

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**CAMADA DIAGNÓSTICA, CRITÉRIOS DE CALAGEM E TEORES CRÍTICOS
DE FÓSFORO E POTÁSSIO EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO NO
CENTRO-SUL DO PARANÁ**

**Renan Costa Beber Vieira
(Dissertação de Mestrado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**CAMADA DIAGNÓSTICA, CRITÉRIOS DE CALAGEM E TEORES CRÍTICOS
DE FÓSFORO E POTÁSSIO EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO NO
CENTRO-SUL DO PARANÁ**

RENAN COSTA BEBER VIEIRA
Engenheiro Agrônomo (UFSM)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil
Abril, 2010

RENAN COSTA BEBER VIEIRA
Engenheiro Agrônomo (UFSM)

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em:

Pela Banca Examinadora

Homologada em:

Por

CIMÉLIO BAYER
Professor Orientador
PPG Ciências do Solo/UFRGS

FLÁVIO A. O. CAMARGO
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Ciência do
Solo

IBANOR ANGHINONI
PPG Ciências do Solo/UFRGS

JOÃO MIELNICZUK
PPG Ciências do Solo/UFRGS

PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de
Agronomia

PAULO ROBERTO ERNANI
PPG Ciências do Solo/UDESC

*À minha família, braço forte frente às batalhas,
meus pais, **Deli e Roque**,
minha amada **Camille**,
meus irmãos, **Frederico e Filipe**
e irmãs do coração, **Patrícia e Aline***

dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Cimélio Bayer, pela amizade, orientação, oportunidade e toda confiança dedicada neste trabalho.

À Pesquisadora Sandra Mara Vieira Fontoura, ao Técnico Renato Moraes, à Cooperativa Agrária e todos os funcionários da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária envolvidos no estudo, por proporcionar a realização deste trabalho.

Aos Professores João Mielniczuk e Ibanor Anghinoni, pela amizade, convívio e ensinamentos sempre providenciais para a condução deste estudo, bem como às sugestões na defesa da dissertação.

Ao Professor Paulo Ernani, pelo aceite ao convite de participação na banca de defesa e às valiosas contribuições ao trabalho.

Ao amigo Rafael Goulart Machado, pela grande amizade e parceria imensurável desde os tempos da graduação.

Ao amigo Alexandre Doneda, pela amizade, conversas e conhecimentos compartilhados.

Aos colegas da sala do Manejo do Solo e do laboratório, Tiago, Graciele, Cecília, Daniela, Juliana, Fernando, Ricardo, Genuir, Luis, Luisa, Mirla, Rosane, Michely, Denice, Emanuele, Rambo, Josiléia, Natália e Carlos, pela parceria diária nas conversas e mate ou mesmo no silêncio dos estudos.

Aos demais colegas do Departamento de Solos do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, em especial ao Gleidson, Rodrigo, Marcos e Lucélia.

Ao técnico do Laboratório de Manejo e Biogeoquímica Ambiental, Tonho, e ao secretário Jader, pelos auxílios sempre providenciais.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Universidade Federal de Santa Maria, pelo ensino gratuito e de qualidade.

Ao CNPq e a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos professores do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao professor Carlos Alberto Ceretta, pelos ensinamentos profissionais e pessoais durante a graduação em Agronomia, os quais

proporcionaram conhecimentos indispensáveis para a realização deste trabalho de mestrado.

À Camille pelo companheirismo, carinho, amor e compreensão dedicados durante estes dois anos à distância.

À minha família, Roque e Deli, Frederico e Patrícia, Filipe e Aline, pela compreensão, estímulo, companheirismo, exemplos de vida, compreensão, amor e apoio incondicional para que eu realizasse meus sonhos e desejos.

À todos que de alguma forma colaboraram, direta ou indiretamente, para que este trabalho se concretizasse.

CAMADA DIAGNÓSTICA, CRITÉRIOS DE CALAGEM E TEORES CRÍTICOS DE FÓSFORO E POTÁSSIO EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO NO CENTRO-SUL DO PARANÁ^{1/}

Autor: Renan Costa Beber Vieira
Orientador: Prof. Dr. Cimélio Bayer

RESUMO

A região Centro-Sul do Paraná caracteriza-se por apresentar condições de clima e solo altamente favoráveis à produção agrícola, com rendimentos superiores a 3,2 Mg ha⁻¹ de soja e 10,2 Mg ha⁻¹ de milho. Entretanto, não há um sistema de recomendação de fertilizantes englobando rotação de culturas em sistema plantio direto na região, o que conduz ao uso de recomendações desenvolvidas em outros locais. Neste sentido, este trabalho visa fornecer subsídios para a elaboração de um sistema de recomendação de adubação e calagem para solos em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná, contemplando informações de camada diagnóstica, critérios de calagem e teores críticos de fósforo (P) e potássio (K) disponíveis. Para isso, oito experimentos foram instalados a campo no inverno de 2008, sendo dois com doses de calcário, três com doses de P e três com doses de K. Visando consolidar os resultados, três experimentos de calagem e dois de P e K de longa duração, anteriormente conduzidos na região, também foram analisados no estudo. Na avaliação da camada diagnóstica, correlações entre os atributos do solo (pH em CaCl₂, saturação por bases - V %, Al trocável, saturação por Al, teor de P e K - Mehlich-1) nas camadas de 0-10 e 0-20 cm e os rendimentos de grãos das culturas foram estabelecidas, resultando em coeficientes de correlação semelhantes entre as duas camadas. Além disso, as alterações dos atributos do solo nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade com a aplicação de calcário, de P e K em superfície foram analisadas. Nestas análises, foram observadas alterações destes atributos do solo em toda a camada de 0-20 cm, indicando que esta camada de solo é a que melhor representa a condição de fertilidade do solo. No estudo dos critérios de calagem e teores críticos de P e K no solo, os dados de rendimento de grãos foram transformados em rendimento relativo, relacionando-os com os atributos do solo. Os indicadores de acidez do solo utilizados para os critérios de tomada de decisão para realização da calagem foram o pH do solo em CaCl₂ e a V %, pois apresentaram melhor relação entre a análise do solo e o rendimento das culturas, sendo definido para a camada de 0-20 cm, o pH de 4,9 e a V % de 60 %. Os teores críticos de P e K disponíveis no solo foram definidos pelo teor no solo que representa 90 % do rendimento relativo das culturas, obtido pelo ajuste da curva de Mitscherlich. Assim, os teores encontrados para a camada de 0-20 cm foram de 8 mg dm⁻³ de P e de 120 mg dm⁻³ de K.

^{1/} Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. (83 p.) – Abril, 2010. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq, CAPES e Cooperativa Agrária.

SOIL LAYER FOR SAMPLING, LIMING CRITERIA AND CRITICAL LEVELS OF PHOSPHORUS AND POTASSIUM IN NO-TILL SYSTEM AT THE MIDDLE SOUTH OF PARANÁ STATE, BRAZIL^{2/}

Author: Renan Costa Beber Vieira

Adviser: Prof. Dr. Cimélio Bayer

ABSTRACT

The Middle South region of Paraná State is characterized by climate and soil conditions that are highly favorable to agricultural production, with yields exceeding 3.2 and 10.2 Mg ha⁻¹ of soybean and maize grains, respectively. However, up to now, there is not a local fertilizer recommendation system to crop rotation in no-tillage system in the region, which leads to the use of recommendations developed elsewhere. Therefore, this work aims to provide support for the elaboration of a locally adjusted recommendation system for fertilization and liming for soils in no-tillage systems in the Middle South region of Paraná, comprising information regarding soil layer for sampling, liming criteria and critical levels of phosphorus (P) and potassium (K). For achieving this goal, eight experiments were conducted under field conditions in the winter of 2008, in which two experiments evaluated lime rates, three attempted to P rates and three were related to K rates. In order to consolidate the results, three long-term experiments of lime and two long-term experiments of P and K, conducted in the region before this work, were also analyzed in the study. For the determination of soil layer for sampling, correlations between crop yields and soil attributes (pH in CaCl₂, base saturation - V %, exchangeable Al, Al saturation, and P and K - Mehlich-1 levels) at 0-10 and 0-20 cm were established, resulting in similar correlation coefficients for the two layers. In addition, changes in soil attributes at 0-10 and 10-20 cm layers with the surface application of lime, P and K were also analyzed. The changes were observed in soil attributes across the 0-20 cm layer, indicating that such layer is the best for expressing the soil fertility conditions. In the study of the liming criteria and critical levels of P and K in the soil, the data of grain yield were transformed into relative yields and such values were evaluated against the soil attributes. The indicators of soil acidity selected for the liming criteria were soil pH in CaCl₂ and V %, as they had the closest relation with crop yields. The critical values defined for the 0-20 cm layer were pH 4.9 and V of 60%. The critical levels of P and K in soil were defined by the soil content which represents 90 % of relative yield of crops, obtained by Mitscherlich curve fitting. Thus, the critical levels for the 0-20 cm layer were 8 mg dm⁻³ of P and 120 mg dm⁻³ of K.

