimento, quando a distribuição da precipitação pluvial for irregular e/ou o nutriente estiver escasso no perfil do solo. Com isso, o produtor poderá decidir-se pelo retorno ao sistema de preparo convencional do solo, o que representaria um retrocesso, pela perda das vantagens do plantio direto, um sistema que preserva os recursos naturais como o solo e a água. Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de compreender a resposta do milho e da soja, em razão da localização do P e da umidade do solo. A localização do fósforo, sob precipitação pluvial suficiente e teor adequado do nutriente no solo, não influenciou a eficiência agronômica de uso, translocação e produção de grãos, e a produtividade do milho. A localização do fósforo em profundidade beneficiou o crescimento da soja, sem influência na concentração desse nutriente na planta.

Palavras-chave: *Zea mays* L., *Glycine max* (L.) Merrill, Eficiência nutricional; Crescimento da planta; Composição mineral do milho e da soja; Umidade do solo

ABSTRACT

Phosphorus placement at no-tillage cropping system

Phosphorus (P) is a finite and essential element to agricultural production. The low nutrient availability in tropical soils is attributed to its low content and strong interaction with oxides and clay minerals, which reduces the soluble portion. Due the no tillage system, without soil disturbance, the phosphorus can be placed in the row sowing or by broadcast placement to soil surface. Many producers chose by P broadcast placement, due to lower operational costs by increasing the efficiency of mechanized operations as sowing. This practice has grown in recent years, however, it isn't known much about plants response. There are reports of P accumulation in the first 5 cm depth at soil surface, due to many years of broadcast placement, which can jeopardize the yield when rainfall distribution is irregular and/or the nutrients content at soil profile is scarce. Thus, the farmers will be able to decide to return to the conventional system which would represent a setback, because would lose the no till advantages, a cropping system that saves natural resources as soil and water. This research was conducted in order to understand the response of corn and soybeans, due to the P placement and soil moisture. The P placement, under sufficient rainfall and adequate content in the soil didn't influence the agronomic efficiency of use, translocation and grain production, and yield of maize. The deep band P placement benefited soybean growth, without without influence to its plant nutrient content.

Keywords: *Zea mays* L., *Glycine max* (L.) Merril, Nutritional efficiency; Plant growth; Corn and soybean mineral composition; Soil moisture

1 INTRODUÇÃO

O P é um recurso natural insubstituível e finito, com uma longevidade de, aproximadamente, 90 anos (FIXEN, 2009). Esse nutriente limita o desenvolvimento e a produção das culturas em, aproximadamente, 40% das terras agricultáveis do mundo (VANCE et al., 2003).

A eficiência da adubação fosfatada em solos tropicais é muito baixa, em razão da adsorção do íon fosfato (H_2PO_4^-) presente na solução do solo, com as cargas positivas dos minerais da fração argila, assim como pela precipitação devido à sua reação com íons de ferro (Fe^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) e, também, pela imobilização microbiana. Em razão destes fenômenos o teor de P na solução é muito baixo, da ordem de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ que em solo com 20% de água equivale a 40 g ha^{-1} (COSTA, 2008; FAVARIN et al., 2010).

No sistema de produção plantio direto, devido à ausência de revolvimento do solo, a adubação fosfatada pode ser feita no sulco de semeadura ou a lanço na superfície do solo (LOPES et al., 2004).

Há relatos que o teor de P em plantio direto aumenta quatro a sete vezes nos primeiros 10 cm da superfície do solo. Esta constatação é atribuída ao menor contato do nutriente com o solo no sulco de semeadura e em razão do aumento de P orgânico, proveniente da decomposição gradual dos resíduos vegetais (SÁ, 1999; CAIRES, 2000; SOUZA; LOBATO; REIN, 2002). Durante o processo são formados complexos fosfoúmicos assimiláveis pela planta. A substituição do fosfato pelo humato e formação de humato de cálcio, libera o fósforo para ser absorvido pelas raízes, enquanto as partículas de sesquióxidos de ferro e alumínio recobertas pelo ácido húmico reduzem a fixação do fosfato (TISDALE; NELSON, 1966).

A presença de resíduos vegetais na superfície do solo em plantio direto atenua as variações térmicas (BRAGAGNOLO; MIELNICZUK, 1990) e, segundo Pedrosa¹, pode reduzir em até 50 % a perda de água por evaporação (em fase de elaboração). A manutenção do solo úmido por mais tempo favorece o crescimento radicular e, por extensão, a absorção de P, pois a difusão do fosfato depende, entre outros fatores, do volume de solo explorado e do teor de água (CHAIB, BULISANI; CASTRO, 1984; RUIZ, 1985). Em razão da baixa mobilidade do fosfato no solo, a

¹ PEDROSA, A. W. (Universidade de São Paulo). **Eficiência da adubação nitrogenada no consórcio entre cafeeiro e *Brachiaria brizantha***

adição do fertilizante no sulco de semeadura favorece a absorção radicular (LOPES et al., 2004), proporcionada pela umidade abaixo dos primeiros 10 cm de profundidade, zona média de deposição do fertilizante pela semeadora.

Uma estimativa teórica a partir dos dados da capacidade máxima de adsorção de P no solo, indica que a saturação por adsorção e precipitação dos primeiros dois centímetros superficiais de um solo de textura média, demanda 754 kg ha^{-1} de P_2O_5 (DIAS, 1992; SOUZA et al., 2010). Com base neste raciocínio, infere-se que a aplicação a lanço de P em plantio direto poderá depois de algum tempo comprometer a produção agrícola, proporcionada pela diminuição do teor do nutriente abaixo dos primeiros 10 cm de profundidade, em razão da exportação pelos cultivos sucessivos.

Há que se considerar, também, que em anos com chuvas irregulares a deposição superficial do fósforo potencializará a perda da produtividade, já que a sua absorção depende do teor de água no solo, como indicam os dados de fluxo do nutriente no xilema (RUIZ, 1985). De acordo com o autor houve uma redução de 99,7% quando o potencial da água no solo passou de $-0,01 \text{ MPa}$, próximo da capacidade de campo, para $-0,3 \text{ MPa}$, quando ainda tinha água suficiente para manter a transpiração e, portanto, a difusão. Constata-se, portanto, que a aplicação de P a lanço nos trópicos poderá comprometer a produção agrícola, independente da mobilidade do nutriente na planta.

Nos solos com teor de P acima do nível crítico a probabilidade de resposta das culturas é baixa ou não ocorre, razão porque não se tem observado perda de produtividade com a aplicação a lanço na superfície (PAVINATO; CERETTA, 2004). Quando os teores de P estão abaixo do nível crítico houve resposta a aplicação no sulco de semeadura (POTTKER, 1999).

A necessidade de reduzir os custos operacionais acrescida da motivação proporcionada pela agricultura de precisão e em razão da experiência dos agricultores, com a aplicação a lanço de nitrogênio e potássio, fez com que muitos produtores optassem, também, pela adubação de P a lanço. Esta prática tem crescido nos últimos anos, ganhando novos adeptos sem que haja resultados de pesquisas sobre a sua eficiência.

