

Disponibilidade de fósforo para a cultura do milho na integração lavoura-pecuária em plantio direto⁽¹⁾

Adriel Ferreira da Fonseca⁽²⁾; Shively Los Galetto⁽³⁾; Silvano Harkatin⁽⁴⁾; André Carlos Auler⁽⁴⁾; Igor Quirrenbach de Carvalho⁽⁵⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos das instituições: CNPq, CAPES, Fundação Araucária, International Plant Nutrition Institute (IPNI), Fundação ABC e Yoorin Fertilizantes.

⁽²⁾ Professor Adjunto; Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG); Ponta Grossa, Paraná; adriel@uepg.br; ⁽³⁾ Estudante de Doutorado em Agronomia; UEPG; ⁽⁴⁾ Estudante de Mestrado em Agronomia; UEPG; ⁽⁵⁾ Pesquisador da área de Forragicultura; Fundação ABC.

RESUMO: O fósforo (P) tem sido o nutriente mais limitante nos sistemas agrícolas de produção no Brasil, devido à sua baixa disponibilidade no solo. Os objetivos deste trabalho foram determinar as concentrações de P disponível extraído por diferentes métodos e verificar a melhor correlação com atributos da cultura do milho, após 36 meses de experimentação com aplicação de fosfatos em um sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) em plantio direto (PD). O experimento foi instalado em abril/2009, no município de Castro/Paraná, em um Cambissolo Háplico argiloso. O delineamento empregado foi em blocos em esquema fatorial incompleto com quatro repetições. Os tratamentos consistiram da aplicação anual, na superfície em área total, de doses de superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo (FNR) e termofosfato magnesiano (TFM), por ocasião na semeadura da forrageira de inverno. Em abril/2012, depois da colheita do milho, procedeu-se a amostragem do solo para a determinação das concentrações de P disponível pelos extratores de Mehlich-1 (M1), resina trocadora de íons (RTI) e Morgan modificado (MM). Na cultura do milho foram quantificados o acúmulo de P na massa seca (P-MS) e a exportação de P pelos grãos (P-Ex). Os extratores M1 e RTI se correlacionaram de forma semelhante com o P-MS e P-Ex nos tratamentos com uso de SFT. Para as fontes insolúveis em água (FNR e TFM), o P-RTI melhor se correlacionou com os atributos do milho. A solução de MM foi ineficiente para prever a disponibilidade de P para o milho no sistema de ILP em PD.

Termos de indexação: Mehlich-1, resina trocadora de íons, Morgan modificado.

INTRODUÇÃO

O sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), aliado ao plantio direto (PD) tem assumido presença cada vez maior nas propriedades rurais da região Sul do Brasil (Carvalho et al., 2010). Para atingir elevados rendimentos nos sistema de produção, o manejo da fertilidade do solo torna-se

uma prática fundamental, devido ao fato dos solos brasileiros serem altamente intemperizados e pobres em fósforo (P) (Novais e Smyth, 1999).

Nesse contexto, o fornecimento de P tem sido uma prática essencial no país e o tipo de fonte fosfatada utilizada, tem resultado em respostas distintas para as culturas (Resende et al., 2006). A análise química do solo tem sido a principal ferramenta para a recomendação segura de fertilizante fosfatado (Santos e Kliemann, 2005). No entanto, a eficiência dos extratores para avaliar a biodisponibilidade de P tem sido questionada e, em muitas situações de solo e manejo, podendo não representar as condições reais de fertilidade deste nutriente (Silva e Raij, 1999). Esse trabalho teve por objetivo determinar as concentrações de P no solo extraído pelos métodos de Mehlich-1, resina trocadora de íons e Morgan modificado, e verificar qual procedimento de extração proporciona melhor correlação com atributos do milho em um sistema de ILP em PD.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em abril de 2009 no município de Castro/Paraná, em um Cambissolo Háplico argiloso. A área encontrava-se há oito anos em sistema de PD. O delineamento experimental empregado foi de blocos ao acaso em esquema fatorial incompleto (3x3+1) com quatro repetições, a saber: *Tratamento 1 (T1)* – sem aplicação de P (controle absoluto); *T2, T3 e T4* – aplicação de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total, respectivamente na forma de superfosfato triplo (SFT); *T5, T6 e T7* – aplicação de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total, respectivamente na forma de fosfato natural reativo (FNR); *T8, T9 e T10* – aplicação de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total, respectivamente na forma de termofosfato magnesiano (TFM). As quantidades utilizadas de cada fonte foram calculadas com base no teor de P₂O₅ total dos fertilizantes e aplicadas anualmente na superfície (em área total), por ocasião da semeadura da forrageira de inverno. Cada parcela possuía área total de 425 m² e área útil de 273 m².