^{2/} Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil. (83 p.) – April, 2010. Research supported by CNPq, CAPES e Cooperativa Agrária.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Histórico agrícola do sistema plantio direto no Paraná	3
2.2 Dinâmica da fertilidade do solo em sistema plantio direto.....	5
2.2.1 Acidez do solo	5
2.2.2 Fósforo no solo.....	7
2.2.3 Potássio no solo	8
2.3 Amostragem de solo e camada diagnóstica em solos sob sistema plantio direto.....	9
2.4 Recomendação de calagem, fósforo e potássio no Paraná	11
2.5 Estudos de calibração - determinação do teor crítico e faixas de fertilidade.....	13
3. HIPÓTESES	15
4. OBJETIVOS	16
4.1 Objetivos gerais.....	16
4.2 Objetivos específicos.....	16
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
5.1 Descrição da região	17
5.2 Descrição dos experimentos	19
5.2.1 Experimentos implantados neste estudo.....	21
5.2.2 Experimentos conduzidos pela FAPA	23
5.3 Análises de solo	26
5.4 Coletas de amostras de biomassa vegetal e análises.....	26
5.5 Análise e definição da camada diagnóstica da fertilidade do solo.....	27
5.6 Determinação do rendimento relativo e construção das curvas de resposta.....	28
5.7 Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio	29
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6.1 Fertilidade do solo e rendimento das culturas nos experimentos com calagem	31
6.2 Fertilidade do solo e rendimento das culturas nos experimentos com adubação fosfatada e potássica	37
6.3 Análise da camada diagnóstica em solos sob sistema plantio direto ..	41
6.3.1 Avaliação da camada diagnóstica pelo crescimento e rendimento das culturas.....	42
6.3.2 Avaliação da camada diagnóstica em razão das alterações nos atributos do solo	46
6.3.3 Considerações finais e proposição da camada diagnóstica	52

6.4 Critérios de acidez do solo	53
6.5 Determinação dos teores críticos de fósforo e potássio no solo	57
6.5.1 Teor crítico de fósforo no solo	58
6.5.2 Teor crítico de potássio no solo.....	60
6.6 Recomendações preliminares de critérios para o manejo da calagem e adubação fosfatada e potássica para o sistema de rotação de culturas predominante na região Centro-Sul do Paraná....	62
7. CONCLUSÕES	63
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Características dos experimentos utilizados na definição da camada diagnóstica, dos critérios de calagem e dos teores críticos de fósforo e potássio.	20
2. Análise do solo (0-20 cm) das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos de calagem, fósforo e potássio.....	21
3. Atributos do solo (pH em CaCl ₂ , saturação por bases (V %), alumínio trocável e saturação por alumínio (Al %)) após um ano da aplicação de calcário nas localidades de Pinhão e Candói, nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de profundidade.....	32
4. Atributos do solo (pH em CaCl ₂ , saturação por bases (V %), alumínio trocável e saturação por alumínio (Al %)) após 5 anos nos experimentos de calagem com gesso e com pré-culturas e após 3 anos no experimento de calagem com fósforo, nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de profundidade.....	33
5. Amplitude de rendimentos de grãos das culturas e o menor rendimento relativo em cada safra nos experimentos de calagem.....	36
6. Teores de fósforo e potássio disponíveis no solo (Mehlich-1), nos experimentos localizados em Guarapuava, Pinhão e Candói, nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de profundidade.	38
7. Teores de fósforo e potássio disponíveis no solo (Mehlich-1), nos experimentos de solos com média e alta fertilidade, nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de profundidade.	39
8. Amplitude de rendimentos de grãos das culturas e o menor rendimento relativo de cada cultura nos experimentos de fósforo e potássio.	41
9. Coeficientes de correlação linear (r, p<0,10) entre os rendimentos relativos de soja, milho e cereais de inverno (aveia branca, cevada e trigo) e os componentes da acidez de solos em plantio direto nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade, em três experimentos envolvendo calagem.....	43
10. Coeficientes de correlação linear (r, p<0,10) entre os rendimentos relativos de soja, milho e cereais de inverno (aveia branca, cevada e trigo) e os teores de P e K disponíveis no solo, nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade.....	44
11. Coeficientes de correlação linear (r, p<0,10) entre os atributos da planta de cereais de inverno e soja e o teor de fósforo e potássio disponível no solo nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade, nos municípios de Guarapuava, Pinhão e Candói.	46
12. Equações de regressão polinomial dos incrementos no pH e na V % do solo com a aplicação de doses de calcário em quatro experimentos, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.	49

13. Equações de regressão polinomial dos incrementos no teor de P e K disponível no solo com a aplicação de doses de P_2O_5 e de K_2O nos experimentos em Guarapuava, Pinhão e Cândói, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.....	51
14. Critérios de calagem para as culturas de soja, aveia branca, trigo, cevada e milho, sob sistema plantio direto, em duas profundidades de amostragem.....	56
15. Teores críticos de fósforo e potássio para as culturas de inverno (aveia branca, trigo e cevada), verão (milho e soja) e todas as culturas, sob sistema plantio direto, nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade.....	61
16. Recomendação de critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná.....	62

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Dados médios de precipitação e temperaturas mínima, média e máxima em Entre Rios, Guarapuava, PR, no período compreendido entre 1976 e 2007. Fonte: Estação meteorológica da FAPA.....	17
2. Municípios de Guarapuava (1), Pinhão (2) e Cândói (3), destacados na região Centro-Sul do Paraná. Fonte: IAPAR.	18
3. Esquema teórico da divisão por quadrantes para a definição dos critérios de calagem.	29
4. Incrementos do pH e da V % do solo com a aplicação de doses de calcário em quatro experimentos, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.....	48
5. Incrementos no teor de P e K disponíveis no solo com a aplicação de doses de P ₂ O ₅ e K ₂ O nos experimentos em Guarapuava, Pinhão e Cândói, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.	50
6. Relação entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de acidez do solo na camada de 0-10 cm de profundidade sob sistema plantio direto.	54
7. Relação entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de acidez do solo na camada de 0-20 cm de profundidade sob sistema plantio direto.	55
8. Rendimento relativo de aveia branca, trigo e cevada (a), milho e soja (b) e todas as culturas (c) em função do fósforo disponível no solo pelo extrator Mehlich-1 nas camadas de 0-10 e 0-20 de profundidade.....	59
9. Rendimento relativo de aveia branca, trigo e cevada (a), milho e soja (b) e todas as culturas (c) em função do potássio disponível no solo pelo extrator Mehlich-1 nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade.....	61

1. INTRODUÇÃO

O Estado do Paraná é o maior produtor de soja e milho da região Sul do Brasil, produzindo 9,4 milhões de toneladas de soja e 11,2 milhões de toneladas de milho no ano de 2007.

A região Centro-Sul do Paraná está inserida no terceiro planalto fisiográfico do Paraná, numa altitude de 800 a 1200 m. Nesta região, encontra-se a Cooperativa Agrária, que é composta por 539 cooperados, cultivando uma área total de 104 mil hectares.

Os solos dessa região são originados principalmente de rochas eruptivas da formação Serra Geral (basalto), predominando os Latossolos Brunos. A união das características de clima e solo da região ao alto nível de tecnologia empregado pelos produtores, confere a esta região um grande potencial produtivo, obtendo altas produtividades evidenciadas por rendimentos médios superiores a 3,2 Mg ha⁻¹ de soja e 10,2 Mg ha⁻¹ de milho.

Apesar dos elevados rendimentos de grãos obtidos nesta região, não há um sistema de recomendação de fertilizantes para o sistema de rotação de culturas, conduzindo a assistência técnica a utilizar publicações e indicações técnicas isoladas para cada cultura, quando há, ou ainda são utilizadas as recomendações desenvolvidas em outros estados com clima e solo distintos, como do RS e SC e de SP.

Os sistemas de recomendação de adubação e calagem têm por finalidade auxiliar na aplicação de fertilizantes e corretivos ao solo, visando o maior retorno econômico da prática agrícola. O método tradicional para a determinação de recomendações de adubação e calagem é através de estudos

de calibração dos atributos do solo com o rendimento das culturas, definindo valores na análise do solo que indicam a necessidade e quantidade de insumos a serem aplicados no solo. Entretanto, o sucesso da utilização dos valores recomendados depende de uma calibração da análise do solo para as condições locais.

A camada de solo a ser amostrada é de fundamental importância, pois toda a calibração de adubação e calagem será em função desta camada de solo. Porém, dentre os sistemas de recomendações de adubação e calagem existentes, não há um consenso quanto à camada de solo ideal a ser coletada no sistema plantio direto, sendo a camada de 0-10 cm adotada nos estados do RS e SC e a camada de 0-20 cm nos estados de SP e MG.