Há relatos de acúmulo entre 50 a 145 mg dm^{-3} P (Mehlich) nos primeiros 5 cm da camada superficial, devido aos vários anos de aplicação a lanço (TOKURA et al., 2002; COSTA et al., 2009). Nessas condições, a concentração das raízes na

camada mais superficial prejudica o rendimento, quando a distribuição da precipitação pluvial for irregular. Quando isso ocorre o produtor retorna ao sistema convencional, revolvendo o solo para incorporação do nutriente em profundidade. Esta situação seria um retrocesso, pois perderia as vantagens do plantio direto, um sistema de produção sustentável que preserva os recursos naturais como o solo e a água.

A presente pesquisa foi realizada com base nas seguintes hipóteses: (i) a eficiência de absorção e de uso do P do fertilizante será prejudicada se o nutriente for adicionado na superfície pela aplicação a lanço, comparativamente à aplicação no sulco de semeadura, zona mais úmida, condição necessária para a difusão; e (ii) a aplicação de P a lanço em plantio direto, devido à pequena quantidade de resíduos depositados na superfície nos trópicos, será prejudicial, principalmente, quando a distribuição da precipitação pluvial for irregular e o teor de P no solo estiver abaixo do nível crítico. Para melhor compreensão do problema que motivou a pesquisa foi elaborada a figura 1.

1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de compreender a resposta do milho e da soja, em razão da localização do fósforo e da umidade do solo.

1.2 Objetivos específicos

Avaliar a produtividade de milho.

Quantificar o teor de P no solo; na palha e nos grãos de milho.

Avaliar a eficiência nutricional da adubação fosfatada em dois cultivos sucessivos de milho.

Avaliar a influência da localização do P e a umidade do solo na soja

Quantificar a massa de matéria seca e o teor de P na parte aérea e raízes de soja.

Figura 1 – Situação de uma lavoura com alto e baixo teor de P no solo, ambas com concentração superficial do nutriente em razão da aplicação a lanço na superfície

Referências

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, p. 367-374, 1990.

CAIRES, E.F.; BANZATTO, D.A.; FONSECA, A.F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p.161-169, 2000.

CHAIB, S.L.; BULISANI, E.A.; CASTRO, L.H.S.M. Crescimento e produção do feijoeiro em resposta a profundidade de aplicação de adubo fosfatado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, p. 187-822, 1984.

COSTA, S.E.V.G.A. **Distribuição de fósforo, de potássio e de raízes e rendimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo**. 2008, 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D. de; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; CAO, E.G.; HOLZSCHUH, M.J. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1237-1247, 2009.

DIAS, L.E. **Dinâmicas de formas de enxofre e de cátions trocáveis em colunas de solo tratadas com diferentes doses de fósforo e de gesso**. 1992. 174 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

FAVARIN, J.L.; TEZOTTO, T.; NETO, A.P.; PEDROSA, A.W. Cafeeiro. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: cafeeiro**. Piracicaba: IPNI - Brasil, 2010. v. 3, p. 411-467.

FIXEN, P.E. Reservas mundiais de nutrientes dos fertilizantes. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 126, p. 8-14, jun. 2009.

LOPES, A.S.; WIETHOLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2004. 110 p.

PAVINATO, P.S.; CERETTA, C.A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1779-1784, 2004.

POTTKER, D. **Aplicação de fósforo no sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa, 1999. 32 p. (Embrapa Trigo, Boletim de Pesquisa, 2).

RUIZ, H.A. **Efeito do conteúdo de água sobre o transporte de fósforo em dois Latossolos**. 1985. 74 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1985.

SÁ, J.C.M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS; UFLA, 1999. p. 267-319.

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

SOUZA, D.M.G. de; REIN, T. A.; GOEDERT, W.J.; LOBATO, E.; NUNES, R.S. Fósforo. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI - Brasil, 2010. v. 2, p. 71-136.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. 2nd ed. Ontario: The Macmillan, 1969. 694 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 tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1467-1476, 2002.

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

2 RESPOSTA DO MILHO AO MODO DE APLICAÇÃO DE FÓSFORO

Resumo

O fósforo (P) sempre foi aplicado em sulco na semeadura independente do sistema de produção, convencional ou plantio direto. Na última década a aplicação a lanço na superfície do solo ganhou muitos adeptos, em razão da eficiência operacional e da experiência acumulada com esse modo de aplicação para o potássio e nitrogênio. Contudo, pouco se sabe do comportamento das culturas. Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de avaliar a eficiência agrônômica e a produtividade do milho, em razão do modo de aplicação de P, em dois anos agrícolas. Os modos de aplicação de P foram: (i) controle, sem fornecimento de P; (ii) P no sulco de semeadura; (iii) P a lanço com incorporação por grade; e (iv) P a lanço, aplicado na superfície. O modo de aplicação de fósforo não influenciou a eficiência agrônômica e a produtividade do milho sob precipitação suficiente e teor adequado no solo.

Palavras-chave: Adubação fosfatada; *Zea mays* L.; Eficiência nutricional; Produtividade

Abstract

Phosphorus (P) was always placed in the row sowing independent of the cropping system, conventional tillage or no tillage. In the last decade the broadcast placement at the soil surface led many users, due to the operational efficiency and the experience with this placement to potassium and nitrogen. However, it isn't known much about crops response. This research was conducted to evaluate the agronomic efficiency and yield of corn, according to the P placement in two crop season. The P placement were: (i) control, without P placed, (ii) P placed in the row sowing, (iii) P broadcast, with plowing, and (iv) P broadcast, placed at the surface. The P placement did not influence the agronomic efficiency and productivity of maize under sufficient rainfall and adequate soil content.

Keywords: Phosphate fertilization; *Zea mays* L.; Nutritional Efficiency; Yield

2.1 Introdução

A disponibilidade de fósforo (P) é baixa nos solos tropicais, devido à predominância de óxidos de ferro e alumínio na fração argila, os quais reduzem a mobilidade desse nutriente, devido à alta afinidade com esses colóides.

No sistema plantio direto a ausência da lavração do solo altera a dinâmica dos nutrientes, em especial o P, com aumento da sua concentração nos locais de aplicação e das raízes na superfície (MOLLIER; PELLERIN, 1999).

A recomendação para o fornecimento de P nas culturas anuais é que seja feito no sulco de semeadura. Mais recentemente os produtores estão fazendo a lanço, sem incorporação, com a finalidade de aumentar o rendimento operacional dos conjuntos mecanizados.

A aplicação de P a lanço em áreas de plantio direto não reduz a produtividade das culturas, devido ao efeito residual de aplicações anteriores (RESENDE et al., 2006) E quando o teor do nutriente for acima do nível crítico (PAVINATO; CERETTA, 2004). Porém, não se sabe se, com o passar dos anos, a concentração superficial de P prejudicará o rendimento de grãos.

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de avaliar a eficiência agrônômica e a produtividade do milho, em razão do modo de aplicação do fósforo, em dois anos agrícolas.

2.2 Material e Métodos

O experimento foi realizado na Fazenda Serrado Chão Quente, no município de Taquarituba, SP; localizada a 23° 35' 23.4" latitude sul, 49° 15' 11.4" longitude oeste e 654 m de altitude. O clima local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa (subtropical úmido, com verão quente e inverno seco).

O solo da área experimental é classificado como Nitossolo Vermelho, textura argilosa (EMBRAPA, 2006). Anteriormente, a área era utilizada com pastagem. O preparo do solo foi realizado com aração e gradeação apenas no primeiro ano, na instalação do experimento na safra 2010/11. Os resultados da análise química do solo estão apresentados na Tabela 1.