Condução do experimento, amostragens e análises laboratoriais

A sucessão de culturas implantada para atender o sistema de ILP em PD entre os anos estudados (abril/2009 a abril/2012) foi: (i) aveia preta (2009) e milho (2009/10); (ii) azevém anual (2010) e soja (2010/11); e (iii) aveia preta (2011) e milho (2011/12). O pastejo adotado no período de outono-inverno foi o rotacionado. Os animais permaneceram na área durante 3-4 dias na pastagem de aveia preta e 6-7 dias no azevém anual. A lotação animal foi de 4,5 UA ha⁻¹.

Nesse estudo, o milho (2011/12) foi considerado como planta indicadora da biodisponibilidade de P. Em abril/2012, aos 36 meses após a instalação do experimento, procedeu-se a amostragem do solo para as camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm, onde as concentrações de P disponível foram avaliadas nas camadas de 0-5, 0-10 e 0-20 cm. Nas camadas de 0-10 cm o P disponível foi estimado (através da média ponderada entre as camadas de 0-5 e 5-10 cm) e de 0-20 cm (média ponderada entre as camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm).

Quando as plantas de milho atingiram o estágio fenológico R3, foram coletadas 1,0 m de plantas por parcela para quantificar o P acumulado na massa seca (P-MS). Após a maturação fisiológica (estádio R6), o milho foi colhido para a determinação da concentração de P exportado nos grãos (P-Ex).

As amostras de solo, depois de secas em estufa a 40 °C foram destinadas às determinações de P disponível pelos seguintes métodos: (i) P disponível, por meio de extração com a solução de Mehlich-1 (P-M1), sugerida por Pavan et al. (1992); (ii) P disponível pelo método da Resina trocadora de íons (P-RTI), conforme Raij et al. (1986); e (iii) P disponível pela solução de Morgan modificada (P-MM), proposta por Magdoff et al. (1999). As amostras de planta foram secadas em estufa a 60 °C e a quantificação das concentrações de P foram realizadas conforme métodos propostos por Malavolta et al. (1997).

Análise estatística

As concentrações de P no solo determinadas pelos diferentes procedimentos de extração foram submetidas à análise estatística univariada. Nos casos de F significativo (P<0,05), foi aplicado o teste de Tukey ($\alpha=0,05$) para comparar o efeito de fontes e doses de P entre tratamentos. O efeito das variáveis quantitativas (doses) foi ajustado pelos modelos de regressão de polinômios

ortogonais linear ou quadrático. Coeficientes de correlação (r) de Pearson entre atributos do solo (concentrações de P fornecida por cada um dos extratores, nas camadas do solo de 0-5, 0-10 e 0-20 cm) e do milho (P-MS e P-Ex) foram utilizados para averiguar a eficiência dos extratores, para cada fonte empregada. As análises estatísticas foram realizadas com uso do programa SAS versão 9.2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Concentrações de fósforo no solo