Neste sentido, este trabalho buscou, através de uma parceria com a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), instituição de pesquisa da Cooperativa Agrária, agregar informações para o manejo da fertilidade de solos na região Centro-Sul do Paraná. Assim, a partir de oito experimentos conduzidos a campo durante o período do estudo, complementados pela análise de mais cinco experimentos conduzidos anteriormente pela FAPA, o trabalho contempla informações de camada diagnóstica do solo, critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico agrícola do sistema plantio direto no Paraná

A utilização do solo paranaense nas diferentes regiões agrícolas, desde o início da colonização, caracterizou-se pela implantação de sistemas agrícolas imediatistas, decorrentes quase sempre da ação de estímulos econômicos e políticos a favorecer a exploração cíclica e migratória (Muzilli, 1982). Esta exploração iniciou no Norte do Paraná por volta de 1940, pelo desbravamento de áreas de terras férteis, seguido da implantação extensiva de lavouras cafeeiras e algodozeiras.

O processo exploratório teve sua continuidade no decorrer da década de 60, quando novas áreas foram desbravadas nas regiões Centro-Sul e Oeste, dando início a um novo ciclo da agricultura paranaense, com a monocultura do trigo e da soja. Associada a esta sucessão de culturas, utilizava-se o preparo convencional do solo, que consistia no intensivo revolvimento do solo com lavrações e gradagens ao fim do ciclo das culturas, pulverizando o solo, o qual permanecia praticamente descoberto na fase de implantação e desenvolvimento inicial das culturas (Mielniczuk et al., 2003). Estas características de manejo acarretavam em altas perdas de solo, sementes e plantas jovens pelo arraste nas enxurradas, necessitando replante de 5 a 10 % da área cultivada no Paraná (Derpsch et al., 1991). Este período ficou caracterizado como um período exploratório do solo, com alta desagregação de sua estrutura e empobrecimento da fertilidade (Sorrenson & Montoya, 1989).

As elevadas perdas de solo e água no preparo convencional evidenciaram a necessidade da busca de um novo sistema de manejo. Em meados de 1971/72, iniciaram-se os primeiros testes em escala comercial do sistema plantio direto (SPD) no Brasil, simultaneamente nos Estados do Paraná e do Rio Grande do Sul, com as culturas de trigo e soja. Este sistema tem como princípio o mínimo revolvimento solo, mantendo os resíduos vegetais em superfície e a utilização de sistemas de rotação de culturas.

O produtor Herbert Arnold Bartz (Rolândia, PR) é considerado um dos pioneiros no SPD no Paraná e no Brasil, tendo iniciado lavouras comerciais em 1972, com auxílio da ICI (sigla em inglês da Companhia Imperial de Indústrias Químicas) e do Engenheiro Agrônomo Rolf Derpsch (Borges, 1993). Entretanto, ensaios preliminares já haviam sido realizados em 1968 e 1969 no município de Não-Me-Toque, RS, e em 1971, em Toledo, PR.

Uma forte adoção do SPD deu-se na região dos Campos Gerais (PR), a partir de 1976, com a liderança dos produtores Franke Dijkstra e Manoel Henrique Pereira (Casão Junior et al., 2009). Um grande avanço na pesquisa de sistemas de manejo conservacionistas também ocorreu a partir de 1976 e esteve diretamente relacionado ao projeto de controle da erosão no estado do Paraná, executado pelo IAPAR, juntamente a uma parceria entre a Alemanha e o Brasil, nos anos de 1977 a 1985 (Derpsch et al., 1991). A meta deste projeto foi o desenvolvimento de sistemas de cultivos adequados à região que propusessem um eficiente controle da erosão hídrica. Durante a fase inicial do projeto (4 anos) foram desenvolvidos estudos no Estado do Paraná, estendendo o projeto nos anos subsequentes para outros estados do Sul e demais regiões agrícolas do Brasil, firmando parcerias com instituições de pesquisas como o Instituto Agronômico de Campinas (IAC) e a Embrapa.

O avanço do SPD foi lento no Brasil nas décadas de 70 e 80. Contudo, com a evolução de semeadoras adaptadas ao SPD, intensificaram-se as constatações das vantagens deste sistema de manejo, onde a adoção de práticas conservacionistas de manejo (SPD) resultava na redução de 75 % das perdas de solo e 20 % das perdas de água (Oliveira et al., 2002). Atualmente, o SPD está em plena expansão nas regiões agrícolas brasileiras, com adoção em área superior a 32 milhões de hectares no ano de 2009, o que corresponde a 70 % das lavouras de grãos (MAPA, 2009). No Estado do Paraná, o SPD

está presente em 90 % da área cultivada com a cultura da soja (Agrosoft, 2009).

O SPD no Paraná, juntamente com a alta tecnologia utilizada nas lavouras e as condições climáticas favoráveis, contribui para que este Estado seja o segundo maior produtor de soja do Brasil e o maior produtor de milho (IBGE, 2007). Sobretudo, a região Centro-Sul do Paraná possui destaque no cenário paranaense, com um grande potencial produtivo evidenciado por produtividades médias de 3,2 Mg ha⁻¹ de soja e acima de 10 Mg ha⁻¹ de milho (Agrária, 2009). Além disso, a região possui um clima de alta altitude que permite o cultivo de cereais de inverno em excelência.

2.2 Dinâmica da fertilidade do solo em sistema plantio direto

As características do manejo dos solos e das culturas no SPD provocam alterações na fertilidade do solo com relação ao preparo convencional, afetando a dinâmica e disponibilidade dos nutrientes, influenciando assim no manejo da fertilidade (Anghinoni, 2007). O manejo da fertilidade do solo, envolvendo a aplicação de fertilizantes e corretivos é facilitado no sistema de preparo convencional, pois as operações de preparo do solo promovem a mistura desses insumos com a camada mobilizada de solo. Isso, no entanto, não ocorre no SPD, onde a aplicação dos insumos é localizada na linha de semeadura ou a lança sobre a superfície do solo, e a deposição superficial dos resíduos culturais determina uma menor taxa de decomposição biológica e mais lenta liberação dos nutrientes na superfície do solo. Estes processos resultam na formação de gradiente dos atributos químicos a partir da superfície do solo, a qual se intensifica com o tempo de cultivo do solo em plantio direto.

2.2.1 Acidez do solo

A dinâmica da acidez em solos sob SPD se diferencia da dinâmica em solos sob preparo convencional devido à formação de uma “frente de acidificação” a partir da superfície do solo (Paiva et al., 1996; Ciotta et al., 2002). Os principais fatores que têm sido relacionados à acidificação do solo no

SPD são a aplicação de fertilizantes de reação ácida, associada à lixiviação de nitrato e cátions básicos e à exportação de bases pelos grãos das culturas na colheita (Helyar, 1976; Helyar & Porter, 1989; Vieira et al., 2008).

A acidificação do solo pelo uso de fertilizantes nitrogenados de reação ácida, como a uréia, ocorre em razão de haver a liberação de 2 moles de H^+ durante o processo de hidrólise e nitrificação (Vieira et al., 2008). No caso da mineralização de resíduos orgânicos, há um consumo de 1 mol de H^+ e liberação de 2 mols de H^+ durante a nitrificação, sendo este saldo positivo de 1 mol de H^+ contrabalanceado pelo HCO_3^- liberado pelas plantas quando absorvem o nitrato ($HCO_3^- + H^+ = H_2CO_3$). Entretanto, quando esse nitrato é perdido do sistema (lixiviação), o resultado é um saldo líquido de 1 mol de H^+ para cada mol de N nitrificado, resultando na acidificação do solo (Helyar, 1976; Fenton & Helyar, 2002). Quanto à exportação de bases pelos grãos em razão da colheita, a acidificação do solo ocorre pelo fato que as bases que retornam ao solo nos resíduos vegetais por ocasião da colheita não são suficientes para neutralizar a acidez liberada ao solo durante o desenvolvimento da cultura (Helyar & Porter, 1989). Por sua vez, a lixiviação de cátions básicos resulta no aumento da saturação por Al ou diminuição da saturação por bases, pois a energia de ligação do Al^{3+} com os grupos funcionais da superfície dos minerais é maior do que a dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (Sposito, 2008), sendo o último elemento a lixiviar no solo.

Uma característica positiva que tem sido observado em solos sob SPD é o aumento do teor de matéria orgânica no solo (MOS) com o tempo de cultivo (Zanatta et al., 2007). Este aumento da MOS reduz os efeitos nocivos da acidez do solo, principalmente pela liberação de compostos orgânicos, que formam complexos com o Al (Miyazawa et al., 1993), proporcionando altos rendimentos das culturas, mesmo em condições de elevada acidez do solo (Caires et al., 1998; Anghinoni & Salet, 2000; Vieira et al., 2009).

