

DIVISÃO 3 - USO E MANEJO DO SOLO

Comissão 3.1 - Fertilidade do solo e nutrição de plantas

ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA ALTA PRODUTIVIDADE DE SOJA, MILHO E CEREAIS DE INVERNO CULTIVADOS EM ROTAÇÃO EM LATOSSOLOS EM PLANTIO DIRETO NO CENTRO-SUL DO PARANÁ

Renan Costa Beber Vieira⁽¹⁾, Sandra Mara Vieira Fontoura⁽²⁾, Cimélio Bayer^{(3)*}, Renato Paulo de Moraes⁽²⁾ e Eduardo Carniel⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽²⁾ Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, Guarapuava, Paraná, Brasil.

⁽³⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽⁴⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

* Autor correspondente.

E-mail: cimelio.bayer@ufrgs.br

RESUMO

O Estado do Paraná não dispõe de um sistema de recomendação de adubação para rotação de culturas em plantio direto (PD). Em razão disso, utiliza indicações geradas para culturas individuais há mais de 30 anos e em preparo convencional. Este estudo teve como objetivo consolidar a calibração de P e avaliar a resposta das culturas à adubação fosfatada, visando à proposição de um sistema de indicações técnicas para a adubação fosfatada das culturas da soja, do milho, do trigo e da cevada cultivadas em sistema de rotação em Latossolos com longo histórico de PD (>30 anos) na região centro-sul do Paraná, que se caracteriza por possuir alto potencial produtivo. Três experimentos de calibração foram conduzidos de 2008 a 2013 e consistiram na criação de níveis de P pela aplicação de doses a lanço de até 640 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Quarenta e quatro experimentos de resposta a P foram conduzidos entre as safras de 2011 a 2012/13, tendo como foco avaliar a resposta das culturas a P em solos com distinta disponibilidade do nutriente. Os rendimentos relativos [RR = (rendimento sem P/rendimento máximo) × 100] das culturas e os teores de P no solo (Mehlich-1) foram relacionados, obtendo-se os teores críticos e as classes de disponibilidade de P no solo. Para a estimativa das doses nas classes de disponibilidade Baixa e Média, foram utilizadas as curvas de resposta à adubação de P, seguindo a filosofia de suficiência

Recebido para publicação em 29 de julho de 2014 e aprovado em 12 de janeiro de 2015.

DOI: 10.1590/01000683rbc20140463

(adubação de cultura). Nas classes de disponibilidade Alta e Muito Alta, as doses foram com base na exportação pelos grãos. Os cereais de inverno se evidenciaram mais exigentes e determinaram o teor crítico de P de 8 mg dm^{-3} para a rotação de culturas, considerando a camada de 0-20 cm. As doses de P indicadas para soja, milho, trigo e cevada em solos em PD de longa duração são superiores às de adubação atualmente indicadas no PR, o que, ao menos em parte, justificam-se pelas altas produtividades das culturas e alta capacidade de retenção de P dos solos da região. Embora adotada a filosofia de suficiência/adubação de cultura para a indicação das doses de adubação fosfatada em solos abaixo do teor crítico, estima-se que as doses estipuladas para as culturas elevem o teor de P no solo ao teor crítico após um ciclo da rotação de culturas (três anos).

Palavras-chave: calibração, teor crítico, fósforo, Mehlich-1.

ABSTRACT: PHOSPHORUS FERTILIZATION FOR HIGH YIELD OF SOYBEAN, MAIZE, AND WINTER CEREAL CROPS IN ROTATION IN OXISOLS UNDER LONG-TERM NO-TILL IN THE SOUTH CENTRAL REGION OF PARANA, BRAZIL

Although the State of Parana, Brazil, has adopted crop rotation and no-till (NT) systems, fertilizer application is still based on recommendations developed more than 30 years ago for monocropping under conventional tillage because fertilizer recommendations developed specifically for crop rotation under NT are lacking. The objective of our study was to consolidate P calibration and evaluate crop responses to P fertilization so as to propose a system of technical recommendations for P fertilization for soybean, maize, wheat, and barley grown in a crop rotation system in Oxisols under long-term (>30 years) NT systems in the high yield potential South-Central region of Parana. Three calibration trials were conducted from 2008 to 2013, consisting of P broadcast application rates of up to $640 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$. Forty-four P fertilization trials were carried out over the 2011-2012/13 growing seasons to evaluate yield response to P fertilization rates in Oxisols with different levels of P availability. Relative crop yield [RR = (yield without P / maximum yield) × 100] and soil P availability (Mehlich-1) were compared to obtain P critical levels and generate soil P availability classes based on crop response. For soils in the Low and Medium availability classes, recommended P fertilizer application rates were based on the yield response curve following the nutrient sufficiency approach. For soils in the High and Very High availability classes, P fertilizer recommendations were based on P removal through grain harvest. The winter cereal crops were more demanding to achieve maximum yields - the soil critical P level for the crop rotation system was determined at 8 mg dm^{-3} based on the requirement of these crops, considering the 0-20 cm soil layer. The recommended P fertilization rates for soybean, maize, wheat, and barley in Oxisols under long-term NT developed in our study are higher than the current P fertilization rates used in Parana, which is explained in part by the high crop yields and high P adsorption capacity of soils in the region. Although the nutrient sufficiency approach was used to determine P fertilization rates in the soils below the critical level, it is estimated that the P rates recommended for the crops will raise soil P availability above the critical level after a full crop-rotation cycle (3 years).

Keywords: calibration, critical level, phosphorus, Mehlich-1.

INTRODUÇÃO

O Estado do Paraná destaca-se no cenário brasileiro de produção de grãos, ocupando a posição de segundo maior produtor de milho (15,4 milhões de toneladas) e soja (14,7 milhões de toneladas) (Conab, 2014). Entre os 7,6 milhões de hectares cultivados anualmente com milho e soja no Paraná, aproximadamente 90 % são conduzidos em plantio direto (PD) (Agrosoft, 2009). A adoção do PD em substituição ao preparo convencional promove alterações na dinâmica do P no solo, apresentando teores analíticos de P maiores do que solos manejados com lavração e gradagens, sob as mesmas condições de manejo da fertilidade (Ciotta et al., 2002; Albuquerque et al., 2005; Costa et al., 2009).

Como consequência, o teor crítico de P para as culturas em solos em PD pode ser mais elevado (Schlindwein e Gianello, 2008), em parte como reflexo da menor adsorção de P pela fração mineral do solo (Sousa e Volkweiss, 1987; Eltz et al., 1989; Andrade et al., 2003; Guppy et al., 2005; Anghinoni, 2007). Portanto, as modificações que ocorrem na dinâmica do P e dos demais nutrientes em solos em PD podem se refletirem numa necessidade de recalibração das indicações técnicas de adubação para as culturas (Schlindwein e Gianello, 2004).

Por sua vez, no Estado do Paraná, o manejo de adubação fosfatada é com base em indicações técnicas isoladas para cada cultura (Embrapa, 2011a,b; 2013), que foram elaboradas há mais de 30 anos e em sistema de preparo convencional (Ocepar, 1987;

Lantmann et al., 1996; Embrapa, 1999), situação em que a produtividade das culturas era bem inferior às verificadas atualmente na região centro-sul do PR [3,8 Mg ha⁻¹ de soja e 11,8 Mg ha⁻¹ de milho, com base em Agrária (2012)]. Alternativamente a essas indicações técnicas, é usual a utilização de recomendações de outros estados, como RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004) e SP (Raij et al., 1997), que são sistemas de adubação também gerados em preparo convencional e adaptados ao sistema PD, embora elaborados com base em resultados em condições edafo-climáticas distintas num maior ou menor grau das verificadas no Paraná. Portanto, considerando a importância da produção agrícola paranaense e visando obter maiores produtividades estaduais e maior eficiência dos fertilizantes aplicados, é premente a elaboração de um sistema de indicações técnicas de adubação fosfatada para as principais culturas cultivadas em rotação em solos com longo histórico de PD.

Os objetivos deste estudo foram consolidar a calibração de P e avaliar a resposta das culturas à adubação fosfatada, visando à proposição de um sistema de indicações técnicas para a adubação fosfatada das culturas de soja, milho, trigo e cevada cultivadas em sistema de rotação em Latossolos cultivados por mais de 30 anos em PD na região centro-sul do Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

Região de estudo e experimentos conduzidos

O estudo foi desenvolvido numa parceria entre o Departamento de Solos da UFRGS e a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), da Cooperativa Agrária Agroindustrial. Para atingir os objetivos propostos, 47 experimentos foram conduzidos em diferentes municípios na Região centro-sul do Paraná, todos localizados na área de abrangência da Cooperativa Agrária. Todas as áreas experimentais foram localizadas sobre Latossolos, com teores médios de argila superiores a 600 g kg⁻¹ e de matéria orgânica de 54 g kg⁻¹.