A pesquisa foi instalada em delineamento de blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiam em modos de aplicação de P, como: T1 - controle, sem aplicação de P; T2 - P no sulco de semeadura; T3 - P a lanço incorporado com grade; e T4 - P a lanço em superfície. As parcelas de 72 m² (20 x 3,6 m) foram constituídas por quatro linhas de milho de 20 m de comprimento, com 0,9 m de espaçamento. As coletas de amostras para análises foram feitas em uma área útil de 18 m² compreendida pelas duas linhas centrais de 10 m de comprimento.

Tabela 1 - Resultado da análise química do solo amostrado na área do experimento antes da aplicação dos tratamentos, na safra anterior

Prof.	pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V
0 - 5	6,2	40	47	7	5,1	95	75	19	175,1	194,5	90
0 - 10	5,9	42	35	7	3,6	104	85	20	192,6	212,8	91
0 - 20	6,3	35	17	5	2,9	73	50	27	125,5	152,5	83

Unidades: Profundidade (cm); M.O. (g dm^{-3}); P e S (mg dm^{-3}); K, Ca, Mg, H+Al, SB e T (mmolc dm^{-3}); V (%). Métodos: pH em CaCl_2 (acidez ativa) – CaCl_2 $0,01\text{mol.L}^{-1}$; M.O. – Dicromato/Colorimétrico; Fósforo, Potássio e Magnésio – extração pela Resina trocadora de íons; Alumínio trocável – Titulometria (1mol L^{-1}); H+Al (acidez potencial) – pH SMP; Enxofre (S-SO_4) $^{-2}$ extração $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ $0,01\text{mol L}^{-1}$ - Turbidimetria.

A semeadura do milho híbrido AG 2040, na safra 2010/11, foi realizada no dia 12 de dezembro de 2010. Na safra 2011/12 foi usado o híbrido DKB 390 YG semeado no dia 01 de novembro de 2011, em sistema de produção “plantio” direto, exceto na área referente ao tratamento 3, em que foi aplicado a lanço com incorporação. A densidade de plantas foi $40.000\text{ plantas ha}^{-1}$ e $54.000\text{ plantas ha}^{-1}$ na safra 2010/11 e 2011/12 respectivamente. Na semeadura foi aplicado 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 na forma de superfosfato triplo (46% P_2O_5 e 14% Ca). Na área referente ao tratamento com aplicação no sulco de semeadura a aplicação foi realizada pelo dispositivo da semeadora, enquanto nas áreas relativas ao fornecimento a lanço, a mesma foi feita manualmente. No estágio V2/V3, realizou-se a adubação de cobertura com 150 kg ha^{-1} de N e 90 kg ha^{-1} de K_2O .

No florescimento do milho foram coletadas folhas diagnósticas, para fins de avaliação do estado nutricional, de acordo com Raij (2011). A avaliação da atividade da enzima fosfatase ácida foi realizada no mesmo estágio. Para a determinação da atividade da enzima foram utilizados 100 mg de fragmentos de 3 mm do terço central a folha, sem a nervura principal, de acordo com a metodologia descrita por McLachlan e De Marco (1982) e modificações feitas por Silva e Basso (1993).

Na ocasião da colheita, em 21 de maio de 2011 e 31 de março de 2012 das safras 2010/11 e 2011/12 respectivamente, foram coletadas amostras de plantas e espigas na área útil para avaliação da produtividade e da composição das partes da planta (colmo, folhas, brácteas e sabugo, inflorescência e grãos). Posteriormente, o material foi colocado em estufa com circulação de ar a $70\text{ }^\circ\text{C}$ por 72 horas, para a determinação da massa de matéria seca.

As amostras secas foram moídas em moinho tipo Wiley e submetidas à determinação de P por meio da técnica de análise por fluorescência de raios-X, com

um espectrômetro de raios-X de energia dispersiva (EDX-720 Shimadzu), de acordo com a metodologia descrita por Tezotto (2010).

A partir da obtenção dos valores de matéria seca, teores e conteúdos de P na parte aérea e grãos determinar-se-á os índices de eficiência nutricional relacionado aos processos de utilização e translocação do nutriente pelo milho, conforme Moll et al. (1982) (Tabela 2).

Para a avaliação da quantidade de fósforo no solo foram coletadas amostras compostas por 6 sub-amostras nos primeiros 5, 10 e 20 cm de profundidade nas linhas e entrelinhas da semeadura, dentro da área útil de cada parcela, utilizando uma sonda.

Tabela 2 - Índices de eficiência de resposta ao P

Índices de eficiência	Formas de cálculo
Eficiência de uso (IEU)	kg de grãos/kg de P planta
Eficiência de produção de grãos (IEPg)	kg de grãos/kg de P grãos
Eficiência de redistribuição (IER)	kg P grãos/kg de P planta

Na Figura 1 são apresentados os dados de precipitação pluviométricos referentes ao período de cultivos das safras 2010/11 e 2011/12 de condução do experimento.

Na safra 2010/11 observou irregularidade da precipitação antes do florescimento do milho, sem alterar a quantidade acumulada no período. Durante a safra 2011/12 a distribuição das chuvas também foi irregular, mas com maior quantidade acumulada.

A análise estatística foi realizada por meio do software SAS® (SAS INSTITUTE, 2009). A normalidade dos dados da ANOVA foi verificada mediante teste Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias, bem como a transformação ótima quando necessária, verificada pelo teste Box-Cox. Posteriormente, aplicou-se o teste F ($p < 0,05$) para verificar diferenças entre tratamentos.

Figura 1 - Dados de precipitação pluvial durante os períodos de condução dos dois cultivos de milho, nas safras 2010/11 (A) e 2011/12(B); as setas indicam o início do florescimento

2.3 Resultados e Discussão

O teor de P no solo aumentou independentemente do modo de aplicação, nas duas safras agrícolas 2010/11 e 2011/12, exceto na ausência de fornecimento do nutriente (Tabela 3). Os teores de P no solo, independente do modo de aplicação, classificavam como médio (16 a 40 mg.dm⁻³) e alto (41 a 80 mg.dm⁻³), com base em Raij et al. (1997).

O teor de P (59,2 mg.dm⁻³) nos primeiros 5 cm, na média de dois anos, foi superior com a aplicação a lanço na superfície, o que era esperado, em razão da baixa mobilidade desse íon. A sua aplicação a lanço e incorporado (54,3 mg.dm⁻³) e no sulco de semeadura (59,2 mg.dm⁻³) foram semelhantes e superiores ao não fornecimento do nutriente (32,1 mg.dm⁻³) (Tabela 3). Nos primeiro 10 e 20 cm de profundidade o teor de P no solo não variou pelo modo de aplicação, exceto em relação ao que não recebeu a aplicação do nutriente. Isto pode ser explicado pela

concentração superficial do nutriente, diluído por uma maior quantidade de solo amostrado.