O método consolidado de correção da acidez do solo em SPD é a aplicação superficial de calcário, sem incorporação, preservando assim, as características principalmente físicas do solo, favoráveis à sua conservação e que foram obtidas ao longo dos anos (Mielniczuk et al., 2003). Os efeitos desta prática de calagem na neutralização da acidez do solo e no deslocamento de cátions básicos no perfil do solo ocorrem predominantemente até os 10 cm de

profundidade, mas também tem sido observado efeito nas camadas 10-20 e 20-40 cm (Caires et al., 1998).

A manifestação desses efeitos de correção da acidez do solo em camadas abaixo dos 10 cm de profundidade está relacionada com a qualidade e a dose de calcário aplicada, o tipo de solo, o sistema de rotação de culturas e de manejo dos resíduos das culturas e do regime pluviométrico (Anghinoni, 2006). Dentre os mecanismos que favorecem o deslocamento em profundidade dos efeitos da calagem superficial, pode ser citada a formação e migração de bicarbonatos de cálcio e magnésio (Oliveira & Pavan, 1996), o deslocamento de partículas finas de calcário em canais “preferenciais”, formados por raízes mortas e canais de insetos (Pavan, 1994; Gassen & Kochhann, 1998) e, a formação de pares iônicos, do cálcio e do magnésio com ácidos orgânicos hidrossolúveis.

2.2.2 Fósforo no solo

O SPD exerce importantes modificações na dinâmica dos nutrientes no solo, em especial, do fósforo. A formação do gradiente de concentração aumenta o teor deste nutriente em superfície, principalmente na camada 0-5 cm, quando a adubação é realizada a lanço, podendo se estender à camada ligeiramente mais profunda se a adubação é feita em linha com semeadora dotada de haste sulcadora, evoluindo no perfil do solo com o tempo de cultivo (Eltz et al., 1989; Schlindwein & Anghinoni, 2000; Ciotta et al., 2002; Costa et al., 2009). A intensidade desse processo é favorecida pelo uso de espécies com sistema radicular mais denso e agressivo (De Maria & Castro, 1993) e em solos com textura franca ou arenosa e não oxidicos, os quais apresentam menor capacidade de retenção deste nutriente em formas indisponíveis, pela quantidade (Muzilli, 1983) e tipo de argilominerais solo.

O maior teor de P do solo em SPD tem sido verificado em vários estudos (Selles et al., 1997; Ciotta et al., 2002; Rheinheimer & Anghinoni, 2003), sendo este efeito atribuído à adição desse nutriente nas camadas superficiais, ao não revolvimento do solo e à maior reciclagem pela mineralização dos resíduos (Sá, 1999, 2004). O não revolvimento do solo reduz o contato entre os colóides do solo e o íon fosfato, diminuindo as reações de

adsorção. Primeiramente ocorre a saturação dos sítios mais ávidos e o fósforo remanescente é redistribuído em frações retidas com menor energia e, por isso, de maior capacidade de dessorção, aumentando a sua disponibilidade às plantas (Rheinheimer & Anghinoni, 2001).

A resposta das culturas à adição de fósforo tem sido relativamente pequena e em doses baixas desse nutriente em solos sob SPD (Sá, 1999). Isso provavelmente ocorre em razão de se atingir rapidamente o teor crítico das culturas em solos sob SPD (Sá, 2004).

2.2.3 Potássio no solo

Com a adoção do SPD, a dinâmica do potássio no solo sofre algumas modificações, principalmente pelo aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo e por sua reciclagem através das culturas.

O aumento da CTC e do pH do solo, devido ao incremento do teor de matéria orgânica do solo e à calagem, respectivamente, aumentam a capacidade do solo reter K trocável e modificam a distribuição entre o K trocável e o K na solução do solo, reduzindo o seu teor na solução e, conseqüentemente, seu potencial de perdas por lixiviação (Sousa & Lobato, 2004).

Semelhantemente ao fósforo, a adição de adubo potássico superficialmente em solos sob SPD, o contínuo aporte de resíduos e o mínimo revolvimento do solo, propiciam uma grande concentração de potássio na camada superficial do solo (Amaral et al., 2004a; Costa, 2008). Em razão de sua rápida liberação dos resíduos das culturas, esse nutriente passa para o solo, formando um gradiente decrescente ao longo do perfil, a partir da superfície (Schlindwein & Anghinoni, 2000).

Em sistemas de produção onde há presença constante de culturas na superfície (ausência de pousio), o K é absorvido pelas plantas, permanecendo a maior parte do tempo no tecido vegetal, protegido de perdas por erosão e lixiviação. A quantidade de potássio absorvida pelas plantas geralmente é alta, que associado a uma pequena quantidade exportada pelos grãos (~20 %) (Ceretta, 2006), retorna ao sistema a maior parte deste nutriente, ciclando-o de forma intensa no solo. Após a senescência das plantas,

em razão de não constituir estruturas das plantas, sendo assim livre nos tecidos vegetais, o potássio pode facilmente ser deslocado pela ação da água, evidenciando a necessidade da presença constante de plantas em desenvolvimento em solos agrícolas, reciclando este nutriente e evitando perdas do sistema (Mielniczuk, 2005).

2.3 Amostragem de solo e camada diagnóstica em solos sob sistema plantio direto

A amostragem do solo é a primeira e principal etapa de um programa de avaliação da fertilidade do solo, pois é com base na análise química da amostra de solo que será realizada a interpretação e que serão definidas as doses de corretivos e de fertilizantes a serem aplicadas.

No sistema de preparo convencional, a camada diagnóstica da fertilidade é a camada arável do solo (0-20 cm), que é a camada mobilizada e uniformizada verticalmente durante o preparo do solo. Entretanto, no SPD a dinâmica dos nutrientes no solo é distinta, havendo a formação de um gradiente de concentração no perfil do solo, modificando a relação entre os nutrientes no solo preexistentes no preparo convencional (Rheinheimer & Anghinoni, 2001). Nessa condição, a determinação da camada diagnóstica a ser coletada no SPD torna-se mais complexa que no preparo convencional.

Em locais como o Cerrado brasileiro, o Estado de São Paulo e Minas Gerais, a camada diagnóstica a ser considerada no SPD não diferencia do preparo convencional, indicando a camada arável 0-20 cm para a amostragem em ambos os preparos (Raij et al., 1997; Ribeiro et al., 1999; Sousa & Lobato, 2004). Entretanto, nos Estados do RS e SC há uma distinção entre a camada a ser amostrada no preparo convencional e no SPD, indicando a camada de 0-20 cm para o preparo convencional e de 0-10 cm para o SPD consolidado (+5 anos) (CQFS-RS/SC, 2004).

A escolha pela camada 0-10 cm nos Estados do RS e SC está intimamente ligada ao fato de que as recomendações de adubação iniciais foram desenvolvidas para o preparo convencional. À medida que a adoção do SPD nestes Estados aumentou, intensificaram-se os conhecimentos das diferenças no manejo e na variabilidade vertical entre os dois sistemas de

manejo, destacando a necessidade da elaboração de uma recomendação de adubação direcionada ao SPD. Entretanto, a obtenção de novas curvas de calibração para recomendação de adubação no SPD demandaria tempo e recursos financeiros consideráveis, incentivando assim, a busca por alternativas de ajuste entre os dois sistemas de manejo (Anghinoni & Salet, 1998). Dentre as alternativas, o ajuste da profundidade de amostragem mostrou ser a alternativa mais prática e viável em curto prazo, devido à similaridade da configuração das curvas de rendimento das culturas no SPD e no cultivo convencional, sendo a camada 0-10 cm no SPD a que melhor se relaciona com os teores críticos da camada 0-20 no cultivo convencional (Anghinoni & Salet, 1998).

Aparentemente, a adoção da camada 0-10 cm no SPD tem apresentado boa relação com a camada 0-20 cm no preparo convencional. Porém, Schlindwein & Anghinoni (2000) verificaram que o ajuste da camada amostrada, para fins de recomendação de fósforo e potássio no SPD, somente justifica-se quando o solo apresenta teores desses nutrientes abaixo dos teores críticos, sendo o valor de ajuste menor que os 10 cm iniciais, em torno de 7 cm.

A recomendação da camada de amostragem 0-10 cm é plausível quando considerado em áreas onde a aplicação de fertilizantes e corretivos é na superfície do solo. Entretanto, a adição de fertilizantes na linha de semeadura, aliado à migração de nutrientes no perfil do solo com os anos de plantio direto, contribuem para o incremento dos teores de nutrientes abaixo dos 10 cm de profundidade (Costa et al., 2009), o que gera uma incerteza da camada 0-10 cm ser realmente a que melhor representa o solo no SPD consolidado após vários anos de cultivo.