Três experimentos de calibração com doses de P foram instalados em 2008, nos municípios de Guarapuava, Pinhão e Cândói. Em Guarapuava, o experimento foi instalado na área experimental pertencente à FAPA (Colônia Vitória, Distrito de Entre Rios), enquanto em Pinhão e Cândói os experimentos foram instalados em áreas de cooperados. Esses experimentos seguiram o delineamento de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas principais (9,6 × 10 m) foram adubadas a lanço e sem incorporação, com doses de superfosfato triplo (0, 80, 160, 320 e 640 kg ha⁻¹ de P₂O₅) antecedendo a semeadura das culturas no inverno de 2008, o que visou a criação de níveis de P. As parcelas principais

foram divididas em duas subparcelas (4,8 × 10 m) no verão 2008/09, mantendo-se uma subparcela sem reaplicação de P e a outra subparcela com reaplicação de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a cada safra. Aos resultados dos experimentos de calibração de P dos anos de 2008 e 2009, que foram previamente analisados e interpretados por Vieira et al. (2013), foram agregados os resultados referentes ao período 2010-2013, visando à consolidação dos teores críticos de P propostos anteriormente.

Quarenta e quatro experimentos de resposta a P foram conduzidos do inverno de 2011 à safra de verão 2012/13, totalizando 11 experimentos com soja, 10 com milho, 12 com trigo e 11 com cevada. Todos os experimentos foram conduzidos em propriedades rurais de cooperados, envolvendo sete municípios na região de abrangência da cooperativa agrária. As áreas foram selecionadas a partir dos teores de P disponível (Mehlich-1), a partir do banco de análises de solo dessa cooperativa, com o objetivo de abranger classes de disponibilidade “Baixa”, “Média”, “Alta” e “Muito Alta”, tendo como base os resultados obtidos previamente (Vieira et al., 2010). Os experimentos de resposta a P seguiram o delineamento de blocos casualizados com três repetições, sendo aplicadas doses de 0, 30, 60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato triplo na linha de semeadura das culturas. Para os experimentos com soja e milho, as parcelas foram dimensionadas com quatro linhas de plantas com 5,0 m de comprimento, adotando o espaçamento de 0,40 m para soja e 0,80 m para milho. Para trigo e cevada, utilizaram-se seis linhas espaçadas de 0,17 m e 5,0 m de comprimento.

O manejo da adubação dos demais nutrientes em todos os experimentos foi realizado conforme as indicações técnicas para as culturas em cada safra (Fontoura e Bayer, 2009; Embrapa, 2011a,b; Embrapa, 2013).

Amostragem do solo e avaliações realizadas

Amostras de solo das camadas de 0-10 e 0-20 cm foram coletadas anualmente, no mês de maio, nos experimentos de calibração de P. Nos experimentos de resposta a P, o solo foi amostrado nas mesmas camadas, anteriormente à instalação dos experimentos e do plantio das culturas. A amostragem foi realizada com pá de corte, utilizando o método de coleta transversal à linha de semeadura (CQFS-RS/SC, 2004). Os teores de P disponíveis no solo foram determinados pelo método Mehlich-1 (Tedesco et al., 1995).

Nos experimentos de calibração, a avaliação do rendimento foi realizada a partir da colheita de uma área útil de 30 m² para os cereais de inverno e de 20 m² para as culturas de verão, enquanto nos experimentos de resposta à adubação avaliou-se uma área útil de 2,7 m² para os cereais de inverno; 3,2 m², para a soja; e de 6,4 m², para o milho. Os resultados de rendimento de grãos foram expressos em 13 % de umidade.

Por envolver diferentes safras, culturas e locais, os resultados de rendimento foram expressos como rendimento relativo (RR) de grãos, que foi calculado em relação ao rendimento máximo (RR = 100) obtido por safra e local para as diferentes culturas, a partir da equação 1.

$$RR (\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem aplicação de P}}{\text{Rendimento máximo}} \times 100 \quad \text{Eq.1}$$

Nos experimentos de resposta à adubação, o rendimento máximo foi alcançado a partir das equações ajustadas dos rendimentos das culturas em relação às doses de P aplicadas e consistiu no rendimento obtido na dose de P de máxima eficiência técnica (MET).

Nos casos em que houve ajuste de equações quadráticas, o rendimento máximo foi aquele calculado com a dose de P, em que a primeira derivada da equação quadrática é zero. Nos casos em que houve ajuste de equações lineares com respostas positivas à aplicação do fertilizante, o valor de rendimento máximo foi aquele calculado a partir da equação ajustada e tendo em consideração a maior dose de P aplicada. Nos casos de ajuste de equações lineares com resposta negativa, o rendimento máximo foi aquele correspondente à dose zero (sem aplicação) do nutriente (intercepto da equação de regressão).

Ajuste da curva de calibração, teor crítico e classes de disponibilidade

A curva de calibração foi obtida a partir da relação entre rendimento relativo de grãos das distintas culturas nos tratamentos sem adição do nutriente e os respectivos teores de P disponível (Mehlich-1) no solo, determinados em amostras de solo coletadas anteriormente à semeadura da cultura em avaliação. Para consolidar a curva de calibração ajustada previamente por Vieira et al. (2013) com os resultados dos experimentos de calibração de 2008 e 2009, neste estudo foram considerados os resultados do decorrer dos cinco anos (2008-2012) de condução dos três experimentos de calibração e mais os resultados dos 44 experimentos de resposta à adubação.

Cabe destacar que a cultura da aveia-branca foi incluída apenas no ajuste da curva de calibração e dos teores críticos, não tendo essa sido incluída nos experimentos de resposta à adubação para avaliação de retorno econômico e indicação de doses. Isso se deve porque essa cultura tem sido pouco cultivada pelos produtores nos últimos anos, em razão do menor retorno econômico em relação às culturas de trigo e cevada.

A equação utilizada para o ajuste dos dados foi a equação de Mitscherlich (Equação 2), que é uma equação exponencial forçada a alcançar o rendimento relativo de 100 % e que tem sido amplamente utilizada em estudos de calibração

(Cubilla et al., 2007; Villalba, 2008; Wendling et al., 2008; Schindwein et al., 2011):

$$y = A (1 - 10^{-bx}) \quad \text{Eq.2}$$

em que y representa o rendimento relativo (RR) de grãos; A, o rendimento máximo (RR = 100); b, o coeficiente de eficácia do nutriente; e x, o teor de P disponível no solo (mg dm⁻³, Mehlich-1). Para o ajuste da curva de calibração, foi utilizado o software *Table Curve 2D v5*.

O teor crítico de P no solo foi determinado a partir da curva de calibração ajustada e consistiu no teor de P disponível, em que foi alcançado o RR de grãos de 90 % do rendimento máximo (RR = 100), procedimento similar ao adotado no Programa de adubação do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004) e que se justifica pelo fato de que normalmente os rendimentos em que se alcança a máxima eficiência econômica (MEE) ocorrem em aproximadamente 90 % do rendimento máximo.

A partir da definição do teor crítico de P, foram separadas classes de disponibilidade de P no solo, onde a metade do teor crítico delimitou as classes de disponibilidade “Baixa” e “Média”, e o dobro do teor crítico delimitou as classes de disponibilidade “Alta” e “Muito Alta”. Essas respectivas classes de disponibilidade corresponderam às faixas de RR de grãos <68 % (classe Baixa), 68 a 90 % (classe Média), 90 a 99 % (classe Alta) e >99 % (classe Muito Alta). A probabilidade de retorno econômico à aplicação de P em cada uma das classes de disponibilidade foi mensurada pela análise realizada, considerando a aplicação de 50 kg ha⁻¹ P₂O₅, a resposta das culturas e os respectivos preços médios de grãos e do superfosfato triplo nos últimos cinco anos (outubro de 2008 a setembro de 2013). O preço médio de grãos de soja, milho, trigo e cevada foi, em R\$ por tonelada, 789,25; 355,25; 522,49 e 496,00, respectivamente, no período de outubro de 2008 a setembro de 2013; para o superfosfato triplo, pagou-se R\$ 761,00 por tonelada (R\$ 1.654,00 t⁻¹ de P₂O₅) (Agrolink, 2013; Mundi, 2013). A análise de retorno econômico foi também realizada considerando uma cotação do preço médio de grãos 30 % inferior.

Respostas das culturas à adubação fosfatada e às doses indicadas

Os experimentos de resposta à adubação foram enquadrados conforme a classe de disponibilidade, levando em consideração o teor de P disponível no solo na camada de 0-20 cm de profundidade. Em cada classe de disponibilidade, calculou-se a média do rendimento de grão obtida em cada dose de P nos diferentes experimentos avaliados, estimando-se o incremento médio de grãos (kg ha⁻¹) em relação ao tratamento sem fertilizante fosfatado. Os valores de incremento de grãos com as doses de P foram ajustados usando equações polinomiais para cada cultura, nas diferentes classes de disponibilidade

de P no solo. A partir desse ajuste, obteve-se a dose de MEE e a dose de MET. Para a estimativa da dose de MEE, utilizaram-se o preço médio de grãos e o do superfosfato triplo nos últimos cinco anos (outubro de 2008 a setembro de 2013). A MET consistiu no rendimento máximo estimado pela equação ajustada, considerando a dose de P em que a primeira derivada da equação quadrática é zero.