Tabela 3 - Teor de P (mg.dm^{-3}) no solo nos primeiros 5, 10 e 20 cm de profundidade, após a colheita do milho, nas duas safras agrícolas 2010/11 e 2011/12

Tratamentos	2010/11	2011/12	Médias
0 – 5 cm			
Controle	31,9 ⁽¹⁾	32,3	32,1 c *
Sulco	48,8	52,0	50,4 b
Lanço +grade	50,6	58,0	54,3 ab
Lanço	55,9	62,5	59,2 a
Médias	46,8 B	51,2 A	
0 - 10 cm			
Controle	27,5	29,8	28,6 b
Sulco	40,6	45,8	43,3 a
Lanço +grade	43,5	51,3	47,4 a
Lanço	45,4	53,9	49,6 a
Médias	39,3 B	45,2 A	
0 – 20 cm			
Controle	20,1	24,0	22,1 b
Sulco	44,6	42,4	43,5 a
Lanço +grade	33,8	40,1	36,9 a
Lanço	35,8	39,4	37,6 a
Médias	33,6 ^{ns}	36,5	

⁽¹⁾ Metodologia de extração pela Resina trocadora de íons; * médias seguidas pela mesma letra minúscula, nas colunas, e maiúscula, nas linhas, não diferem entre si; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

A atividade da fosfatase ácida medida nas folhas de milho, no florescimento, variou com o modo de aplicação de P na safra 2010/11. Na área sem aplicação de P, em solo com 17 mg.dm^{-3} de P (Tabela 1), verificou-se maior atividade da enzima fosfatase ácida, com atividade média igual a $9,2 \text{ mmol p-NPP h}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ MF}$ (Figura 2).

A fosfatase ácida participa da hidrólise e mobilização de fósforo inorgânico (Pi), a partir de fosfatos orgânicos, com maior ação quando a concentração de Pi no tecido é baixa (LEE, 1988).

Nos 15 dias anteriores a coleta da folha para a determinação da fosfatase ácida não houve precipitação pluvial, uma provável causa para a maior atividade dessa enzima, quando não foi acrescido P em relação ao teor inicial (Figura 2A, Tabela 3). A amostragem do tecido vegetal para a análise da enzima na safra 2011/12 (Figura 2B) aconteceu durante um período chuvoso.

Figura 2 – Atividade da fosfatase ácida na folha de milho, no florescimento, nas safras 2010/11 (A) e 2011/12 (B)

O resultado da presente pesquisa corrobora em parte com os resultados de outras pesquisas, as quais evidenciaram valores superiores da fosfatase ácida em solo com baixa disponibilidade de fósforo (CIERESKO; SZCZYGLA; ZEBROWSKA, 2011; NUNES et al., 2008; LOUW-GAUME et al., 2010; LI et al., 2011).

O estado nutricional do milho não foi prejudicado, independentemente do modo de aplicação do nutriente, nas duas safras agrícolas, haja vista que as concentrações foliares estão dentro da classe considerada adequada (2 a 4 g kg⁻¹ de P), com base em Raij et al. (1997) (Tabela 4).

Tabela 4 – Concentração de P na folha diagnóstico do milho, nas safras agrícolas de 2010/11 e 2011/12

Tratamentos	Concentração de P	
	2010/11	2011/12
	g kg ⁻¹	
Controle	2,96	3,43
Sulco	2,83	3,56
Lanço +grade	3,01	3,19
Lanço	2,80	3,35
Média	2,90	3,38
F ⁽¹⁾	1,34 ^{ns}	0,6 ^{ns}
CV(%) ⁽²⁾	6,23	11,86

⁽¹⁾ valor do Teste F; ⁽²⁾ coeficiente de variação; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

A ausência de efeito do modo de aplicação se deve ao teor de P presente no solo e, provavelmente, porque nesses dois anos o período de formação da folha diagnóstico não houve limitação hídrica suficiente para prejudicar a taxa de difusão.

O resultado da presente pesquisa difere daquele obtido por Motomiya et al. (2004), os quais verificaram maior valor de P nas folhas de soja, com a aplicação no

sulco, quando comparada com aplicação a lanço, assim como por Silva et al. (1990) que registrou o fornecimento de P no sulco de semeadura como a melhor opção. Essa diferença de resultados entre as pesquisas se deve à variação das condições climáticas, do material genético e do teor de P no solo.

A produção de massa de matéria seca e a produtividade do milho (Tabela 5), bem como o conteúdo de P acumulado (Tabela 6) não foram afetados, nas safras agrícolas 2010/11 e 2011/12, pelo modo de aplicação do nutriente, mesmo quando não forneceu o nutriente, em razão do alto potencial produtivo do solo.

Tabela 5 - Produção de massa de matéria de seca da parte aérea e produtividade do milho nas safras agrícolas 2010/11 e 2011/12

Tratamentos	2010/11		2011/12	
	Parte aérea	Produtividade	Parte aérea	Produtividade
		kg ha ⁻¹		
Controle	7.117	6.685	10.184	10.683
Sulco	7.210	7.526	10.297	10.675
Lanço +grade	8.756	7.198	10.469	10.841
Lanço	8.214	7.398	10.233	10.263
Média	7.824	7.202	10.296	10.615
F ⁽¹⁾	1,64 ^{ns}	2,73 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,31 ^{ns}
CV(%) ⁽²⁾	14,69	5,12	9,18	8,37

⁽¹⁾ valor do Teste F; ⁽²⁾ coeficiente de variação; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

A precipitação pluvial não foi bem distribuída na primeira safra, quando aconteceu um veranico de 15 dias antes do florescimento e outro após 15 dias do florescimento. O maior potencial de produção de massa de matéria seca na safra 2011/12 pode ser atribuído, em parte, ao clima e, principalmente, a qualidade do híbrido utilizado na referida safra.

Tabela 6 - Conteúdo de P acumulado na parte aérea e nos grãos nas safras agrícolas 2010/11 e 2011/12

Tratamentos	2010/11		2011/12	
	Parte aérea	Grãos	Parte aérea	Grãos
	kg ha ⁻¹			
Controle	5,25	37,30	7,62	52,22
Sulco	8,40	42,34	8,47	49,77
Lanço +grade	10,21	43,22	8,69	48,66
Lanço	8,05	43,06	9,00	52,72
Média	7,98	41,48	8,45	50,84
F ⁽¹⁾	3,19 ^{ns}	1,42 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,35 ^{ns}
CV(%) ⁽²⁾	27,88	10,62	9,49	12,94

⁽¹⁾ valor do Teste F; ⁽²⁾ coeficiente de variação; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Os índices de eficiência nutricional foram calculados com o objetivo de identificar a contribuição dos processos de utilização (IEU), translocação (IER) e de produção de grãos (IEPg) pelo milho. O IEU mede a produção de grãos por unidade do nutriente contido na planta; o IEPg relaciona os grãos produzidos por unidade do nutriente nos grãos; e o IER relaciona a fração total do nutriente na planta que é transportada para o grão.

Assim como ocorreu com as outras variáveis, também não houve diferença para modos de aplicação de P nas duas safras agrícolas (Tabela 7). A metodologia para a obtenção desses índices para P não distingue aquele proveniente das reservas do solo, que na presente pesquisa (17 mg.dm⁻³) foi suficiente para altas produtividades de milho, como evidencia os resultados na ausência da adubação fosfatada (6.685 e 10.683 kg ha⁻¹, nas safras 2010/11 e 2011/12, nessa ordem).