Além disso, outro aspecto que gera dúvidas quanto à camada diagnóstica é a ocorrência de teores de nutrientes ou a acidez em valores restritivos ao desenvolvimento das culturas, em camadas subsuperficiais (10-20 cm). Ou seja, em uma condição em que a camada superficial estaria em boa condição de fertilidade, em regiões com alto potencial produtivo, o rendimento das culturas estaria sendo influenciado, principalmente, pelo nível de fertilidade das camadas subsuperficiais, o que não seria contemplado numa amostragem de 0-10 cm. Agrega-se a isto, o fato de que alguns estudos têm demonstrado que aproximadamente 40 a 50 % do sistema radicular das

culturas encontram-se abaixo de 10 cm de profundidade, o que torna essa camada fundamental quanto à disponibilidade hídrica, além de importante fonte de nutrientes para as culturas (Caires et al., 2004).

2.4 Recomendação de calagem, fósforo e potássio no Paraná

O Estado do Paraná não possui um sistema de recomendação de adubação e de calagem englobando rotação de culturas, mas indicações e recomendações técnicas obtidas através de pesquisas com cada cultura isoladamente. Além disso, as pesquisas ainda são incipientes e pouco detalhadas quando comparado às recomendações de adubação de São Paulo (Raij et al., 1997) e Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004).

A recomendação de calagem adotada pelo Paraná, semelhantemente à recomendação do estado de São Paulo (Raij et al., 1997), é calculada em função da porcentagem de saturação por bases (Embrapa, 2008b; RCBPTT, 2008). O cálculo da necessidade de calcário (NC) é feito utilizando a seguinte fórmula:

$$NC \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{[CTC \times (V2 - V1) \times f]}{100} \quad (1)$$

onde, CTC é a capacidade de troca de cátions em pH 7,0 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), obtido pela soma dos teores de Ca, Mg, K, Na e H + Al; V2 é a porcentagem desejada de saturação por bases; V1 é a porcentagem de saturação de bases fornecida pela análise do solo e; f é o ajuste do poder relativo de neutralização total (PRNT) do calcário, obtido pela fórmula $100/\text{PRNT}$.

Este método de cálculo da quantidade de calcário a aplicar no solo foi desenvolvido para o preparo convencional do solo. Para a correção do solo no SPD, a Embrapa (2008b) sugere uma aplicação do calcário em superfície, de apenas 1/3 da quantidade total calculada pela fórmula para atingir a saturação por bases desejada, considerando os valores utilizados para o cálculo da camada amostrada de 0-20 cm de profundidade.

O valor da porcentagem de saturação por bases recomendada bem como o valor considerado limite para a aplicação de calcário varia entre as culturas. Para o trigo e triticale, a recomendação é de aplicar calcário quando a porcentagem de saturação por bases for inferior a 50 %, visando atingir 60 %

(RCBPTT, 2008). Para a cultura da soja, a meta é a saturação por bases de 70 %, sendo citado o valor de 60 % como critério de decisão por calagem (Embrapa, 2006a; Embrapa, 2008b).

Para a adubação de fósforo na cultura do trigo e triticale, a indicação da quantidade a aplicar é baseada apenas no teor deste nutriente no solo (RCBPTT, 2008), diferentemente das recomendações para outros estados como RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004), MS e estados do Cerrado (DF, GO, MG, MT e BA) (Sousa & Lobato, 2004), que na recomendação de P consideram além do teor do nutriente, a classe textural do solo. A recomendação de potássio também é mais simplificada que os Boletins Técnicos acima citados, que consideram além do teor do nutriente no solo, a $CTC_{pH7,0}$. Segundo RCBPPT (2008), o teor crítico para o trigo e triticale é de 9 mg dm^{-3} para o fósforo e de 120 mg dm^{-3} para o potássio.

Para a cultura do milho não existem publicações técnicas e recomendações de pesquisa para adubação de fósforo e potássio para o Paraná. Entretanto, já existem resultados e recomendação de fertilizantes relativos à adubação nitrogenada para a região Centro-Sul do Paraná (Fontoura & Bayer, 2009). Mediante a ausência de recomendação de pesquisa para fósforo e potássio, a recomendação de adubação é realizada utilizando a recomendação do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004), pois dentre os boletins existentes, este é o que contempla resultados de pesquisa em solo e clima de maior semelhança ao Paraná.

A cultura da soja, devido à grande importância econômica envolvida, é a cultura que possui a recomendação mais evoluída e detalhada dentre as espécies cultivadas no Estado. A recomendação indica que as doses de fósforo e potássio sejam aplicadas de acordo com o teor do nutriente no solo. Em solos com teores de argila acima de 400 g kg^{-1} , o teor crítico de fósforo para a cultura da soja é de 6 mg dm^{-3} e de potássio é 120 mg dm^{-3} (Embrapa, 2008b). Para solos com teor de argila inferior a 400 g kg^{-1} , Embrapa (2008b) sugere utilizar a recomendação indicada para o arenito Caiuá, que deriva da recomendação de P e K para os solos do Cerrado (Sousa & Lobato, 1996). Nesta recomendação, o teor crítico para solos com teor de argila inferior a 200 g kg^{-1} é 18 mg P dm^{-3} e 14 mg P dm^{-3} para solos com 200 a 400 g kg^{-1} de

argila e, a aplicação de potássio, somente é recomendada para solos com teor de argila superior a 200 g kg^{-1} , com teor crítico de 50 mg K dm^{-3} .

Além da recomendação de adubação para a cultura da soja isolada, há uma recomendação para a soja sob SPD em sucessão com culturas de safrinha ou de inverno, que foi desenvolvida a partir de vários estudos em solos no Estado do Paraná (Lantmann et al., 1996). Nesta recomendação, preconiza-se a aplicação dos fertilizantes na cultura de inverno, que em geral, é mais exigente em fertilidade do solo. Assim, quando for realizada a devida adubação na cultura de inverno, na sucessão trigo/soja ou aveia/soja ou cevada/soja ou milho safrinha/soja, e o teor de fósforo na camada de 0-20 cm do solo estiver acima de $18,0 \text{ mg dm}^{-3}$ em solos com teor de argila inferior a 200 g kg^{-1} , 14 mg dm^{-3} em solos com teor de argila entre 200 e 400 g kg^{-1} e 9 mg dm^{-3} em solos com teor de argila superior a 400 g kg^{-1} , e o potássio estiver acima de 120 mg dm^{-3} , em todos os tipos de solo, é possível suprimir a adubação com fósforo e potássio na cultura da soja no SPD (Embrapa, 2008b). Contudo, os autores destacam que a decisão final de adubar ou não a cultura da soja, após o cultivo anterior devidamente adubado, fica a critério do profissional da Assistência Técnica, conhecedor do histórico de uso e da fertilidade do solo da área.

2.5 Estudos de calibração - determinação do teor crítico e faixas de fertilidade

Um sistema de recomendação de adubação tem por objetivo elevar o teor dos nutrientes no solo a níveis considerados adequados para as culturas expressarem seu potencial de rendimento, sempre que os demais fatores não sejam limitantes (CQFS-RS/SC, 2004). As alternativas oferecidas para atingir essa meta adaptam-se às diferentes condições de manejo e de economia dos diferentes sistemas de produção.

A criação de curvas de calibração de nutrientes é baseada geralmente na expectativa de rendimento das culturas, delimitando classes de disponibilidade de nutrientes através da relação entre os teores de nutrientes no solo e a resposta da planta (rendimento relativo) (Raj et al., 1997; CQFS-RS/SC, 2004; Cubilla et al., 2007). Baseado na análise das curvas de resposta, o solo é enquadrado em classes de disponibilidade, que varia de acordo com o

detalhamento da recomendação. A CQFS-RS/SC (2004) separa os teores de fósforo e potássio em cinco classes, muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, onde o nível crítico é o limite superior do teor médio para cada nutriente e, representa o teor do nutriente no solo em que é obtido o máximo rendimento econômico da cultura (~90 % do rendimento máximo).

A determinação das classes de disponibilidade de nutrientes no solo é importante porque elas definem a “probabilidade de resposta das culturas à adubação”. Normalmente, são definidas três faixas de disponibilidade a partir dos teores de nutrientes no solo. A primeira faixa contempla as classes de disponibilidade abaixo do nível crítico, que são “muito baixo”, “baixo” e “médio”, sendo a adubação realizada sobre esta faixa denominada de adubação de correção, onde há moderada a alta probabilidade de resposta econômica das culturas à adição do nutriente. A segunda faixa contempla a classe de disponibilidade “alto”, onde há uma baixa probabilidade de resposta econômica das culturas à adição do nutriente, sendo recomendada a aplicação da quantidade exportada do nutriente acrescida de 20 a 30% em razão da ocorrência de perdas de nutrientes no processo, sendo assim denominada de adubação de manutenção. A terceira faixa é quando o teor no solo é considerado “muito alto”, apresentando uma probabilidade de resposta à adição do nutriente muito baixa, sendo recomendada uma adubação de reposição, ou seja, a aplicação apenas da quantidade do nutriente exportada pelas culturas, sendo possível em alguns casos até suspender temporariamente a adição de fertilizante (CQFS-RS/SC, 2004).