A definição das doses de P a serem aplicadas nas culturas combinou aspectos de duas filosofias de recomendação de adubação: a filosofia de adubação da cultura para obter máximo retorno econômico; e a de construção e manutenção da fertilidade. Dessa forma, em solos cuja disponibilidade de P se enquadrou nas classes Baixa ou Média, as doses de P foram definidas pelo máximo retorno econômico, semelhantemente ao realizado nas recomendações do Estado de SP (Raij et al., 1997; Raij, 2011). Como essas doses são superiores à exportação de P pelos grãos, estima-se aumento gradual da disponibilidade de P no solo em direção à classe de disponibilidade Alta. A opção pelo critério de MEE deveu-se ao fato de que os solos da região apresentam alta capacidade de adsorção de P, tendo necessidade de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para elevar 1 mg dm⁻³ de P no solo da camada de 0-20 cm (Vieira, 2010), e essa característica determinaria a aplicação de doses muito altas de P e, portanto, um investimento monetário também elevado, se adotada a filosofia de adubação corretiva para elevar o teor de P no solo ao teor crítico. Por sua vez, para os solos que se encontram na classe de disponibilidade Alta, a adubação de manutenção objetivou manter a disponibilidade nessa classe, pela adição de doses de reposição do nutriente (exportação no grão) acrescidas de 20 %, relativo às possíveis perdas por adsorção e erosão (CQFS-RS/SC, 2004); na classe de disponibilidade Muito Alta, as doses de P consistiram na reposição das quantidades de P exportadas na colheita de grãos. Na definição das doses de reposição, considerou-se a exportação de 14, 8, 10 e 10 kg de P₂O₅ por toneladas de grãos produzidos de soja, milho, trigo e cevada, respectivamente (CQFS-RS/SC, 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O rendimento das culturas nos três experimentos de calibração de P confirma o alto potencial produtivo da região (Quadro 1), tendo sido alcançadas produções de 5,4 Mg ha⁻¹ de soja, 15,7 Mg ha⁻¹ de milho, 4,5 Mg ha⁻¹ de trigo e 6,0 Mg ha⁻¹ de cevada, que são muito superiores aos rendimentos médios dessas culturas no cenário brasileiro e paranaense (Conab, 2014).

Entre os três experimentos, os menores rendimentos de grãos e valores de RR sem a adição de P foram observados nos experimentos em Cândói e Pinhão, com as culturas de trigo, cevada e aveia-branca. Esses resultados justificam-se pelos menores teores de P disponível nos solos dos referidos locais, bem como pela maior exigência de P dessas espécies (Embrapa, 2007; 2011a; b).

Os rendimentos relativos das culturas nos experimentos de resposta às doses de P são apresentados nos quadros 2 e 3. O teor de P disponível no solo nos 44 experimentos de resposta à aplicação de P variou de 1,2 a 18,6 mg dm⁻³ (0-20 cm), contemplando ampla faixa de disponibilidade de P no solo. Semelhante ao observado nos três experimentos de calibração, os menores valores de RR corresponderam a baixos teores de P no solo. Os solos com menor disponibilidade de P também proporcionaram os maiores coeficientes de determinação (R²) da equação ajustada entre o rendimento de grãos e as doses de P aplicadas (Quadros 2 e 3).

As curvas de calibração entre o rendimento e os teores de P no solo, as equações de ajuste e os teores críticos de P, determinados para as camadas de 0-10 e 0-20 cm com o extrator Mehlich-1, são apresentados na figura 1. As curvas de calibração foram ajustadas para grupos de culturas com comportamento similar de resposta do rendimento de grãos em relação à variação do teor de P disponível no solo. Assim, considerando-se a camada de 0-20 cm, obteve-se um teor crítico de P de 8,2 mg dm⁻³ para os cereais de inverno (trigo, cevada e aveia-

Quadro 1. Faixas de rendimento de grãos e rendimentos relativos de soja, milho, trigo, cevada e aveia-branca e teor de P disponível (Mehlich-1) na camada de 0-20 cm nos solos dos experimentos de calibração em função das diferentes doses de P₂O₅ aplicadas em 2008

Cultura	Guarapuava			Pinhão			Cândói		
	Rend. ⁽¹⁾	RR ⁽²⁾	P-solo	Rend.	RR	P-solo	Rend.	RR	P-solo
	Mg ha ⁻¹	%	mg dm ⁻³	Mg ha ⁻¹	%	mg dm ⁻³	Mg ha ⁻¹	%	mg dm ⁻³
Soja	3,5-5,4	84-100	8,9-19,9	3,3-4,4	80-99	5,4-10,4	3,2-4,7	69-97	3,7-10,6
Milho	14,6-15,0	97-99	10,4-19,1	12,8-14,9	87-92	6,8-10,4	12,8-15,7	81-93	3,7-9,6
Trigo	-	-	-	3,3-4,5	73-86	6,8-12,2	-	-	-
Cevada	4,7-5,4	88-97	9,7-19,3	4,6-5,7	80-98	6,0-10,4	2,5-6,0	42-84	3,7-9,6
Aveia	-	-	-	-	-	-	1,7-2,9	61-82	3,8-7,8

⁽¹⁾ Menor e maior rendimento de grãos da cultura no experimento; ⁽²⁾ Menor e maior rendimento relativo da cultura nos tratamentos sem reaplicação; RR: percentual do rendimento de cada tratamento em relação ao máximo obtido no experimento em cada safra.

Quadro 2. Teores de fósforo disponível em duas profundidades do solo sem adubação, equações de ajuste dos rendimentos relativos de soja e milho em função das doses de P, em kg ha⁻¹ de P₂O₅, rendimento relativo (RR) do tratamento sem adubação em relação ao rendimento de máxima eficiência técnica (MET), em diferentes safras e locais

Local	P disponível		Saфра	Equação	R ²	RR	MET
	0-20 cm	0-10 cm					
	mg dm ⁻³					%	kg ha ⁻¹
Soja							
Candói	1,9	2,6	2011/12	$\hat{y} = 2.368 + 9,759 x - 0,0192 x^2$	0,96	66	3.608
Pinhão	5,7	8,6	2011/12	$\hat{y} = 2.639 + 3,925 x - 0,0076 x^2$	0,84	84	3.145
Murakami 1	5,8	14,6	2011/12	$\hat{y} = 3.637 + 5,563 x - 0,0134 x^2$	0,65	86	4.215
Roncador	6,8	4,5	2011/12	$\hat{y} = 3.314 + 3,834 x - 0,0104 x^2$	0,43	90	3.668
Murakami 2	8,1	13,0	2011/12	$\hat{y} = 4.727 - 0,899 x$	0,48	100	4.727
Guarapuava	18,6	16,5	2011/12	$\hat{y} = 4.671 - 3,345 x + 0,0121 x^2$	0,96	100	4.671
Jaster	6,9	10,4	2012/13	$\hat{y} = 4.541 + 5,050 x$	0,99	79	5.753
Murakami 3	7,6	11,5	2012/13	$\hat{y} = 5.493 + 5,590 x - 0,0173 x^2$	0,98	92	5.945
Roncador	9,5	8,4	2012/13	$\hat{y} = 2.696 + 5,106 x - 0,0096 x^2$	0,68	80	3.375
Murakami 4	10,9	15,7	2012/13	$\hat{y} = 2.802 + 2,043 x - 0,0025 x^2$	0,49	87	3.219
Guarapuava	12,0	14,5	2012/13	$\hat{y} = 5.541 + 0,5164 x$	0,27	98	5.665
Milho							
Roncador	4,4	4,4	2011/12	$\hat{y} = 10.572 + 30,830 x - 0,0832 x^2$	0,99	79	13.428
Pinhão	6,7	5,5	2011/12	$\hat{y} = 12.933 + 13,295 x - 0,03 x^2$	0,71	90	14.406
Murakami	9,1	11,4	2011/12	$\hat{y} = 14.522 + 11,902 x - 0,027 x^2$	0,77	92	15.834
Guarapuava	11,2	12,4	2011/12	$\hat{y} = 14.703 + 20,859 x - 0,0817 x^2$	0,99	92	16.034
Goioxim	3,2	5,2	2012/13	$\hat{y} = 11.791 + 27,445 x - 0,0815 x^2$	0,98	84	14.102
Candói	3,7	8,4	2012/13	$\hat{y} = 8.818 + 29,860 x - 0,0755 x^2$	0,87	75	11.770
Roncador	4,3	7,7	2012/13	$\hat{y} = 15.200 + 16,036 x - 0,0353 x^2$	0,95	89	17.021
Murakami	7,1	22,9	2012/13	$\hat{y} = 12.368 + 17,644 x - 0,0400 x^2$	0,98	86	14.314
Pinhão	7,7	9,6	2012/13	$\hat{y} = 13.590 + 14,995 x - 0,0313 x^2$	0,97	88	15.386
Guarapuava	11,3	21,5	2012/13	$\hat{y} = 14.306 + 15,117 x - 0,0425 x^2$	0,99	91	15.650

branca) e de 6,2 mg dm⁻³ para as culturas da soja e do milho. Por sua vez, considerando a camada de 0-10 cm, determinaram-se níveis críticos de 11,2 e 7,5 mg dm⁻³ para os cereais de inverno e culturas de verão, respectivamente, que foram 36 e 21 % maiores que os definidos para a camada de 0-20 cm. Cabe salientar que estudo conduzido anteriormente na mesma região evidenciou que a camada de 0-20 cm apresenta maior relação com o rendimento das culturas e com outros parâmetros nutricionais do que a camada de 0-10 cm em solos com longo histórico de adoção do sistema PD (Vieira, 2010). Essa maior adequação da camada de 0-20 cm como camada diagnóstica da fertilidade de solos em longo prazo em PD é corroborada pelos maiores coeficientes de determinação obtidos nas curvas de calibração ajustada para cereais de inverno e considerando conjuntamente todas as culturas (Figura 1). A curva de calibração foi ajustada também com todas as culturas, visando à avaliação e comparação com estudos de calibração que desconsideram esse critério de separação.