Na pesquisa de Resende et al. (2006), com fontes e modo de aplicação de P no milho, os autores não obtiveram diferença no IEU e IEPg quando aplicou 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em uma única vez feita a lanço e no sulco, assim como para o fornecimento de 60 kg ha⁻¹ no sulco de semeadura, repetido em três anos consecutivos. Para os autores, os valores semelhantes dos respectivos índices indicam que os mesmos independem do modo de aplicação de P. Assim, as diferenças entre os índices de eficiência são mais perceptíveis quando se avalia fontes de P, do que para modos de aplicação do nutriente (MACHADO; FURLANI; MACHADO, 2001).

Tabela 7 - Índices de eficiência de uso (IEU), de produção de grãos (IEPg) e de redistribuição (IER), em razão do modo de aplicação do P no milho, na safra 2010/2011 e 2011/12

Tratamentos	IEU ⁽¹⁾	IEPg ⁽²⁾	IER ⁽³⁾
2010/11			
Testemunha	1128,09	159,15	7,13
Sulco	799,05	157,59	5,09
Lanço +grade	691,88	148,95	4,60
Lanço	840,13	151,99	5,51
Média	864,79	154,42	5,58
F ⁽⁴⁾	2,86 ^{ns}	0,48 ^{ns}	2,73 ^{ns}
CV(%) ⁽⁵⁾	24,57	8,1	22,99
2011/12			
Testemunha	1265,53	181,42	6,97
Sulco	1126,82	190,35	5,94
Lanço +grade	1187,22	198,96	6,05
Lanço	1026,39	173,04	5,93
Média	1151,49	185,94	6,22
F	0,75 ^{ns}	3,82 ^{ns}	1,19 ^{ns}
CV(%)	20,28	6,16	43,7

⁽¹⁾ IEU: kg grãos/ kg P planta ; ⁽²⁾ IEPg: kg grãos/ kg P grãos; ⁽³⁾ IER: kg P grãos/ kg P planta; ⁽⁴⁾ valor do Teste F; ⁽⁵⁾ coeficiente de variação; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Os resultados da presente pesquisa, assim como os resultados obtidos por Pavinato e Ceretta, (2004), sugerem que se o teor de P estiver acima do nível crítico, a resposta da cultura independe do modo de aplicação, uma explicação do porque não acontece perda de produtividade pela aplicação de P a lanço na superfície do solo. Entretanto, com a exportação do nutriente pela sequência de cultivos, associado a baixa mobilidade do nutriente, em sistema com pouco resíduo sobre o solo e quando acontecer veranico (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008) haverá, sem dúvida, prejuízo da produtividade.

Em solo com teor de P abaixo do limite crítico, Pottker (1999) obteve maior produtividade de milho com a aplicação de P no sulco de semeadura comparado ao fornecimento a lanço em superfície. A importância da quantidade e da distribuição da precipitação pode ser entendida a partir da pesquisa de Motomiya et al. (2004), os quais não observaram diferença para o modo de aplicação a lanço ou no sulco de semeadura, em ano de estiagem severa, pois nesse caso, nem a colocação do P no sulco de semeadura foi suficiente.

A concentração das raízes em razão do acúmulo superficial de P (COSTA et al., 2009) prejudica a eficiência de uso do nutriente em áreas de plantio direto com pequena quantidade de resíduos, em ano com distribuição irregular das

precipitações, devido a insuficiência e inconstância da umidade necessária à difusão. Deste modo, a aplicação no sulco de semeadura diminui o risco de prejuízo, em razão da sazonalidade da precipitação. Quando houver prejuízo da fertilidade na camada inferior àquela em que há o acúmulo de P, como nos primeiros 5 cm de profundidade, haverá a necessidade de incorporá-lo mecanicamente, intensificando a fixação do nutriente, assim como perderá os benefícios proporcionado pelo plantio direto.

A presente pesquisa refere-se aos resultados obtidos nas duas primeiras safras agrícolas, insuficiente para observar o esgotamento do P abaixo da camada superficial e para a finalidade de avaliar modos de aplicação, dependente não só do teor do nutriente no solo, mas principalmente da sazonalidade da precipitação. Portanto, uma pesquisa nessa linha requer que seja de longa duração, razão porque a mesma continua em andamento.

2.4 Conclusão

O modo de aplicação do fósforo não influencia a eficiência agrônômica e a produtividade do milho sob precipitação pluvial suficiente e teor adequado desse nutriente no solo.

Referências

CIERESKO, I.; SZCZYGLA, A.; ZEBROWSKA, E. Phosphate deficiency affects acid phosphatase activity and growth of two wheat varieties. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 34, p. 815-829, 2011.

COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D. de; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; CAO, E.G.; HOLZSCHUH, M.J. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1237-1247, 2009.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

LEE, R.B. Phosphate influx and extracellular phosphatases activity in barley roots and rose cells. **New Phytologist**, Cambridge, v. 109, p. 141-148, 1988.

LI, Y.S.; GAO, Y.; TIAN, Q.Y.; SHI, F.L.; LI, L.H.; ZHANG, W.H. Stimulation of root acid phosphatase by phosphorus deficiency is regulated by ethylene in *Medicago falcate*. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 71, p. 114-120, 2011.

LOUW-GAUME, A.E.; RAO, I.M.; GAUME, A.J.; FROSSARD, E. A comparative study on plant growth and root plasticity responses of two *Brachiaria* forage grasses grown in nutrient solution at low and high phosphorus supply. **Plant and Soil**, The Hague, v. 328, p. 155-164, 2010.

MACHADO, C.T.T.; FURLANI, A.M.C.; MACHADO, A.T. Índices de eficiência de variedades locais e melhoradas de milho ao fósforo. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 225-238, 2001.

McLACHLAN, K.D.; DE MARCO, D.G. Acid phosphatase activity of intact roots and phosphorus nutrition in plants. III. Its relation to phosphorus garnering by wheat and a comparison with leaf activity as a measure of phosphorus status. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 33, p. 1-11, 1982.

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, 1982.

MOLLIER, A.; PELLERIN, S. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 50, p. 487-497, 1999.

MOTOMIYA, W.R.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; GONÇALVES, M.C.; ROBAINA, A.D.; NOVELINO, J.O. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 4, p. 307-312, 2004.

NUNES, F.N.; CANTARUTTI, R.B.; NOVAIS, R.F.; SILVA, I.R. TÓTOLA, M.R.; RIBEIRO, B.N. Atividade de fosfatases em gramíneas forrageiras em resposta à disponibilidade de fósforo no solo e à altura de corte das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1899-1909, 2008.

PAVINATO, P.S.; CERETTA, C.A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n.6, p. 1779-1784, 2004.

POTTKER, D. **Aplicação de fósforo no sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa, 1999. 32 p. (Embrapa Trigo, Boletim de Pesquisa, 2).

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RAIJ, B van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KIMPARA, D.I.; SANTOS, J.Z.L.; CARNEIRO, L.F. Fontes e modo de

aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30; p. 453-466, 2006.

SANTOS, D.R. dos; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SAS INSTITUTE. **The SAS system for Windows**: v. 9.2. Cary, 2009.

SILVA, F.C.; BASSO, L.C. Avaliação da atividade “in vivo” da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 371-375, 1993.

SILVA, N.M. da; CARVALHO, L.H.; SABINO, J.C.; LELLIS, L.G.L.; SABINO, N.P.; KONDO, J.I. Modo e época de aplicação de fosfatos na produção e outras características do algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 49, p. 157-170, 1990.