3. HIPÓTESES

- A aplicação de calcário e de fertilizantes fosfatados e potássicos na superfície do solo favorece o acúmulo de nutrientes na camada de 0-10 cm. Entretanto, as características de solo proporcionadas pelo sistema plantio direto consolidado, aliadas à aplicação de fertilizantes na linha de semeadura, favorecem a melhoria da fertilidade também de camadas de solo mais profundas, sendo a camada de 0-20 cm a que melhor representa a condição de fertilidade dos solos em plantio direto.

- Os critérios de calagem e os teores críticos de fósforo e potássio são dependentes do tipo de solo e das culturas, sendo a condição regional do Centro-Sul do Paraná diferente das demais recomendações.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivos gerais

- Fornecer subsídios para a elaboração de um sistema de recomendação de calagem e adubação fosfatada e potássica para soja, milho e cereais de inverno em rotação de culturas sob sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar a camada de solo no sistema plantio direto que melhor representa a condição de fertilidade do solo em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná.

- Estabelecer critérios de calagem para os solos em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná.

- Estabelecer teores críticos de fósforo e potássio para os solos em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Descrição da região

A região Centro-Sul do Paraná está localizada no terceiro planalto fisiográfico do Paraná, numa altitude de 800 a 1200 m. O clima é subtropical úmido, do tipo Cfb (Köppen), sem estação seca e com geadas severas bastante frequentes. A média de temperatura dos meses mais quentes é 21 °C e dos meses mais frios é 13 °C (Figura 1).

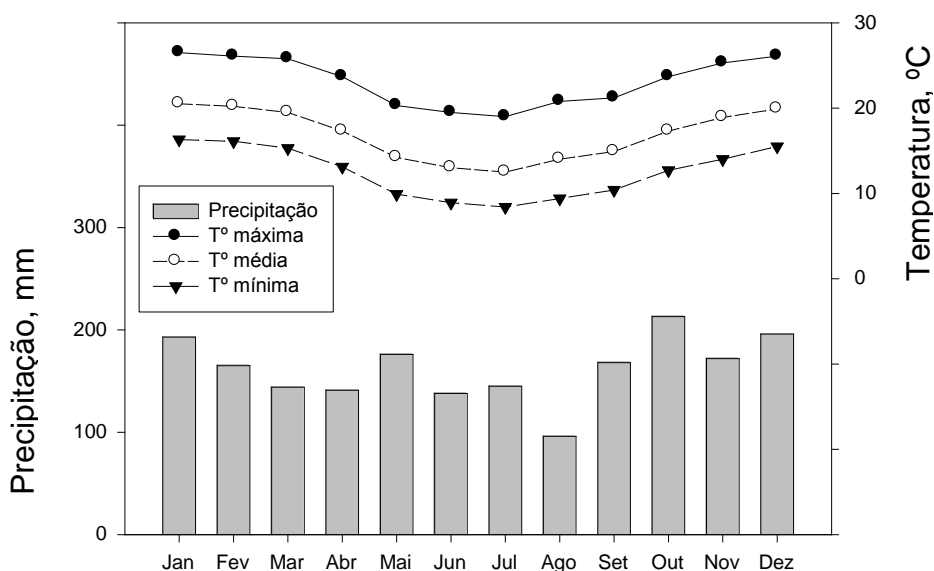


FIGURA 1. Dados médios de precipitação e temperaturas mínima, média e máxima em Entre Rios, Guarapuava, PR, no período compreendido entre 1976 e 2007. Fonte: Estação meteorológica da FAPA.

Os solos da região Centro-Sul do Paraná são originados principalmente de rochas eruptivas da formação Serra Geral, com predominância de basalto (Embrapa, 1984). Predominam os Latossolos, em especial o Latossolo Bruno aluminico (Embrapa, 2006b), argiloso, profundo, bem drenado, com alta saturação por alumínio em sua condição natural, associado ao relevo suave ondulado. Estes solos abrangem uma área de cerca de 1700 km² (Eltz et al., 1989), estando localizados predominantemente nos municípios de Guarapuava, Pinhão e Candói (Figura 2).

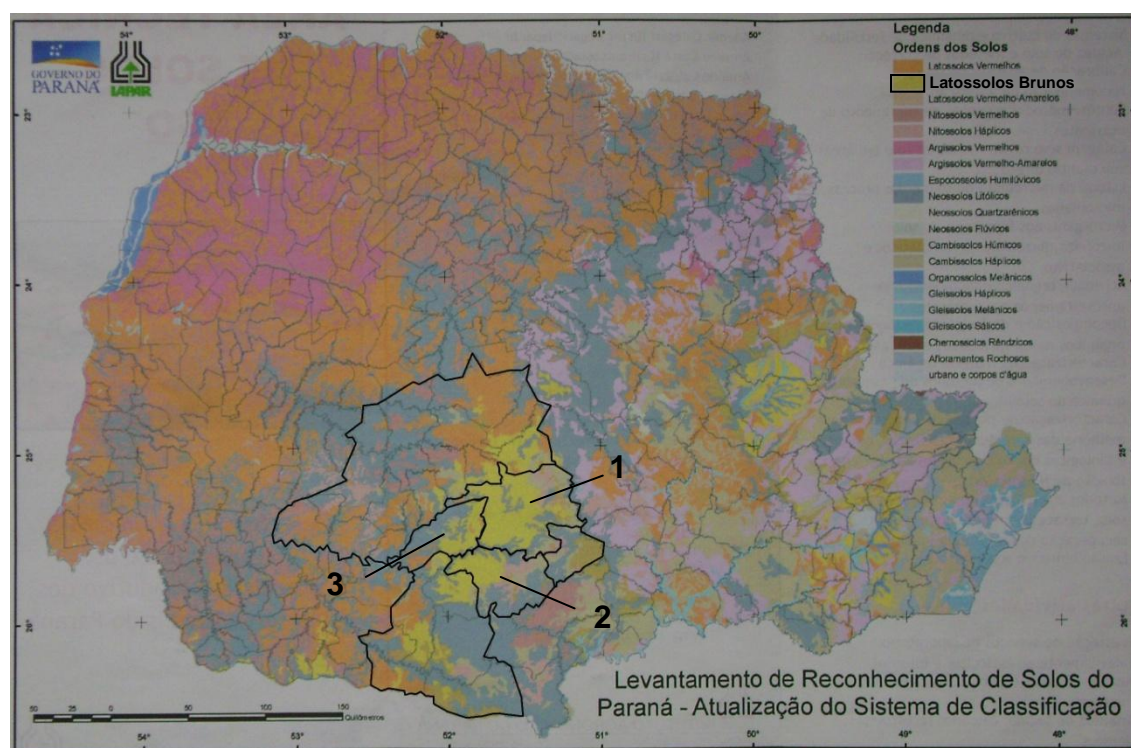


FIGURA 2. Municípios de Guarapuava (1), Pinhão (2) e Candói (3), destacados na região Centro-Sul do Paraná. Fonte: IAPAR.

A condição térmica da região associada à alta precipitação pluviométrica ($\sim 1955 \text{ mm ano}^{-1}$) resultou em altas taxas de intemperismo e lixiviação de silício e de bases (Ca, Mg, Na e K). Assim, neste solo observa-se na fração argila (610 g kg^{-1}), a ocorrência de aproximadamente 70 g kg^{-1} de óxidos de ferro (com aproximadamente 80 % de goethita) e, 540 g kg^{-1} de caulinita + gibbsita (com aproximadamente 74 % de gibbsita) (Inda Junior et al., 2007). Esta constituição mineralógica confere ao Latossolo Bruno aluminico, algumas características específicas, como a forte estabilidade de microagregados, resultante da interação dos óxidos com o carbono orgânico

(Dick & Schwertmann, 1996; Inda Junior et al., 2007), alta capacidade de adsorção de P e CTC dependente da MO.

A características de clima e de solo da região Centro-Sul do Paraná, aliado ao emprego de alta tecnologia na agricultura, proporciona a esta região um alto potencial produtivo, evidenciados com rendimentos médios de soja acima de 3,2 Mg ha⁻¹ e de milho acima de 10,2 Mg ha⁻¹ (Agrária, 2009), razão esta que incentivou esta pesquisa na região.

5.2 Descrição dos experimentos

A execução deste estudo foi possível pela parceria do Departamento de Solos da UFRGS com a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), da Cooperativa Agrária. Assim, os experimentos foram todos localizados na área de abrangência da Cooperativa Agrária, representados pelos municípios de Guarapuava, Pinhão e Cândói, na região Centro-Sul do Paraná.