Os teores críticos obtidos foram similares aos valores sugeridos por Vieira et al. (2013). A maior divergência foi no teor crítico para os cereais de inverno (trigo, cevada e aveia branca), cujos valores foram 0,4 mg dm⁻³ (0-10 cm) e 0,7 mg dm⁻³ (0-20 cm), superiores aos determinados anteriormente (10,8 mg dm⁻³ para 0-10 cm e 7,5 mg dm⁻³ para 0-20 cm). Os maiores teores críticos determinados para os cereais de inverno decorrem da maior resposta dessas culturas ao P (Vitosh et al., 1995) e corroboram os resultados apresentados em Lantmann et al. (1996) em solos do Paraná. Inclusive, em razão dessa maior exigência, os cereais de inverno têm sido referência para a definição dos teores críticos de P nos estados americanos de Michigan e Ohio (Vitosh et al., 1995). Ao menos em parte, o maior teor crítico para cereais de inverno pode estar relacionado à menor disponibilidade hídrica, principalmente em agosto, na região centro-sul do Paraná, bem como as menores temperaturas, o que restringe a difusão do ânion fosfato no solo.

Quadro 3. Teores de fósforo disponível em duas profundidades do solo sem adubação, equações de ajuste dos rendimentos relativos de trigo e cevada em função das doses de P, em kg ha⁻¹ de P₂O₅, rendimento relativo (RR) do tratamento sem adubação em relação ao rendimento de máxima eficiência técnica (MET), em diferentes safras e locais

Local	P disponível		Safr	Equação	R ²	RR	MET
	0-20 cm	0-10 cm					
	mg dm ⁻³					%	kg ha ⁻¹
				Trigo			
Rodeio	1,2	2,0	2011	$\hat{y} = 1.436 + 10,427 x - 0,0268 x^2$	0,97	59	2.450
Santana	6,5	6,0	2011	$\hat{y} = 3.816 + 4,579 x - 0,0084 x^2$	0,95	86	4.440
Santa Clara	6,6	19,4	2011	$\hat{y} = 3.373 + 6,516 x - 0,0118 x^2$	0,98	79	4.272
Campo Bonito	6,7	8,4	2011	$\hat{y} = 4.529 + 5,676 x - 0,0135 x^2$	0,85	88	5.126
Santa Rita	8,0	17,2	2011	$\hat{y} = 4.441 + 12,622 x - 0,0319 x^2$	0,98	78	5.689
Guarapuava	13,2	19,3	2011	$\hat{y} = 4.041 + 3,330 x - 0,0075 x^2$	0,51	92	4.411
Pinhão 1	3,5	5,6	2012	$\hat{y} = 2.332 + 4,837 x - x^2$	0,90	72	3.261
Roncador	3,8	4,8	2012	$\hat{y} = 2.283 + 8,943 x - 0,0245 x^2$	0,91	74	3.099
Pinhão 2	4,1	8,6	2012	$\hat{y} = 2.791 + 3,704 x - 0,0091 x^2$	0,80	88	3.168
Murakami 1	9,5	10,4	2012	$\hat{y} = 2.666 + 3,156 x$	0,83	78	3.423
Murakami 2	10,9	13,3	2012	$\hat{y} = 2.085 + 7,269 x - 0,0159 x^2$	0,98	72	2.916
Guarapuava	10,9	41,6	2012	$\hat{y} = 3.851 + 1,548 x$	0,83	91	4.223
				Cevada			
Rodeio	1,2	2,0	2011	$\hat{y} = 574 + 15,969 x - 0,0353 x^2$	0,96	24	2.294
Santana	6,5	6,0	2011	$\hat{y} = 5.033 + 6,870 x - 0,0172 x^2$	0,84	88	5.541
Santa Clara	6,6	19,4	2011	$\hat{y} = 5.228 + 7,149 x - 0,0284 x^2$	0,96	92	5.570
Campo Bonito	6,7	8,4	2011	$\hat{y} = 5.128 + 13,473 x - 0,0328 x^2$	0,85	79	6.420
Santa Rita	8,0	17,2	2011	$\hat{y} = 3.235 + 2,522 x - 0,0095 x^2$	0,53	95	3.235
Guarapuava	13,2	19,3	2011	$\hat{y} = 5.029 + 0,264 x$	0,14	99	5.029
Pinhão 1	3,5	5,6	2012	$\hat{y} = 2.687 + 16,607 x - 0,0432 x^2$	0,98	63	4.283
Pinhão 2	4,1	8,6	2012	$\hat{y} = 2.474 + 6,701 x - 0,0198 x^2$	0,94	81	3.041
Murakami 1	9,5	10,4	2012	$\hat{y} = 3.345 + 5,426 x - 0,0141 x^2$	0,84	87	3.868
Murakami 2	10,9	13,3	2012	$\hat{y} = 2.199 + 8,683 x - 0,0349 x^2$	0,96	80	2.739
Guarapuava	10,9	41,6	2012	$\hat{y} = 4.570 + 9,137 x - 0,0332 x^2$	0,78	88	5.198

Nos Estados do RS e SC, os teores críticos de P são diferenciados apenas pela classe textural do solo, sendo único para todas as culturas (6 mg dm⁻³) e inferior aos valores obtidos nesse estudo para solos em PD com mais de 600 g kg⁻¹ de argila, na camada de 0-10 cm (CQFS-RS/SC, 2004). Entretanto, em pesquisa envolvendo solos em PD no RS com teores de argila superiores a 550 g kg⁻¹, Schlindwein e Gianello (2008) observaram teores críticos de P (10,5 mg dm⁻³ para a camada de 0-10 cm; e 7,6 mg dm⁻³, para a de 0-20 cm) muito semelhantes aos valores obtidos neste estudo.

Em comparação à atual indicação de adubação fosfatada utilizada no Estado do Paraná, o teor crítico de P para as culturas de trigo e cevada é um pouco superior ao teor de 9 mg dm⁻³ indicado para a camada de 0-10 cm em solos em PD (Embrapa, 2011a, 2013). Para a cultura da soja, considera-se atualmente no PR um teor crítico de 6 mg dm⁻³

(Embrapa, 2011b), que é com base em pesquisadas das décadas de 1980 e 1990 (Ocepar, 1987; Lantmann et al., 1996; Embrapa, 1999). Apesar de esse teor crítico ser idêntico ao observado para soja e milho na camada de 0-20 cm obtido neste estudo (Figura 1), nas indicações técnicas em vigor no PR indica-se que solos em PD sejam amostrados nas de 0-10 e 10-20 cm, embora não seja referido qual das camadas deva ser tomada como referência quanto ao teor de P disponível para definir a adubação fosfatada a ser realizada (Embrapa, 2011b).

Visando a delimitação das classes de disponibilidade de P, tomou-se como referência os teores críticos de 8 mg dm⁻³ no caso da amostragem da camada de 0-20 cm e de 11 mg dm⁻³, no caso da amostragem da camada de 0-10 cm. O ajuste dos teores críticos foi realizado para obter valores inteiros, facilitando a interpretação da disponibilidade de P