TEZOTTO, T. **Metabolismo e qualidade da bebida em cafeeiro expostos ao cádmio, níquel e zinco**. 2010. 123 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2010.

3 RESPOSTA DA SOJA A LOCALIZAÇÃO DO FÓSFORO EM RAZÃO DA UMIDADE DO SOLO

Resumo

A adição consecutiva de fertilizantes fosfatados na superfície do solo, com ausência de revolvimento, provoca a formação de uma camada altamente concentrada de fósforo (P). Como a absorção de P é extremamente dependente do teor de água no solo, há risco quando esse nutriente está concentrado na superfície do solo, pois é a camada que seca primeiro, devido à perda de água por evaporação e transpiração. Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de avaliar o efeito da localização do P na superfície e em profundidade, no crescimento e concentração do nutriente na soja, em razão da umidade. A localização de P foi simulada com a aplicação do fertilizante na superfície do solo e a 6 cm de profundidade, com umidade a 50% e 100% da capacidade de campo. A localização do fósforo em profundidade beneficiou o crescimento da soja, sem influência na concentração do nutriente na planta.

Palavras-chave: Adubação fosfatada; *Glycine max* (L.) Merrill; Crescimento: Capacidade de campo

Abstract

The consecutive addition of phosphate fertilizers at the soil surface, without tillage causes the formation of a highly concentrated layer of phosphorus (P). As the absorption of P is extremely dependent of the soil water content, there is a risk when this nutrient is concentrated at the soil surface, because this layer gets dried first, due to water loss by evaporation and transpiration. This research was conducted to evaluate the effect of the P location on the surface and at deep band at the soybean growth and nutrient content, according to the moisture. The P location was simulated by placing the fertilizer on the soil surface and 6 cm depth, with moisture at 50% and 100% of the field capacity. The P location at deep band benefited soybean growth without influence at plant nutrient content.

Keywords: Phosphate fertilization; *Glycine max* (L.) Merrill; Growth; Field capacity

3.1 Introdução

A eficiência do fósforo (P) está diretamente relacionada ao modo de aplicação do fertilizante, principalmente em solos com baixo teor desse nutriente e que possuem alta capacidade de fixação (NOVAIS; SMYTH, 1999).

No sistema de produção plantio direto observa-se a formação de uma camada altamente concentrada de P na superfície do solo (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001), assim como de raízes. Esse comportamento é consequência da adição consecutiva de fertilizantes fosfatados na superfície do solo, na ausência de revolvimento.

A absorção de P é extremamente dependente do teor de água no solo. Assim, a aplicação do nutriente a lanço em superfície é mais vulnerável as incertezas climáticas, uma vez que, em razão da irregularidade da precipitação, a camada superficial do solo seca e prejudica a absorção, em razão da diminuição da difusão.

A aplicação de P no sulco de semeadura, nos primeiros 10 a 15 cm de profundidade, favorece a absorção radicular, por se tratar de uma zona mais úmida em relação à superfície e, também, porque diminui a fixação, devido ao menor contato com o solo, proporcionado pela localização do nutriente.

Assim, pode-se afirmar que a perda de produtividade, em razão do modo de aplicação de P a lanço na superfície, acontecerá em mais ou menos tempo, de acordo com o esgotamento do nutriente abaixo dos primeiros 5 cm de profundidade, em ano com distribuição irregular da precipitação.

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de avaliar o efeito da localização do P na superfície e em profundidade, no crescimento e concentração do nutriente na soja, em razão da umidade.

3.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba-SP. O solo utilizado no experimento, classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (EMBRAPA, 2006), foi coletado na camada arável, cujos resultados da análise química estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado da análise química do solo usado no experimento com soja

pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V
4,8	9	3	11	1,2	13	5	25	19	44	43

Unidades: M.O. (g dm^{-3}); P e S (mg dm^{-3}); K, Ca, Mg, H+al, SB e CTC (mmolc dm^{-3}); V (%). Métodos: pH em CaCl_2 (acidez ativa) – CaCl_2 0,01 mol L^{-1} ; M.O. – Dicromato/Colorimétrico; Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio – extração pela Resina trocadora de íons; Alumínio trocável – Titulometria (1 mol L^{-1}); H+Al (acidez potencial) – pH SMP; Enxofre (S-SO_4)⁻² extração $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,01 mol L^{-1} -Turbidimetria.

De acordo com os resultados da análise física o solo possui 780 g kg^{-1} de areia; 65 g kg^{-1} de silte e 155 g kg^{-1} de argila. A correção do pH foi realizada com a adição de calcário a fim de elevar a saturação por bases a 60%. Após isso o solo foi acondicionado em vasos de 9 litros e irrigado até atingir 70% da capacidade de campo, onde permaneceram incubados por 30 dias.

Após esse período os vasos foram adubados com 100 mg dm^{-3} de K_2O , 50 mg dm^{-3} de S; 1 mg DM^{-3} de B; 5 mg dm^{-3} de Zn; 5 mg dm^{-3} de Mn; $0,1 \text{ mg dm}^{-3}$ de Co; e $0,15 \text{ mg.dm}^{-3}$ de Mo com solução nutritiva.

O experimento foi instalado em esquema fatorial inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram compostos com a simulação de diferentes localizações do fertilizante, na superfície do solo e a 6 cm de profundidade, com umidade a 50% e 100% da capacidade de campo (CC) (Tabela 2). Durante a condução do experimento foram efetuadas quatro coletas destrutivas.

Tabela 2 – Relação dos tratamentos com base na localização do fertilizante fosfatado e no nível de umidade do solo

Localização do fertilizante	Umidade	Tratamentos
Superfície	100%	PS-100
Superfície	50%	PS-50
Profundidade – 6 cm	100%	PP-100
Profundidade – 6 cm	50%	PP-50

A camada de solo enriquecida com P, pela aplicação a lanço na superfície e em profundidade, foi preparada com a aplicação de 100 mg dm^{-3} de P na forma de fosfato de potássio (KH_2PO_4). A aplicação a lanço na superfície foi simulada com uma camada de, aproximadamente, 2 cm de solo homogeneizada com o fertilizante; e para a aplicação em profundidade o procedimento foi o mesmo, só que a 6 cm da superfície.

A CC do solo foi determinada pelo método da panela de pressão (EMBRAPA, 1997) em que se obteve $0,4 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$. Antes da semeadura, todos os vasos foram umedecidos até a CC e submetidos à determinação da massa do conjunto (vaso+solo). A quantidade de água para reposição foi determinada com pesagens diárias dos vasos a fim de manter os valores correspondentes a 50% e 100% da CC. Durante a fase da germinação, o teor de água foi mesmo (100% da CC). A

diferenciação entre os valores da CC foi feita somente após a emergência das plantas.

A semeadura da soja, cultivar Msoy 7908, foi realizada no dia 7 de março de 2012, mantendo três plantas por vaso.

Aos 15, 30, 45 e 60 dias após a emergência (DAE), realizou-se uma coleta destrutiva de quatro repetições por tratamento. Em cada coleta foi medida a altura das plantas; potencial hídrico foliar; área foliar; e massa de matéria seca da planta.