Para as concentrações de P extraído pela solução de Mehlich-1 (P-M1), houve interação entre fontes e doses de P nas camadas de 0-5, 0-10 e 0-20 cm (**Tabela 1**) e as concentrações de P-M1 aumentaram linearmente devido ao uso do SFT, FNR e TFM nessas camadas. No entanto, o incremento foi maior mediante o uso do FNR e, no caso do SFT e TFM, os incrementos foram similares entre si (**Figura 1a**). Isso evidenciou a alta capacidade de extração de P ligado ao cálcio (Ca) pelo extrator M1 (Silva e Raij, 1999), que superestimou as concentrações do P disponível (Resende et al., 2006). Tem sido observado que o pH da solução (em torno de 2,0) é inadequado para a solubilização de fosfatos de ferro (Fe) e alumínio (Al) e favorável para a extração de fosfatos de Ca, mesmo em formas não lábeis (Santos e Kliemann, 2005).

Tabela 1 – Valores de F para o fósforo disponível por diferentes extratores, em diferentes camadas do solo.

Camada	Varição	P-M1 ⁽¹⁾	P-RTI ⁽²⁾	P-MM ⁽³⁾
0-5 cm	Fonte (F)	46,79**	1,00 ^{NS}	5,73**
	Dose (D)	132,26**	27,00**	10,86**
	F vs D	11,90**	1,05 ^{NS}	6,24**
0-10 cm	Fonte	47,38**	0,42 ^{NS}	2,26 ^{NS}
	Dose	94,45**	5,93**	2,25 ^{NS}
	F vs D	7,95**	0,37 ^{NS}	2,09 ^{NS}
0-20 cm	Fonte	43,05**	0,22 ^{NS}	4,44**
	Dose	87,30**	4,76**	5,36**
	F vs D	7,26**	0,07 ^{NS}	5,15**

⁽¹⁾P-M1: Fósforo extraído pela solução de Mehlich-1. ⁽²⁾P-RTI: Fósforo extraído pelo método da Resina trocadora de íons.

⁽³⁾Fósforo extraído pela solução de Morgan modificada. **P<0,01 e NS: não significativo.

Não houve interação entre fontes e doses de P sobre a disponibilidade deste nutriente extraído pelo método da resina trocadora de íons (P-RTI), em todas as camadas de solo avaliadas (**Tabela 1**). Houve aumento quadrático das concentrações de P-RTI, devido ao uso de doses de P₂O₅, nas

camadas de 0-5 ($\hat{y} = 20,03 + 0,3825x - 0,0015x^2$, $R^2 = 0,99^{**}$); 0-10 ($\hat{y} = 19,129 + 0,126x - 0,0005x^2$, $R^2 = 0,87^{**}$); e 0-20 cm ($\hat{y} = 14,069 + 0,0756x - 0,0003x^2$, $R^2 = 0,95^{**}$).

No entanto, as fontes de P não influenciaram as concentrações de P-RTI no solo (**Figura 1b**). A RTI tem sido pouco afetada por resíduos de P ligado ao Ca no solo (fato pertinente quando o solo recebe FNR), devido ao efeito de tamponamento da suspensão em pH pouco abaixo da neutralidade e à presença de íons bicarbonato (Schlindwein e Gianello, 2008).

Para o P extraído pela solução de Morgan modificada (P-MM), houve interação entre fontes e doses nas camadas de 0-5 e 0-20 cm (**Tabela 1**). Para a camada de 0-10 cm não houve efeito dos tratamentos sobre a disponibilidade de P-MM. As concentrações de P-MM aumentaram linearmente com o uso de doses de SFT e TFM nas camadas de 0-5 e 0-20 cm, mas o extrator não foi capaz de detectar o incremento de P no solo proveniente do FNR (Arad). Houve ação mais moderada do ácido acético sobre a solubilização do fosfato de Arad. Todavia, a solução de MM extraiu maior quantidade de P nessas camadas quando o solo foi tratado com TFM (**Figura 1c**). Isso pode ser devido ao fato de o TFM possuir alta solubilidade em ácido cítrico. Além disso, certamente os fosfatos de Fe e Al não foram solubilizados, devido ao pH (4,8) da solução, resultando em baixas concentrações de P-MM em todos os tratamentos (Cabalceta e Cordero, 1994).