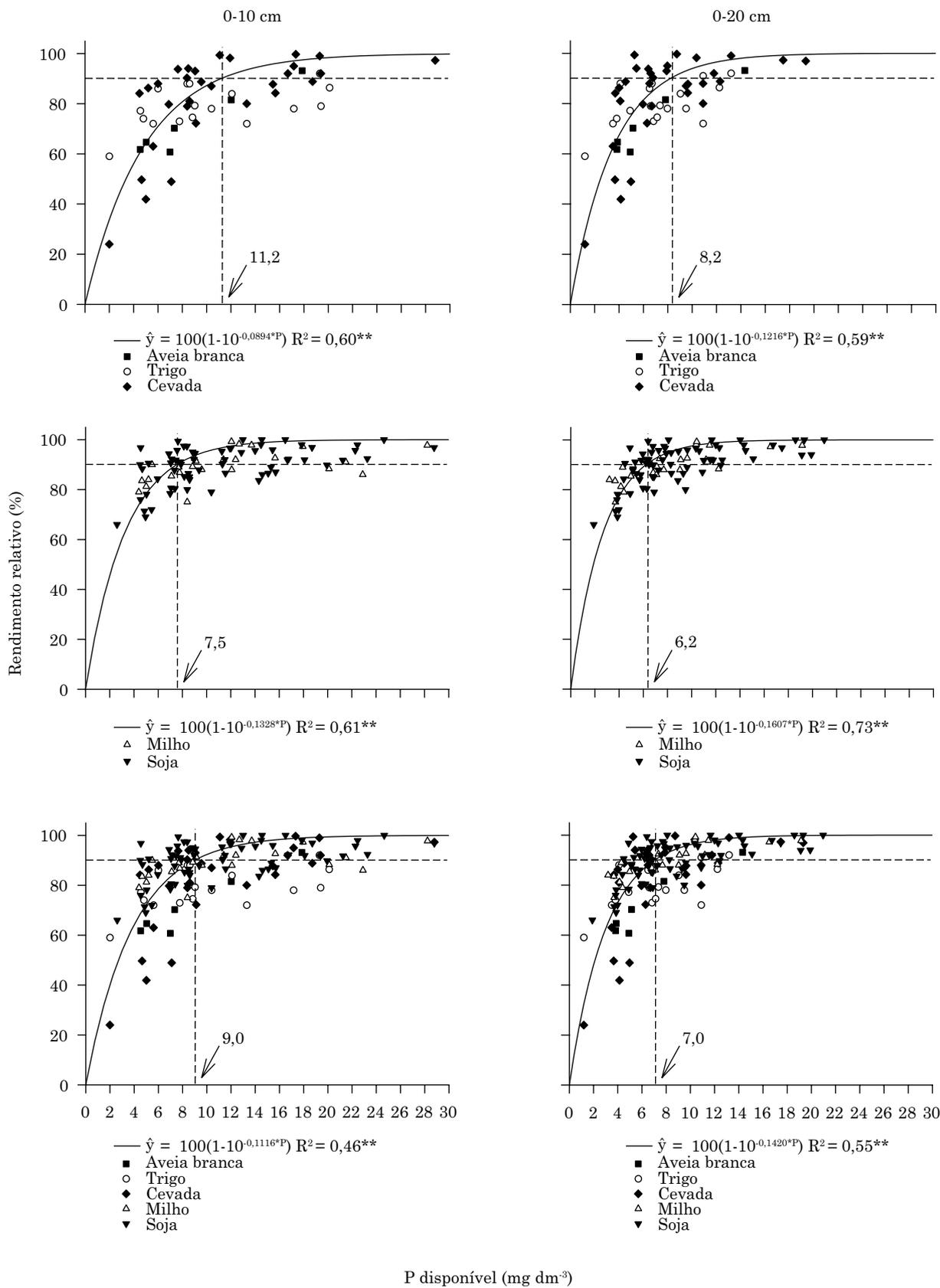


Figura 1. Teor crítico de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, para as culturas de trigo, cevada, aveia branca, soja e milho. ** significativo (p<0,01).

em faixas de teores e o estabelecimento das doses de fertilizante em cada classe. Assim, para a amostragem de 0-20 cm, a classe de disponibilidade de P Baixa abrangeu solos com teores de P inferiores a 4 mg dm^{-3} , a Média abarcou solos com teores de P na faixa de $4\text{-}8 \text{ mg dm}^{-3}$, enquanto as Alta e Muito Alta incorporou solos com teores de P entre $8,1\text{-}16$ e $>16 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente. Essa delimitação das classes de disponibilidade apresentou relação direta com a probabilidade de resposta das culturas à aplicação de P (Figura 2), o que corrobora a sua adequação. Acima do teor crítico, a probabilidade de retorno econômico com a aplicação de P é muito baixa ou nula, enquanto abaixo essa probabilidade aumenta à medida que o teor no solo se afasta do teor crítico.

Os maiores retornos econômicos foram observados nos solos na classe Baixa de P no solo, diminuindo com o aumento dos níveis de disponibilidade e sendo negativo na classe Muito Alta (Figura 2). Na condição atual de cotação de grãos, todos os experimentos apresentaram retorno econômico positivo à aplicação do fertilizante fosfatado em solo na classe Baixa e 95 % deles na classe Média. Nos solos enquadrados na classe Alta, a resposta positiva foi observada em 53 % dos casos, porém com menor retorno econômico, de R\$ 38,00 ha^{-1} . Comportamento similar do retorno econômico em relação à aplicação de P foi observado com a cotação de preços dos grãos 30 % inferior à média. Entretanto, o retorno econômico médio da adubação foi obviamente menor nessa condição, principalmente na classe Alta, que, apesar de 47 % dos experimentos apresentarem resposta positiva à aplicação de P, o retorno econômico médio com a aplicação de 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 foi de apenas R\$ 1,70 ha^{-1} .

Após obter os teores críticos e estabelecidas as faixas de disponibilidade a partir das curvas de calibração, os experimentos de resposta à adubação fosfatada foram enquadrados em suas respectivas classes de acordo como o teor de P disponível, tomando como referência a análise de solo da camada de 0-20 cm (Quadros 2 e 3). A camada de 0-20 cm foi utilizada como referência no enquadramento dos experimentos nas classes de fertilidade porque é a camada diagnóstica indicada para amostragem em solos com longo histórico (>25 anos) de adoção do plantio direto na região centro-sul do Paraná (Vieira, 2010), além de amplamente utilizada no restante do Estado.

Dessa forma, os experimentos de resposta à adubação de mesma cultura e na mesma classe de disponibilidade foram agrupados, obtendo uma curva de resposta média, em que se obteve o incremento médio no rendimento de grãos com as doses de P_2O_5 para cada cultura dentro de cada classe (Quadro 4).

Os maiores incrementos no rendimento de grãos ocorreram com as maiores doses de P_2O_5 nas áreas cujos solos apresentaram disponibilidade de P Baixa, aumentando o rendimento em 1.200 kg ha^{-1} , no caso da soja; 2.000 kg ha^{-1} , no caso do milho; 800 kg ha^{-1} , no trigo; e 1.700 kg ha^{-1} , na cevada. A aplicação de doses de P em solos com o teor de P na classe Alta também incrementou o rendimento de grãos de soja, milho, trigo e cevada, embora em menor magnitude do que verificado nas classes de Baixa e Média disponibilidades, não sendo economicamente viável apenas no caso da soja (Quadro 4).

O trigo e a soja foram as culturas que apresentaram menor incremento no rendimento de grãos por

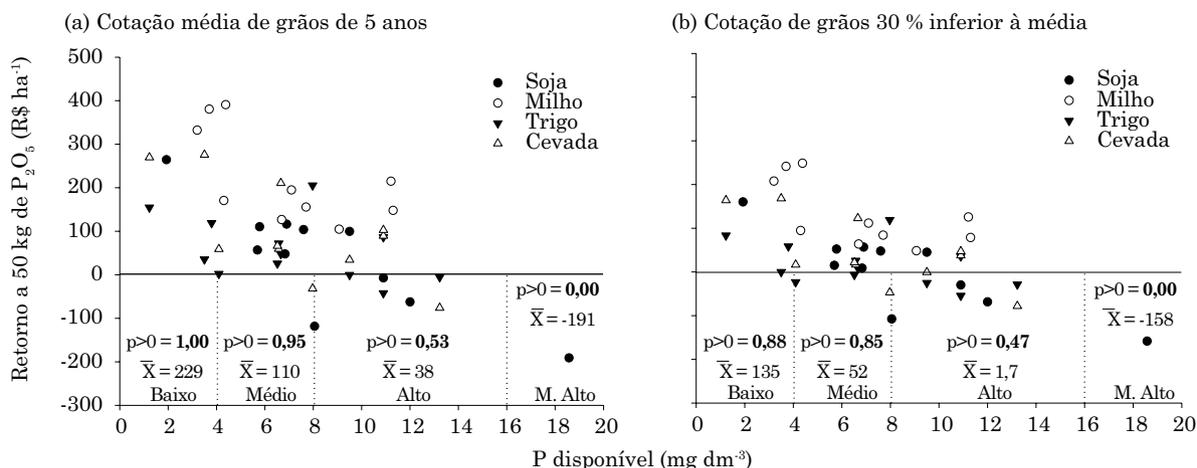


Figura 2. Retorno líquido da adubação fosfatada em diferentes teores de P disponível e preços de grãos. Cotação de soja, milho, trigo e cevada de R\$ 789,00; R\$ 355,00; R\$ 522,00 e R\$ 496,00 t^{-1} (a) e de R\$ 552,00; R\$ 249,00; R\$ 366,00 e R\$ 347,00 t^{-1} (b), respectivamente. Cotação do fertilizante fosfatado de R\$ 1.654,00 t^{-1} de P_2O_5 . *p>0: quociente entre o número de experimentos com incremento positivo em relação ao total de experimentos dentro de cada classe de disponibilidade de P.