Três experimentos de calibração de fósforo, três de calibração de potássio e dois experimentos com calagem foram instalados especificamente para este estudo (2008 - 2009), visando à definição dos teores críticos de P e K e dos critérios de calagem. Contudo, com o objetivo de qualificar as conclusões do estudo, foram acrescentados resultados de outros cinco experimentos conduzidos pela FAPA, com período de condução a campo variando de 4 a 10 anos. Dentre estes, três experimentos envolvem calagem e dois experimentos envolvem P e K.

Assim, para o estudo da camada diagnóstica, dos critérios de calagem e dos teores críticos de fósforo e de potássio no sistema plantio direto (SPD) foi utilizado um total de 13 experimentos, sendo cinco experimentos relacionados com calagem, três experimentos com fósforo, três experimentos com potássio e, dois experimentos englobando fósforo e potássio (Tabela 1). Todos os experimentos foram conduzidos em áreas sob SPD consolidado (+10 anos), com rotação de culturas, em Latossolos Brunos. As análises de solo na instalação dos experimentos de calagem, de P e K encontram-se na tabela 2.

TABELA 1. Características dos experimentos utilizados na definição da camada diagnóstica, dos critérios de calagem e dos teores críticos de fósforo e potássio.

Experimento	Local	Período	Delineamento	Rep	Culturas ⁽¹⁾	Tratamentos
Calagem						
<i>- Experimentos implantados neste estudo</i>						
1-Calagem (Pinhão)	Pinhão	2008-2009	Blocos ao acaso	4	AB, S, N	Calcário: 0, 0,2, 2,3, 4,4 e 7,3 Mg ha ⁻¹ para elevar a saturação por bases a 50, 65, 80 e 100%.
2-Calagem (Candói)	Candói	2008-2009	Blocos ao acaso	4	T, S, C	Calcário: 0, 0,8, 3,2, 5,6 e 8,7 Mg ha ⁻¹ para elevar a saturação por bases a 50, 65, 80 e 100%.
<i>- Experimentos conduzidos pela FAPA</i>						
3-Calagem x gesso	Guarapuava	2004-2009	Blocos ao acaso em parcelas subdivididas	3	AB, N, C, T, M, S	Parcela: testemunha, calcário normal, filler e filler parcelado (p/ elevar a saturação por bases a 70%) Subparcela: Gesso (0, 3, 6 e 9 Mg ha ⁻¹)
4-Calagem x pré-culturas	Guarapuava	2004-2009	Blocos ao acaso em parcelas subdivididas	4	AB, AC, N, C, T, M, S	Parcela: 3 rotações de culturas Subparcela: Calcário (0, 2, 4 e 8 Mg ha ⁻¹)
5-Calagem x fósforo	Candói	2000-2003	Blocos ao acaso em fatorial	3	AB, T, C, S, M	Calcário: 0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10 Mg ha ⁻¹ aplicado em dose única e parcelado em 2 anos
Fósforo e Potássio						
<i>- Experimentos implantados neste estudo</i>						
6-P-Guarapuava	Guarapuava	2008-2009	Blocos ao acaso com parcelas subdivididas	4	AB, S, N	Parcela: 0, 80, 160, 320 e 640 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ Subparcela: sem e com reaplicação de P
7-P-Pinhão	Pinhão	2008-2009	Blocos ao acaso com parcelas subdivididas	4	C, S, N	Parcela: 0, 80, 160, 320 e 640 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ Subparcela: sem e com reaplicação de P
8-P-Candói	Candói	2008-2009	Blocos ao acaso com parcelas subdivididas	4	T, S, C	Parcela: 0, 80, 160, 320 e 640 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ Subparcela: sem e com reaplicação de P
9-K-Guarapuava	Guarapuava	2008-2009	Blocos ao acaso com parcelas subdivididas	4	AB, S, N	Parcela: 0, 80, 160, 320 e 640 kg K ₂ O ha ⁻¹ Subparcela: sem e com reaplicação de K
10-K-Pinhão	Pinhão	2008-2009	Blocos ao acaso com parcelas subdivididas	4	C, S, N	Parcela: 0, 80, 160, 320 e 640 kg K ₂ O ha ⁻¹ Subparcela: sem e com reaplicação de K
11-K-Candói	Candói	2008-2009	Blocos ao acaso com parcelas subdivididas	4	T, S, C	Parcela: 0, 80, 160, 320 e 640 kg K ₂ O ha ⁻¹ Subparcela: sem e com reaplicação de K
<i>- Experimentos conduzidos pela FAPA</i>						
12-P e K média fertilidade	Guarapuava	1999-2006	Blocos ao acaso com parcelas subdivididas	4	AB, T, C, N, M, S	Parcela: 3 sistemas de rotação de culturas Subparcelas: Testemunha (sem P e K), dose recomendada na linha e à lanço, meia dose recomendada na linha e à lanço
13-P e K alta fertilidade	Guarapuava	1997-2006	Blocos ao acaso com parcelas subdivididas	3	AB, T, C, N, M, S	Parcela: 3 sistemas de rotação de culturas Subparcelas: Testemunha (sem P e K), dose recomendada na linha e à lanço, meia dose recomendada na linha e à lanço

⁽¹⁾ Culturas, AB: aveia branca, AC: aveia branca utilizada como cobertura do solo, T: trigo, C: cevada, S: soja, M: milho, N: nabo forrageiro

TABELA 2. Análise do solo (0-20 cm) das áreas experimentais antes da instalação dos experimentos de calagem, fósforo e potássio.

Experimento	MO g dm ⁻³	pH CaCl ₂	Al	Ca	Mg	CTC _{pH7,0}	K	P	V	Al
				cmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³		%	%
Calagem										
1-Calagem (Pinhão)	51,6	4,8	0,09	4,6	1,6	13,5	212	5,4	49	1,3
2-Calagem (Candói)	75,7	4,8	0,04	4,4	2,3	15,2	87	4,9	45	0,6
3-Calagem x gesso e 4-Calagem x pré-culturas	46,9	4,8	0,05	5,5	2,0	16,3	160	21,4	49	0,6
5-Calagem x fósforo	51,7	4,9	0,67	2,1	0,7	13,5	107	4,9	23	18,5
Fósforo e Potássio										
6-P-Guarapuava e 9-K-Guarapuava	49,3	5,2	0,04	5,7	3,3	15,9	194	14,3	58	0,5
7-P-Pinhão e 10-K-Pinhão	51,6	4,8	0,09	4,6	1,6	13,5	212	5,4	49	1,3
8-P-Candói e 11-K-Candói	75,7	4,8	0,04	4,4	2,3	15,2	87	4,9	45	0,6
12-P e K média fertilidade	-	-	-	-	-	-	108	14,7	-	-
13-P e K alta fertilidade	-	-	-	-	-	-	150	17,8	-	-

O manejo da adubação de N, P e K nos experimentos de calagem, de N e P nos experimentos de K, e de N e K nos experimentos de P, foi baseado nas recomendações existentes para as culturas utilizadas (Embrapa, 2007, 2008a; Embrapa, 2008b; Fontoura & Bayer, 2009).

5.2.1 Experimentos implantados neste estudo

5.2.1.1 Experimentos de calagem nas localidades de Pinhão e Candói

Os dois experimentos foram instalados em maio de 2008 em duas áreas de produtores rurais. O experimento de Calagem em Pinhão foi instalado na Fazenda Campo Bonito, de propriedade do Sr. Eduardo Rheinhofer. O experimento de Calagem em Candói foi instalado na Fazenda Santa Clara, de propriedade do Sr. Hermine Leh.

O delineamento experimental dos dois experimentos foi de blocos ao acaso com quatro repetições. Nas parcelas (9,6 x 10 m) aplicaram-se doses de calcário com a finalidade de elevar a saturação por bases a 50, 65, 80 e 100 %, além de uma testemunha sem adição de calcário. As doses aplicadas para atingir as respectivas saturações por bases foram de 0,2, 2,3, 4,4 e 7,3 Mg ha⁻¹ de calcário no experimento de Calagem (Pinhão) e 0,8, 3,2, 5,6 e 8,7 Mg ha⁻¹ de calcário no experimento de Calagem (Candói).

A aplicação de calcário foi realizada à lanço, na superfície do solo, na implantação dos experimentos, antecipando a semeadura da cultura de

inverno. As culturas empregadas no experimento Calagem (Pinhão) foram aveia branca/soja e nabo forrageiro e, no experimento Calagem (Candói), trigo/soja e cevada.