De modo geral, as concentrações de P disponível no solo após 36 meses de estudo, foram observadas na seguinte ordem: RTI>M1>MM.

Correlações entre o fósforo extraído e os atributos do milho

Os valores de r foram classificados em cinco faixas, conforme Gujarati (2006): (i) $0,00 < r < 0,19$: muito fraca; (ii) $0,20 < r < 0,39$: fraca; (iii) $0,40 < r < 0,69$: moderada; (iv) $0,70 < r < 0,89$: forte; (v) $0,90 < r < 1,00$: muito forte.

Os atributos de P-MS e P-Ex do milho correlacionam-se positivamente com as concentrações de P-M1 e P-RTI nas camadas de 0-5, 0-10 e 0-20 cm, mediante a aplicação das três fontes fosfatadas (SFT, FNR e TFM) (**Tabela 2**). Quanto às concentrações de P-MM, essas não se correlacionaram com nenhum dos atributos de planta de milho (**Tabela 2**), devido à sua baixa capacidade de extração de P do solo (**Figura 1c**), indicando a ineficiência do extrator para o sistema.

Foram observadas correlações fortes entre o P-MS e o P-Ex com o P disponível (P-M1 e P-RTI), nos tratamentos que receberam SFT (**Tabela 2**).

Esses resultados indicam a equivalência dos procedimentos laboratoriais de M1 e RTI para avaliação do P disponível em solo que recebeu aplicação de fonte fosfatada de alta solubilidade em água (Santos e Kliemann, 2005).

Para os tratamentos com FNR e TFM, os atributos P-MS e P-Ex se correlacionaram fortemente apenas com o P-RTI, nas camadas de 0-5 e 0-20 cm (**Tabela 2**). Isso mostra a superioridade da RTI em avaliar o P biológico, inclusive em camadas mais profundas (até 20 cm), quando adicionadas fontes insolúveis em água no solo (Schlindwein e Gianello, 2008).

Normalmente não foi verificada diferença da faixa de interpretação dos valores de r e a concentração do P-M1 e P-RTI entre as camadas de 0-5, 0-10 ou 0-20 cm. Isso indica que, o fracionamento da amostragem de solos em camadas de 0-10 cm, conforme a Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004) e de 0-5 e 5-20 cm, conforme o Instituto Agrônomo do Paraná (1996), não necessariamente implicaria em melhores correlações entre o P-M1 e P-RTI e os atributos do milho, mediante aplicação superficial (em área total) de fosfatos (solúveis e insolúveis) na ILP em PD.

CONCLUSÕES

A eficiência dos extratores em sistema de ILP em PD, para as plantas de milho após 36 meses de estudo, pode ser classificada na seguinte ordem: (i) nos tratamentos com o uso de SFT: RTI \cong M1>MM; (ii) nos tratamentos com aplicação de FNR e TFM: RTI>M1>MM.

AGRADECIMENTOS

Às instituições: CNPq, CAPES, Fundação Araucária, IPNI, Fundação ABC e Yoorin Fertilizantes.

REFERÊNCIAS

- CABALCETA, G.; CORDERO, A. Níveis críticos de fósforo em Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomia Costarricense*, 18:147-161, 1994.
- CARVALHO, P. C. F., ANGHINONI, I., MORAES, A.; et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88:259-273, 2010.
- GUJARATI, D. *Econometria básica*. 4 ed. Rio de Janeiro, Elsevier, 2006. 784p.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). Amostragem de solo para análise química: plantio

direto e convencional, culturas perenes, várzeas, pastagens e capineiras. Londrina, 1996. 28p.

MAGDOFF, F.R.; HRYSHKO, C.; JOKELA, W.E.; et al. Comparison of phosphorus soil test extractants for plant availability and environmental assessment. Soil Science Society of America Journal, 63:999-1006, 1999.