Quadro 4. Teor de P disponível (Mehlich-1) na camada de 0-20 cm, equações de ajuste do incremento no rendimento de grãos em função das doses de P, em kg ha⁻¹ de P₂O₅, e doses P₂O₅ para a produção de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) de acordo com as classes de disponibilidade e com os respectivos números de locais

Classe	P mg dm ⁻³	Local Nº	Equação	R ²	Dose de P ₂ O ₅	
					MET	MEE
kg ha ⁻¹						
Soja						
Baixa	1,9	1	$\hat{y} = -17,659 + 9,759 x - 0,0192 x^2$	0,96	254	203
Média	6,5	5	$\hat{y} = 32,932 + 4,844 x - 0,01 x^2$	0,98	242	85
Alta	10,1	4	$\hat{y} = 0,1405 + 0,9419 x$	0,95	240	0
Muito alta	18,6	1	$\hat{y} = -99,208 - 0,3572 x$	0,16	0	0
Milho						
Baixa	3,4	2	$\hat{y} = 84,307 + 16,319 x - 0,0357 x^2$	0,98	229	163
Média	6,0	5	$\hat{y} = 121,14 + 23,493 x - 0,0611 x^2$	0,98	192	154
Alta	10,5	3	$\hat{y} = 66,176 + 15,959 x - 0,0504 x^2$	0,96	158	115
Muito alta	-	0	-	-	-	-
Trigo						
Baixa	2,8	3	$\hat{y} = -2,8085 + 8,0692 x - 0,0192 x^2$	0,99	210	128
Média	6,4	4	$\hat{y} = 1,6829 + 5,1188 x - 0,0107 x^2$	0,99	222	88
Alta	11,1	5	$\hat{y} = 40,65 + 5,1444 x - 0,0093 x^2$	0,98	455	61
Muito alta	-	0	-	-	-	-
Cevada						
Baixa	2,4	2	$\hat{y} = 44,352 + 13,288 x - 0,0392 x^2$	0,97	208	164
Média	6,4	4	$\hat{y} = 64,728 + 8,5484 x - 0,0245 x^2$	0,95	171	102
Alta	11,1	5	$\hat{y} = 49,741 + 5,1569 x - 0,0181 x^2$	0,88	143	73
Muito alta	-	0	-	-	-	-

unidade de P aplicado, aumentando, na média das classes Baixa e Média, 6,6 e 7,3 kg de grãos para cada kg de P₂O₅ aplicado no solo, respectivamente, enquanto o milho incrementou em 19,9 kg de grãos e a cevada em 10,9 kg. A baixa eficiência da soja na conversão do P aplicado em rendimento de grãos também foi verificada por Schlindwein e Gianello (2008) e se reflete em doses mais elevadas de P a serem aplicadas nessa cultura, visando obter os rendimentos de MEE para a classe de disponibilidade Baixa (Quadro 4), também em razão do alto valor agregado dos grãos em nível de mercado internacional. No caso do trigo, apesar da baixa eficiência no aproveitamento do P aplicado, a cultura é altamente exigente e responsiva ao nutriente, como verifica-se pelos maiores teores críticos obtidos para os cereais de inverno (Figura 1).

As doses de MEE para as culturas (Quadro 4) para as classes de disponibilidade abaixo do teor crítico de P (classes Baixa e Média) foram estimadas pelas equações de regressão polinomial e representam a dose a ser aplicada, considerando a média dos teores de P no solo dos experimentos em cada classe, que não foi exatamente o valor intermediário das classes de disponibilidade de P (Baixa = 2 mg dm⁻³,

e Média = 6 mg dm⁻³). Em vista disso, estimou-se a dose de P para cada classe de disponibilidade de P a partir da equação de ajuste entre os teores de P no solo e as doses recomendadas (Figura 3), obtendo a dose correspondente ao teor de P médio de cada classe (Quadro 5). No caso das classes de disponibilidade acima do teor crítico de P (classes Alta e Muito Alta), levou-se em consideração a exportação de grãos por tonelada de grãos de cada cultura.

As doses indicadas para a soja em solos nas classes de disponibilidade Baixa (200 kg ha⁻¹) e Média (90 kg ha⁻¹) encontram-se acima da maioria das recomendações fosfatadas para essa cultura no Brasil. A indicação para soja no Estado do Paraná em solos com teor de P menor que 3 mg dm⁻³ é de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, considerando solos com teor de argila maior que 400 g kg⁻¹ (Embrapa, 2011b). Porém, essa indicação tanto em teor crítico e classes de disponibilidade quanto às doses é com base em resultados das décadas de 1980 e 1990 (Ocepar, 1987; Embrapa, 1999), considerando solos cultivados em preparo convencional e produtividade das culturas de aproximadamente 60 %. Da mesma forma, a indicação de adubação fosfatada nos Estados do RS e SC para a soja também é inferior às doses

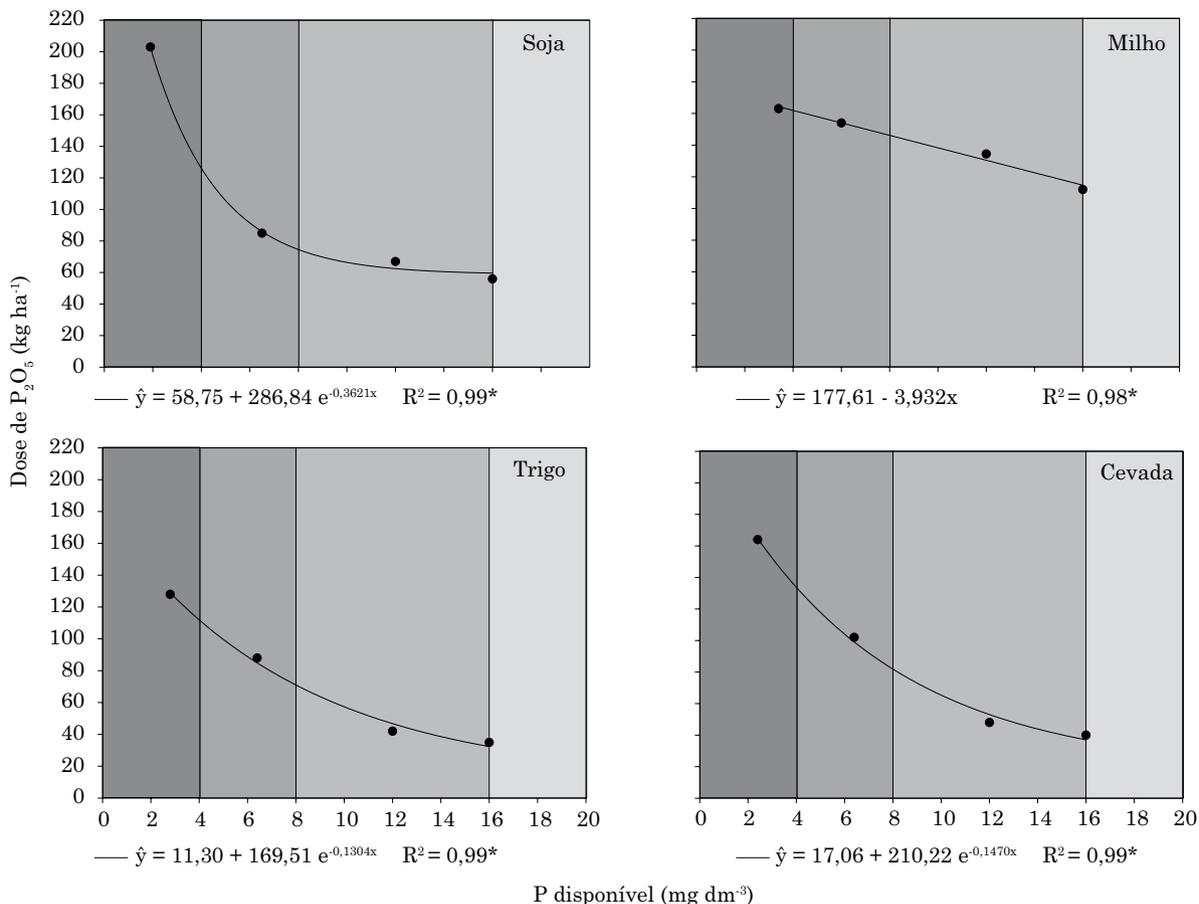


Figura 3. Estimativa de doses de fósforo para as culturas de soja, milho, trigo e cevada para cada classe de disponibilidade de P no solo.

Quadro 5. Dose média de P₂O₅ indicada para soja, milho, trigo e cevada em sistema plantio direto, em diferentes classes de disponibilidade de P para os Latossolos da região centro-sul do Paraná

Classe de disponibilidade	P mg dm ⁻³	Soja	Milho	Trigo	Cevada
		kg ha ⁻¹			
Baixa ⁽¹⁾	<4	200 ⁽³⁾	170	140	165
Média ⁽¹⁾	4-8	90	155	90	100
Alta ⁽²⁾	8-16	65 (R + 20 %)	130 (R + 20 %)	45 (R + 20 %)	50 (R + 20 %)
Muito alta ⁽²⁾	>16	55 (R)	115 (R)	35 (R)	40 (R)

⁽¹⁾ Doses de P₂O₅ para rendimento de máxima eficiência econômica. ⁽²⁾ R: valor de reposição por tonelada de grão produzido da cultura: 10, 10, 14 e 8 kg de P₂O₅ por tonelada de grãos produzidos de trigo, cevada, soja e milho, respectivamente; na classe Alta foi acrescido 20 % para suprir possíveis perdas. ⁽³⁾ Indicações de doses com base nas expectativas de rendimento de 4.000, 14.000, 3.500 e 4.000 kg ha⁻¹ de soja, milho, trigo e cevada, respectivamente.

estabelecidas neste estudo, sugerindo 140 kg ha⁻¹ para solos com teor de P abaixo de 2 mg dm⁻³ e 100 kg ha⁻¹ para os com teor de P entre 2 e 4 mg dm⁻³. Ao menos em parte, as diferenças são por causa das elevadas produtividades tomadas como referência neste estudo (4.000 kg ha⁻¹ de soja, 14.000 kg ha⁻¹ de milho, 3.500 kg ha⁻¹ de trigo e 4.000 kg ha⁻¹ de cevada), bem como da elevada capacidade de adsorção de P dos solos da região (Vieira, 2010).