A altura das plantas foi obtida com uma régua pela medida entre o nível do solo e a base de onde localiza o meristema apical da soja. O potencial hídrico foliar foi obtido com a câmara de pressão Soil-Moisture modelo 3005 (SCHOLANDER et al., 1965) a cada quatro horas entre 6:00 e 18:00 h, utilizando o terceiro e quarto trifólio completamente desenvolvido. A área foliar foi medida pelo leitor de área foliar Licor Modelo LI-3100. A massa de matéria seca da parte aérea foi determinada após secagem em estufa com circulação de ar a 70 °C por 72 horas. Na última coleta do experimento (60 DAE) determinou-se, também, a massa de matéria seca de raízes das três plantas de cada vaso.

Com os valores obtidos nas coletas aos 15 e 60 DAE foi determinada a taxa de crescimento em altura (TCH, cm dia⁻¹), da área foliar (TCAF, cm² dia⁻¹), e da taxa da produção de massa de matéria seca da parte aérea (TPMSPA g dia⁻¹) das plantas de soja, conforme as expressões abaixo:

$$TCH = \Delta HC / \Delta t \quad (1)$$

$$TCAF = \Delta AF / \Delta t \quad (2)$$

$$TPMSPA = \Delta MSPA / \Delta t \quad (3)$$

em que: ΔHC (cm) corresponde a diferença da altura entre o intervalo de amostragem; ΔAF (cm²) corresponde a diferença da área foliar entre o intervalo de amostragem; $\Delta MSPA$ (g) corresponde a diferença entre a massa de matéria seca da parte aérea obtida entre o intervalo de amostragem; e Δt (dias) refere-se ao intervalo em dias.

As amostras secas foram moídas em moinho tipo Wiley e submetidas à determinação de P por meio da técnica de análise por fluorescência de raios-X, com um espectrômetro de raios-X de energia dispersiva (EDX-720 Shimadzu), de acordo com a metodologia descrita por Tezotto (2010).

A análise estatística foi realizada por meio do software SAS® (SAS INSTITUTE, 2009). A normalidade dos dados da análise de variância (ANOVA) foi verificada mediante teste Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias, bem como a transformação ótima quando necessária, verificada pelo teste Box-Cox. Posteriormente, aplicou-se o teste F ($p < 0,05$) para verificar o grau de significância das interações entre os fatores e de cada fator individualmente quando necessário.

3.3 Resultados e Discussão

De acordo com a análise dos resultados houve interação entre a localização do P e a umidade do solo, somente para altura da planta (H). A umidade influenciou todas as variáveis analisadas nessa pesquisa, provavelmente em razão da diferença acentuada entre os níveis adotados (50 e 100% da CC). Por sua vez, a localização do P interferiu nas avaliações relativas ao crescimento da planta, exceto a taxa de crescimento em área foliar (TCAF) e a concentração do P na parte aérea (P_{PA}) e nas raízes (P_{Rz}) (Tabela 3).

Os valores de massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) e raízes (MSRz) da soja não apresentaram interação entre os fatores. Para ambas, as maiores médias ocorreram com P em profundidade. (Tabela 4).

Para a altura houve interação entre a localização do P e a umidade do solo, em que a maior média foi obtida quando o nutriente foi aplicado em profundidade. A área foliar teve influência positiva da presença de P em profundidade e, também, da umidade do solo (Tabela 4).

Tabela 3 – Resultado da ANOVA para as variáveis analisadas, em relação à localização do fósforo e a umidade do solo

Fonte de variação	GL ⁽¹⁾	60 DAE						TCH ⁽⁸⁾	TCAF ⁽⁹⁾	TPMSPA ⁽¹⁰⁾
		MSPA ⁽²⁾	MSRz ⁽³⁾	H ⁽⁴⁾	AF ⁽⁵⁾	P _{PA} ⁽⁶⁾	P _{Rz} ⁽⁷⁾			
		P > F								
Localização	1	<,0001 [*]	0,0009 [*]	0,0035 [*]	0,0308 [*]	0,129 ^{ns}	0,109 ^{ns}	0,0355 [*]	0,2806 ^{ns}	<,0001 [*]
Umidade	1	<,0001 [*]	<,0001 [*]	<,0001 [*]	0,0001 [*]	0,0107 [*]	0,0047 [*]	<,0001 [*]	<,0001 [*]	<,0001 [*]
Localização*Umidade	1	0,24 ^{ns}	0,0699 ^{ns}	0,0122 [*]	0,8246 ^{ns}	0,0566 ^{ns}	0,4406 ^{ns}	0,0575 ^{ns}	0,7962 ^{ns}	0,4317 ^{ns}
CV(%)	-	4,60	8,14	7,82	8,62	13,3	11,10	6,38	11,20	5,6

⁽¹⁾ Graus de liberdade da soma dos quadrados do Tipo III; ⁽²⁾ Massa de matéria seca da parte aérea (g), ⁽³⁾ massa de matéria seca das raízes (g), ⁽⁴⁾ altura de plantas (cm); ⁽⁵⁾ área foliar (cm²), ⁽⁶⁾ teor de P na parte aérea (g. kg⁻¹) e ⁽⁷⁾ nas raízes (g.kg⁻¹) aos 60 DAE; ⁽⁸⁾ Taxa de crescimento em altura (cm.dia⁻¹); ⁽⁹⁾ Taxa de crescimento da área foliar (cm².dia⁻¹); ⁽¹⁰⁾ Taxa de produção de massa de matéria seca da parte aérea (g.dia⁻¹); ^{*} significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 4 – Resultados de massa de matéria seca da parte aérea (MSPA, g), e das raízes (MSRz, g), área foliar (AF, cm²) e altura (H, cm) da soja aos 60 DAE em relação à localização do fósforo e a umidade do solo

Localização do P	Umidade do solo		Média
	100% CC	50% CC	
MSPA			
Superfície	20,56	7,15	13,85 b
Profundidade	24,70	10,40	17,54 a
Médias	22,63 A	8,77 B	
MSRz			
Superfície	3,18	1,56	2,37 b
Profundidade	3,92	1,86	2,89 a
Médias	3,55 A	1,71 B	
H			
Superfície	66,05 Ba	52,04 Ab	59,06
Profundidade	83,65 Aa	54,02 Ab	68,84
Médias	74,85	53,03	
AF			
Superfície	3089,08	1041,48	2065,28 b
Profundidade	3351,53	1260,94	2306,23 a
Médias	3220,30 A	1151,21 B	

Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Na presente pesquisa, o crescimento das plantas submetidas a déficit hídrico programado (50% CC) foi prejudicado, devido, em parte, a antecipação do florescimento. Nessas condições, aos 60 DAE, as plantas estavam em R2 (florescimento pleno), enquanto as plantas conduzidas na CC iniciavam o florescimento (R1).

De maneira geral, 96% da biomassa vegetal são carboidratos e o restante os nutrientes minerais. Assim, o acúmulo de biomassa depende somente da fotossíntese, que na presente pesquisa foi prejudicada pela restrição hídrica, principalmente depois dos primeiros 30 DAE, como indicam as avaliações feitas aos 15 e 30 DAE (Figura 2 A e B). Esta pouca sensibilidade à deficiência hídrica nessa fase é relatada por Boerma e Ashley (1982), a qual aumenta na fase reprodutiva (NESMITH; RITCHIE, 1992), como pode ser observada na figura 2 D.