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

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

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; et al. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina: IAPAR, 1992. 38p.

RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A.; SILVA, N.M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 17:547-566, 1986.

RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; et al. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 30:453-466, 2006.

SANTOS, E.A.; KLIEMANN, H.J. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos de cerrado e sua avaliação por extratores químicos. Pesquisa Agropecuária Tropical, 35:139-146, 2005.

SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:2037-2049, 2008.

SILVA, F.C.; RAIJ, B van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 34:267-288, 1999.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10 ed., Porto Alegre: SBCS, 2004. 400p.

Tabela 2 – Coeficientes de correlação entre as concentrações de fósforo disponível por diferentes extratores e camadas distintas de solo, e os atributos do milho.

Camada (cm)	P-M1 ⁽¹⁾			P-RTI ⁽²⁾			P-MM ⁽³⁾		
	SFT ⁽⁴⁾	FNR ⁽⁵⁾	TFM ⁽⁶⁾	SFT	FNR	TFM	SFT	FNR	TFM
<i>Fósforo acumulado na massa seca do milho</i>									
0-5	0,76**	0,62**	0,68**	0,79**	0,74**	0,75**	0,26 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,31 ^{NS}
0-10	0,74**	0,63**	0,66**	0,75**	0,68**	0,69**	0,20 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,30 ^{NS}
0-20	0,73**	0,60**	0,64**	0,77**	0,72**	0,73**	0,23 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,25 ^{NS}
<i>Fósforo exportado nos grãos de milho</i>									
0-5	0,72**	0,61**	0,66**	0,76**	0,71**	0,73**	0,28 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,34 ^{NS}
0-10	0,72**	0,62**	0,66**	0,73**	0,68**	0,69**	0,16 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,28 ^{NS}
0-20	0,71**	0,61**	0,62**	0,76**	0,70**	0,73**	0,17 ^{NS}	0,09 ^{NS}	0,27 ^{NS}

⁽¹⁾P-M1: Fósforo extraído pela solução de Mehlich-1. ⁽²⁾P-RTI: Fósforo extraído pelo método da resina trocadora de íons. ⁽³⁾Fósforo extraído pela solução de Morgan modificada. ⁽⁴⁾SFT: Superfosfato triplo. ⁽⁵⁾FNR: Fosfato natural reativo. ⁽⁶⁾TFM: Termofosfato magnésiano. **P<0,01 e NS: não significativo.

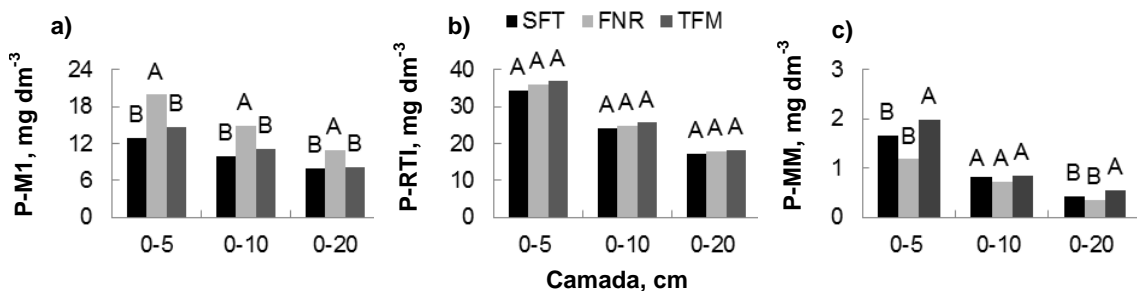


Figura 1 – Efeito de fontes em camadas do solo sobre a disponibilidade do fósforo extraído pelo método de a) Mehlich-1 (P-M1), b) Resina trocadora de íons (P-RTI) e c) Morgan modificado (P-MM). Superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo (FNR) e termofosfato magnésiano (TFM). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$), para cada camada.