Para a cultura do milho, as doses de adubação fosfatada indicadas para as classes de disponibilidade Baixa e Média foram de 170 e 155 kg ha⁻¹, respectivamente, considerando a expectativa de rendimento de 14 Mg ha⁻¹ (média de rendimento de grãos dos 10 locais de estudo). Cabe destacar que, mesmo na classe de disponibilidade Baixa e sem adição de P, o menor rendimento de grãos de milho obtido nos experimentos foi de 8,8 t ha⁻¹,

que é superior à produtividade média paranaense (6,0 Mg ha⁻¹) e brasileira (4,9 Mg ha⁻¹) (Conab, 2014).

Em comparação com a recomendação de adubação fosfatada nos Estados do RS e SC, as doses indicadas para o milho neste estudo são em geral 30 % inferiores (CQFS-RS/SC, 2004). Isso decorre em razão de a expectativa de rendimento para o milho nesses Estados ser de apenas 4 Mg ha⁻¹. Considerando a expectativa de rendimento da região centro-sul de 14 Mg ha⁻¹, a CQFS-RS/SC (2004) recomenda acrescentar 15 kg ha⁻¹ de P₂O₅ por tonelada adicional de grãos a ser produzido acima de 4 Mg ha⁻¹, o que representa a indicação de 255 kg ha⁻¹ para solos com teor de P abaixo de 4 mg dm⁻³. A recomendação para o Estado de Minas Gerais é a que apresenta maior expectativa de rendimento para o milho, até 8 Mg ha⁻¹ (CFSEMG, 1999). Extrapolando para a faixa de rendimento de 12-14 Mg ha⁻¹, a dose recomendada seria de 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅, semelhante à estabelecida neste estudo para solos cuja disponibilidade de P enquadra-se na classe Baixa.

A indicação de adubação fosfatada para o trigo e a cevada (classe Baixa: 140 - 165 kg ha⁻¹; classe Média: 90 - 100 kg ha⁻¹) foi superior às atuais indicações técnicas utilizadas no Paraná, que indicam para ambas as culturas 75, 50 e 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para as faixas de disponibilidade de Baixa (0 a 5 mg dm⁻³ de P), Média (5 a 9 mg dm⁻³ de P) e Alta (>9 mg dm⁻³ de P), respectivamente (Embrapa, 2011a, 2013). Porém, essas indicações não informam a expectativa de rendimento para qual são sugeridas as doses, o que impossibilita uma análise comparativa com os resultados deste estudo. Em geral, a necessidade atual de maiores doses de P para as culturas na região centro-sul do Paraná decorre do rendimento de grãos mais alto e da maior exigência nutricional dos cultivares atualmente utilizados (Schlindwein e Gianello, 2008), bem como do alto potencial que os solos apresentam para adsorver fosfato (Vieira, 2010).

Para o manejo da adubação fosfatada nas classes de disponibilidade Baixa e Média, as doses de P₂O₅ foram estimadas pela MEE das culturas e não contemplam a filosofia de correção do solo com aplicação e incorporação na camada arável. Porém, as doses indicadas para a classe Baixa foram em média 145, 55, 105 e 125 kg ha⁻¹ de P₂O₅ superiores à exportação pelos grãos de soja, milho, trigo e cevada, respectivamente; e, para a classe Média, 35, 40, 55 e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente para as mesmas culturas. Considerando a necessidade de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para elevar 1 mg dm⁻³ de P disponível no solo na camada de 0-20 cm (Vieira, 2010) e a rotação de culturas amplamente utilizada na região centro-sul do Paraná (trigo/soja, cevada/soja, aveia + ervilhaca/milho), observou-se que, após um ciclo de rotação de três anos com a aplicação dessas doses, a quantidade de P₂O₅ aplicada além da exportação dos grãos seria de 575 kg ha⁻¹ na classe Baixa e 225 kg ha⁻¹ na classe Média, sendo

muito próxima à necessária para elevar os teores de P disponível no solo ao teor crítico. Dessa forma, espera-se atingir a classe de disponibilidade de P desejada (alta) após um ciclo de rotação, mesmo que a indicação de doses para as culturas em solos com P abaixo do teor crítico não tenha sido desenvolvida, tendo a correção do solo como critério primário.

Essa condição aproxima-se das indicações técnicas que propunham a correção gradual dos teores de P disponível no solo pela aplicação no sulco de semeadura de uma quantidade de P superior à extração da cultura, de modo a acumular P no solo com o passar do tempo, atingindo após alguns anos o teor crítico desse nutriente. As doses de adubação corretiva gradual de P no solo e o período estipulado para atingir o teor crítico no solo variam entre as recomendações, por vezes considerando períodos curtos de dois ou três cultivos (CQFS-RS/SC, 2004; Cubilla et al., 2007), ou períodos mais longos como três, quatro ou até oito anos (Leikam et al., 2003; Schlindwein, 2003).

As doses estabelecidas para todas as culturas em solos com disponibilidade de P acima do teor crítico (classes Alta e Muito Alta) são semelhantes às indicações das demais regiões brasileiras, pois todas são com base na dose de exportação de P pelos grãos. Cabe destacar que a adição de doses de P₂O₅ nas classes de disponibilidade Alta e Muito Alta, mesmo apenas como forma de reposição suprindo a exportação pelos grãos, pode não ser economicamente viável se considerado um curto período de tempo. Entretanto, quando o teor de P atinge a classe desejada Alta ou acima dela, condição de solo comumente encontrada em áreas há mais de 30 anos em plantio direto na região, o manejo da adubação fosfatada deixa de ser direcionado às culturas individuais e à sua máxima eficiência econômica e passa a ter como objetivo manter a ciclagem e os níveis de P no solo pelas adubações fosfatadas equivalentes à exportação pelos grãos (classe Muito Alta) e exportação acrescida de 20 % (classe Alta).

O manejo da adubação fosfatada visando adubar o sistema está em concordância com a nova abordagem da avaliação da eficiência da adubação fosfatada na agricultura (Johnston e Syers, 2009). Essa visão diferenciada do manejo do P no solo baseia-se no estudo de recuperação de P pelo método de balanço de P (Syers et al., 2008), que consiste na razão entre o P removido pelas culturas e o P aplicado ao solo. A recuperação de P descrita pelo método de balanço surgiu a partir de estudos de recuperação da adubação fosfatada utilizando o método direto, com isótopo ³²P, em que a percentagem de recuperação do P (eficiência) raramente excede 25 % na cultura em que o fertilizante foi aplicado; ou seja, desconsiderando perdas, 75 % do P aplicado vão para as reservas do solo, sejam na fração lábil, moderadamente lábil ou

Quadro 6. Dose média de P₂O₅ indicada para a sequência de quatro cultivos na rotação de culturas com soja, milho, trigo e cevada em sistema plantio direto, em diferentes classes de disponibilidade de P para os Latossolos da região centro-sul do Paraná

Classe de disponibilidade	P mg dm ⁻³	Seqüência de cultivo							
		1º cultivo		2º cultivo		3º cultivo		4º cultivo	
		Trigo/Cevada	Cobertura	Soja	Milho	Trigo/Cevada	Cobertura	Soja	Milho
Baixa	<4	150 ⁽¹⁾	55	200	115	150	55	200	115
Média	4 - 8	100	40	90	115	100	40	90	115
Alta	8 - 16	(RI + RV) ⁽²⁾ + 20 %	15	-	RV	(RI + RV) + 20 %	15	-	RV
Muito alta	>16	RI + RV	-	-	RV	RI + RV	-	-	RV

⁽¹⁾ Indicações de doses com base nas expectativas de rendimento de 4.000, 14.000, 3.500 e 4.000 kg ha⁻¹ de soja, milho, trigo e cevada, respectivamente. ⁽²⁾ RI ou RV: valor de reposição por tonelada de grão produzido da cultura de inverno/verão: 10, 10, 14 e 8 kg de P₂O₅ por tonelada de grãos produzidos de trigo, cevada, soja e milho, respectivamente.

não lábil. Assim, é razoável considerar que do total de P absorvido por uma cultura, parte veio do P do fertilizante e parte da reserva do solo, que é mantida pela adubação fosfatada. Em solos com teores de P disponível acima do teor crítico, McCollum (1991) observou que doses correspondentes à exportação de P pelos grãos são suficientes para manter os teores desse nutriente no solo. Além disso, nessa condição de fertilidade, a eficiência da adubação fosfatada estimada pelo método de balanço de P excede 95 % (Johnston e Syers, 2009).