A perda de água por transpiração não permite que as plantas permaneçam plenamente hidratadas, com prejuízo do crescimento, quando submetidas à deficiência hídrica, principalmente a partir de 30 DAE (Figura 2 B, C e D). A partir dessa época há uma nítida distinção da área foliar da soja em razão da umidade do

solo (Figura 1 B). De acordo com Schmidhalter e Studer (1998), a evapotranspiração em plantas bem nutridas é proporcional à área foliar. Não pode ser descartada, também, a deficiência de P sobre a assimilação do carbono. Esse processo depende da formação de fósforo-açúcares, necessária à produção de sacarose, forma em que ocorre a mobilização do carbono em plantas vasculares (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Figura 1 – Altura (A) área foliar (B) e massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) (C) da soja aos 15, 30, 45 e 60 DAE

Figura 2 - Potencial hídrico foliar (MPa) ao longo do dia aos 15 (A), 30 (B), 45 (C) e 60 DAE (D), em razão da localização do P e umidade do solo

Para que haja a absorção de P é necessário o contato do nutriente com as raízes, que se dá por difusão. Este processo pode ter sido prejudicado sob condição de restrição hídrica, o que explicaria a menor quantidade de massa de matéria da parte aérea e das raízes. Costa et al. (2006) estabeleceram relação entre a difusão de fósforo e o conteúdo de água no solo, os quais concluíram que o aumento da umidade é muito mais importante do que a dose de P para a difusão.

A umidade do solo também interfere no desenvolvimento das raízes e, dessa maneira, na absorção desse nutriente. Na presente pesquisa a massa de matéria seca de raízes foi 2,1 vezes superior na CC (Tabela 4).

A altura da planta e a área foliar ajudam a explicar a maior massa de matéria seca da parte aérea, ambas influenciadas pelo P em profundidade. A altura da planta foi mais efetiva, quando considera a localização do fósforo (Figura 1).

A taxa de crescimento em altura (TCH, cm dia⁻¹), da área foliar (TCAF, cm² dia⁻¹) e da produção de massa de matéria seca da parte aérea (TPMSPA, g dia⁻¹) estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Taxa de crescimento em altura (TCH, cm dia⁻¹), da área foliar (TCAF, cm² dia⁻¹) e da produção de massa de matéria seca na parte aérea (TPMSPA, g dia⁻¹) em relação à localização do fósforo e a umidade do solo

Localização do P	Umidade do solo		Média
	100% CC	50% CC	
		TCH	
Superfície	1,03	0,75	0,89 b
Profundidade	1,34	0,76	1,05 a
Médias	1,19 A	0,76 B	
		TCAF	
Superfície	60,84	16,99	38,92 ^{ns}
Profundidade	62,83	20,17	41,50
Médias	61,84 A	18,58 B	
		TPMSPA	
Superfície	0,42	0,12	0,27 b
Profundidade	0,49	0,18	0,34 a
Médias	0,46 A	0,15 B	

Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

O modo de aplicação de P influenciou a TCH e a TPMSPA, com benefício da localização do P em profundidade. Aos 15 DAE os resultados relativos ao crescimento da soja são praticamente iguais, em razão do pequeno período de

restrição hídrica (50% da CC), as quais acentuam com o tempo (Figura 1). A altura e a massa de matéria seca da parte aérea aumentam progressivamente com a época de avaliação, entre 15 e 60 dias após a emergência. Em consequência desse fato, constatou-se diferença significativa para a TCH e a TPMSPA (Tabela 5).

A concentração de P na parte aérea (P_{PA}) e nas raízes (P_{Rz}) variou somente com a umidade do solo (Tabela 6), e, como nas demais variáveis, foi superior nas plantas sem restrição hídrica.

Tabela 6 – Concentração de P na parte aérea (P_{PA} , g kg⁻¹) e nas raízes (P_{Rz} , g kg⁻¹) em relação à localização do fósforo e a umidade do solo

localização do tústulo e a umidade do solo						
Localização	Umidade do solo		Média	Umidade do solo		Média
	100%CC	50%CC		100%CC	50%CC	
		P _{PA}			P _{Rz}	
Superfície	1,73	1,42	1,57 ^{ns}	1,45	1,22	1,33 ^{ns}
Profundidade	1,96	1,56	1,76	1,65	1,29	1,47
Média	1,84 A	1,49 B		1,55 A	1,26 B	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula em cada coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

A menor concentração de P nas plantas conduzidas a 50% da CC pode ser explicada pelo prejuízo a difusão, que depende, entre outros fatores, da umidade do solo, como observaram Costa et al. (2006). Para Miranda et al. (2000), na pesquisa feita com dose de P em condições de irrigação suficiente e deficiente na cultura do feijoeiro, os autores observaram que sob irrigação a maior dose de P (1.000 kg ha⁻¹ de P₂O₅), em solo com baixo teor do nutriente, foi semelhante a dose inferior (250 kg ha⁻¹ de P₂O₅), mas com irrigação suficiente. Esses resultados evidenciam a importância da umidade para o aproveitamento do nutriente, como também constatado por Firmano et al. (2009). Assim, há risco quando esse nutriente está concentrado na superfície do solo, pois é a camada que seca primeiro, devido à perda de água por evaporação e transpiração.

3.4 Conclusão

A localização do fósforo em profundidade beneficia o crescimento da soja, sem influência na concentração do nutriente na planta.

Referências

BOERMA, H.R.; ASHLEY, D.A. Irrigation, row spacing, and genotype effects on late and ultra-late planted soybeans. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 6, p. 995-999, Nov./Dec. 1982.

COSTA, J.P.V.; BARROS, N.F.; ALBUQUERQUE, A.W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J.R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 828-835, 2006.

EMBRAPA **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FIRMANO, R.S.; KUWAHARA, F.A.; SOUZA, G.M. Relação entre adubação fosfatada e deficiência hídrica em soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 1967-1973, 2009.

MIRANDA, L.N. de; AZEVEDO, J.A. de; MIRANDA, J.C.C. de; GOMES, A.C. Produtividade do feijoeiro em resposta à adubação fosfatada e regimes de irrigação em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 703-710, 2000.

NESMITH, D.S.; RITCHIE, J.T. Short and long term responses of corn to a pre-anthesis soil water deficit. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, p. 107-113, 1992.

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

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 151-160, 2001.

SAS INSTITUTE. **The SAS system for Windows**: v. 9.2. Cary, 2009.

SCHMIDHALTER, U.; STUDER, Ch. Water-use efficiency as influenced by plant mineral nutrition. In: SINO-GERMAN WORKSHOP "IMPACT OF PLANT NUTRITION ON SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRODUCTION", 1., 1998, Kiel. **Annals...** Kiel, 1998. p. 1-9. Disponível em: <<http://www.pe.wzw.tum.de/publikationen/pdf/sd441.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2012.

SCHOLANDER, P.F., HAMMEL, H.T., BRADSTREET, E.D., HEMMINGSEN, E.A. Sap pressure in vascular plants. **Science**, New York, v. 148, p.339-346, 1965.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.

TEZOTTO, T. **Metabolismo e qualidade da bebida em cafeeiro expostos ao cádmio, níquel e zinco**. 2010. 123 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.