Com base no conceito de adubação de sistemas, contemplando o manejo adequado do fertilizante fosfatado para as culturas, o retorno econômico e a praticidade das operações agrícolas, sugere-se a adubação fosfatada para a sequência de quatro cultivos na rotação de culturas adotada na região centro-sul do Paraná (Quadro 6), onde é proposto que, nas classes de disponibilidade Muito Alta e Alta, a adubação fosfatada de reposição e reposição + 20 % da cultura da soja sejam antecipadas para o cultivo de inverno anterior (trigo ou cevada). Essa indicação é suportada pelos resultados de resposta de rendimento dessas culturas às doses de P (Quadro 4), em que a cultura da soja não apresentou retorno econômico positivo com a aplicação de P nas classes de disponibilidade Alta e Muito Alta, enquanto as culturas de trigo e cevada apresentaram dose de máxima eficiência econômica para a classe de disponibilidade alta superior ao valor de reposição de P.

As indicações para as culturas nas classes de disponibilidade Baixa e Média são muito semelhantes às indicações para as culturas individuais (Quadro 5), diferindo pela antecipação de parte da adubação da cultura do milho para a cultura de cobertura no inverno, com o objetivo de aumentar a produção de matéria seca desta, bem como distribuir o P no solo de forma mais uniforme. Para a cultura do milho, sugere-se manter a adubação de reposição na semeadura dessa cultura mesmo nas classes de disponibilidade Alta e Muito

Alta, em virtude da alta exigência e exportação de P com a produtividade média de 14 Mg ha⁻¹ obtida na região. Na condição de disponibilidade de P Alta, a dose adicional de 20 % da reposição correspondente às perdas (manutenção) pode ser antecipada para a cultura de cobertura do inverno, aplicando apenas a dose de reposição na semeadura do milho.

CONCLUSÕES

Os teores críticos de fósforo em solos em plantio direto são maiores para os cereais de inverno do que para as culturas da soja e do milho, bem como no caso da camada diagnóstica de 0-10 cm do que na camada de 0-20 cm.

As doses de fósforo indicadas para soja, milho, trigo e cevada em solos em plantio direto na região centro-sul do Paraná são superiores às atuais indicações de adubação para as culturas individuais desse Estado, o que se justifica, ao menos em parte, pelas altas produtividades e pela alta capacidade de retenção de fósforo dos Latossolos da região.

Os resultados sugerem que as doses estabelecidas para as culturas elevem o teor de fósforo no solo ao teor crítico após um ciclo da rotação de culturas (três anos), embora seja adotada a filosofia de suficiência/adubação de cultura para a indicação de doses de adubação fosfatada em solos abaixo do teor crítico de fósforo.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Ibanor Anghinoni e João Mielniczuk, pelo auxílio no delineamento dos experimentos; à equipe da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), em especial ao Adão Paulo Rodrigues e Antoninho Barbosa; aos

cooperados da Cooperativa Agrária Agroindustrial Eduardo Reinhofer, Grupo Erich Leh, Hermine Leh, Irmãos Stock e Paul Ilich, pela cessão das áreas; e aos Engenheiros-Agrônomos Juarez Roque Perin, Otavino Rovani, Rodrigo Martins Ferreira e Silvino Caus, pelo apoio na condução dos experimentos.

REFERÊNCIAS

- Agrária. Agrária em Números. [Acessado em 11 abr 2014]. Disponível em: http://www.agraria.com.br/portal/institucional_quem_agraria_numeros.php.
- Agrolink. Cotações. [Acessado em 11 nov 2013]. Disponível em: <http://www.agrolink.com.br/culturas/soja/Default.aspx>.
- Agrosoft. Paraná vai estimular a retomada do sistema de plantio direto na palha. [Acessado em 11 dez 2009]. Disponível em: <http://www.agrosoft.org.br/agropag/103907.htm>.
- Albuquerque JA, Mafra AL, Fontoura SMV, Bayer C, Passos JFM. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno aluminico. R Bras Ci Solo. 2005;29:963-75.
- Andrade FV, Mendonça ES, Alvarez V VH, Novais RF. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. R Bras Ci Solo. 2003;27:1003-11.
- Anghinoni I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p.873-928.
- Ciotta MN, Bayer C, Ernani PE, Fontoura SMV, Albuquerque JA, Wobeto C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. R Bras Ci Solo. 2002;26:1055-64.
- Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. Viçosa, MG: 1999.
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo - CQFSRS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10ª.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul; 2004.
- Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2013/14 - Sétimo levantamento. [Acessado em 10 abr 2014]. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_10_17_37_10_boletim_graos_abril_2014.pdf.
- Costa SEVGA, Souza ED, Anghinoni I, Flores JPC, Cao EG, Holzschuh MJ. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. R Bras Ci Solo. 2009;33:1237-47.
- Cubilla MM, Amado TJC, Wendling A, Eltz FLF, Mielniczuk J. Calibração visando à fertilização com fósforo para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. R Bras Ci Solo. 2007;31:1463-74.
- Eltz FLF, Peixoto RTG, Jaster F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. R Bras Ci Solo. 1989;13:259-67.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Recomendações técnicas para a cultura da soja no Paraná 1999/2000. Londrina: Embrapa Soja; 1999. (Documentos, 131).
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Indicações técnicas para produção de cevada cervejeira nas safras 2007 e 2008. Passo Fundo: Embrapa Trigo; 2007. (Sistemas de produção, 3).
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Informações técnicas para trigo e triticales - Safra 2012. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; 2011a. (Sistemas de produção, 9).
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil - 2012 e 2013. Londrina: Embrapa Soja; 2011b. (Sistemas de produção, 15).
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Indicações técnicas para a produção de cevada cervejeira nas safras 2013 e 2014. Passo Fundo: Embrapa Trigo; 2013. (Sistemas de produção, 7).
- Fontoura SMV, Bayer C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na Região centro-sul do Paraná. R Bras Ci Solo. 2009;33:1721-32.
- Guppy CN, Menzies NW, Moody PW, Blamey FPC. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. Soil Res. 2005;43:189-202.
- Johnston AE, Syers JK. A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. Better Crops Plant Food. 2009;93:14-6.
- Lantmann AF, Roessing AC, Sfredo GJ, Oliveira MCN. Adubação fosfatada e potássica para sucessão soja-trigo em Latossolo Roxo distrófico sob semeadura direta. Londrina: Embrapa Soja; 1996. (Circular técnica, 15).
- Leikam DF, Lamond RE, Mengel DB. Providing flexibility in phosphorus and potassium fertilizer recommendations. Better Crops Plant Food. 2003;87:6-10.
- Mccollum RE. Buildup and decline in soil phosphorus: 30-year trends on a Typic Umbraquult. Agron J. 1991;83:77-85.
- Mundi I. Superfosfato triplo - Preço mensal. [Acessado em 11 nov 2013]. Disponível em: <http://www.indexmundi.com/pt/pre%E7os-de-mercado/?mercadoria=superfosfato-triplo&meses=60&moeda=brl>.
- Organização das Cooperativas do Paraná - Ocepar. Recomendações técnicas para a cultura da soja no Paraná - 1987/88. Cascavel: Embrapa Soja;1987. (Boletim técnico, 21).
- Raj Bvan. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2011.
- Raj Bvan, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2ª.ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas/Fundação IAC; 1997. (Boletim técnico, 100).
- Sch lindwein JA. Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2003.
- Sch lindwein JA, Bortolon L, Gianello C. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema plantio direto. R Bras Ci Solo. 2011;35:1669-78.
- Sch lindwein JA, Gianello C. Necessidades de novos estudos de calibração e recomendação de fertilizantes para as culturas cultivadas sob plantio direto. R Plantio Direto. 2004;79:12-5.

- Sch lindwein JA, Gianello C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:2037-49.
- Sousa DMG, Volkweiss SJ. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em grânulos. *R Bras Ci Solo*. 1987;11:141-6.
- Syers JK, Johnston AE, Curtin D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. Roma: FAO; 2008. (FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 18).
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2ª.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995. (Boletim técnico, 5).
- Vieira RCB. Camada diagnóstica, critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em solos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2010.
- Vieira RCB, Bayer C, Fontoura SMV, Anghinoni I, Ernani PR, Moraes RP. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em latossolos sob plantio direto no centro-sul do Paraná. *R Bras Ci Solo*. 2013;37:188-98.
- Villalba EOH. Recomendação de nitrogênio, fósforo e potássio para girassol sob sistema plantio direto no Paraguai [dissertação]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2008.
- Vitosh ML, Johnson JW, Mengel DB. Tri-State fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat, and alfalfa. East Lansing: Michigan State University; The Ohio State University, Purdue University; 1995. (Extension Bulletin E-2567).
- Wendling A, Eltz FLF, Cubilla MM, Amado TJC, Mielniczuk J. Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:1929-39.