Amostras de solo foram coletadas semestralmente, após a colheita de cada cultura, nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

5.2.1.2 Experimentos de fósforo e potássio nas localidades de Guarapuava, Pinhão e Candói

Um experimento com doses de fósforo e um de potássio foram instalados nos municípios de Guarapuava, Pinhão e Candói. No município de Guarapuava, os experimentos de P e K foram instalados na área experimental pertencente à FAPA, localizada na Colônia Vitória, no Distrito de Entre Rios. Nos municípios de Pinhão e Candói, os experimentos foram instalados em áreas cedidas por produtores, sendo a primeira área na Fazenda Campo Bonito (Pinhão), de propriedade do Sr. Eduardo Rheinhofer, e a segunda, na Fazenda Santa Clara (Candói), pertencente ao Sr. Hermine Leh (ao lado dos experimentos Calagem (Pinhão) e Calagem (Candói)).

O delineamento experimental nos experimentos de P e K foi de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas principais (9,6 x 10 m) foram adubadas com doses de P_2O_5 no experimento de fósforo (0, 80, 160, 320 e 640 kg ha⁻¹) e doses de K_2O no experimento de potássio (0, 80, 160, 320 e 640 kg ha⁻¹), cuja aplicação foi realizada à lanço, antecedendo a semeadura das culturas no inverno de 2008, e visou a criação de níveis de fertilidade. As parcelas principais foram divididas em duas subparcelas (4,8 x 10 m) no verão 2008/09, mantendo uma subparcela sem aplicação do nutriente (P ou K) e a outra subparcela com reaplicações a cada safra, utilizando na reaplicação a dose recomendada para a cultura semeada. Desta forma, obtiveram-se cinco níveis de fertilidade do solo a partir da aplicação das doses iniciais de P ou K.

As culturas utilizadas nos experimentos no período do inverno 2008 ao inverno 2009 foram aveia branca/soja e nabo forrageiro nos experimentos de P e K - Guarapuava, cevada-soja-nabo forrageiro nos P e K - Pinhão e trigo-soja-cevada nos P e K - Candói. Na cultura da soja no verão 2008/09, nos três

locais, a reaplicação dos nutrientes consistiu em 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de K₂O. Na cultura da cevada, semeada no inverno 2009 no experimento Candói, a reaplicação consistiu em 105 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 70 kg ha⁻¹ de K₂O.

As coletas de solo foram realizadas semestralmente, após a colheita das culturas (cereais de inverno 2008 e soja 2008/09), nas profundidades de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de profundidade.

5.2.2 Experimentos conduzidos pela FAPA

5.2.2.1 Experimento de calagem com gesso

O experimento foi realizado na área experimental da FAPA, no município de Guarapuava. Nas parcelas (19,2 x 16,0 m) foram alocados os tratamentos de calagem (testemunha, calcário normal, filler e filler parcelado) e nas subparcelas (4,8 x 16,0 m) os tratamentos de gesso (0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹), aplicados à lanço na superfície do solo. Os tratamentos de calcário normal, calcário filler e gesso foram aplicados em uma única vez, no inverno de 2004 e o tratamento de calcário filler parcelado foi aplicado em três vezes, sendo 1/3 no inverno de 2004, 1/3 em 2005 e 1/3 em 2006. A dose de calcário visou aumentar a saturação de bases para 70%.

O sistema de rotação de culturas utilizado nesse experimento foi: aveia branca/soja, nabo forrageiro/milho, trigo/soja e, cevada/soja, sendo que, as culturas do nabo e da cevada não foram utilizadas no estudo, devido a primeira ser uma cultura de cobertura do solo e a segunda em razão de intempéries ocorridas durante o seu ciclo.

Amostras de solo foram coletadas no inverno de 2005, 2006, 2007 e 2009, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

5.2.2.2 Experimento de calagem com pré-culturas

Este experimento foi instalado no inverno de 2004, na mesma área experimental do experimento Calagem x Gesso (FAPA). Nas parcelas principais (12,8 x 20 m), foram adotados três sistemas de rotação de culturas,

diferenciando-os pela cultura de inverno. Os sistemas de rotação de culturas foram: (1) aveia preta/soja, nabo forrageiro/milho, aveia preta/soja, nabo forrageiro/soja e, aveia preta/soja; (2) nabo forrageiro/soja, aveia preta/milho, nabo forrageiro/soja, aveia preta/soja e, nabo forrageiro/soja, e; (3) cevada/soja, aveia branca/milho, trigo/soja, cevada/soja e, aveia branca/soja. Nas subparcelas (6,4 x 10,0 m), os tratamentos foram uma testemunha e três doses de calcário (2, 4 e 8 Mg ha⁻¹), objetivando aumentar a saturação de bases do solo para, respectivamente, 65, 75 e 100%.

Cinco amostragens de solo foram realizadas, em novembro de 2004, maio de 2005, abril de 2006, maio de 2007 e maio de 2009. As camadas amostradas foram 0-20, 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

Dentre as culturas utilizadas no experimento, não entraram para o estudo as culturas de cobertura (nabo forrageiro e aveia preta), por não produzirem grãos, bem como a cultura da soja na safra 2007/08 e da aveia branca 2008, devido à ausência de coleta de solo no ano de 2008.

5.2.2.3 Experimento de calagem com fósforo

O experimento foi conduzido de 2000 a 2003, na Fazenda Curucaca, no município de Candói. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial, com três repetições, com as dimensões de cada parcela de 6,4 x 8 m. Os dez tratamentos foram compostos pelo parcelamento (uma e duas vezes) e cinco doses de calcário dolomítico (0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0 Mg ha⁻¹), aplicadas à lanço, calculadas visando elevar a saturação por bases do solo para 30, 50, 70 e 90 %.

A aplicação de calcário, em uma única vez (sem parcelamento), foi realizada em junho de 2000 e os tratamentos com aplicação parcelada em duas vezes foi realizada metade em junho de 2000 e metade em julho de 2001. Uma única aplicação de fósforo foi realizada no experimento, por ocasião da instalação, antecedendo a cultura do trigo (2000), sendo de 64 kg P₂O₅ ha⁻¹. O sistema de rotação de culturas utilizado foi trigo/soja, aveia branca/milho e, cevada/soja.

Amostras de solo foram coletadas em julho e outubro de 2000, maio de 2001, junho de 2002 e junho de 2003, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

5.2.2.4 Experimentos de fósforo e potássio em solos com média e alta fertilidade

Os experimentos foram conduzidos em duas áreas experimentais da FAPA, no município de Guarapuava. O primeiro experimento foi instalado no inverno de 1999, em um área de média fertilidade, com teor de P e K no solo amostrado na camada 0-20 cm anterior à instalação do experimento de $14,7 \text{ mg P dm}^{-3}$ e 108 mg K dm^{-3} . O segundo experimento foi instalado no verão de 1997/98, em uma área de alta fertilidade, apresentando teores iniciais de P e K de $17,8 \text{ mg P dm}^{-3}$ e 150 mg K dm^{-3} .

O delineamento utilizado nos dois experimentos foi de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com quatro repetições na área de média fertilidade e três repetições na área de alta fertilidade. Nas parcelas principais foram conduzidos três sistemas de rotação de culturas e, nas subparcelas, cinco tratamentos, que consistiram na testemunha (sem P e K), na dose recomendada de P e K aplicada na linha e à lanço e na meia dose recomendada aplicada na linha e à lanço. A dose recomendada correspondeu a 40 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 40 kg ha^{-1} de K_2O para a soja, 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 60 kg ha^{-1} de K_2O para o milho e a cevada e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 40 kg ha^{-1} de K_2O para o trigo. Todos os tratamentos receberam nitrogênio na semeadura (linha) e em cobertura, com exceção à cultura da soja.

O experimento de média fertilidade foi conduzido do ano de 1999 até 2005/06. Os três sistemas de rotação de culturas foram: (1) cevada/soja, nabo forrageiro/milho, trigo/soja, cevada/soja, nabo forrageiro/milho e, aveia branca/soja; (2) trigo/soja, cevada/soja, nabo forrageiro/milho, aveia branca/soja, cevada/soja e, nabo forrageiro/milho, e; (3) nabo forrageiro/milho, trigo/soja, cevada/soja, nabo forrageiro/milho, aveia branca/soja e, cevada/soja.

O experimento de alta fertilidade foi conduzido do ano de 1997/98 até 2006. Os três sistemas de rotação de culturas foram: (1) milho, trigo/soja, cevada/soja, nabo forrageiro/milho, aveia branca/soja, cevada/soja, nabo

forageiro/milho, aveia branca/soja e, trigo/soja; (2) soja, nabo forrageiro/milho, trigo/soja, cevada/soja, nabo forrageiro/milho, aveia branca/soja, cevada/soja, nabo forrageiro/milho e, aveia branca/soja, e; (3) soja, cevada/soja, nabo forrageiro/milho, trigo/soja, cevada/soja, nabo forrageiro/milho, aveia branca/soja, cevada/soja e, nabo forrageiro/milho.

Amostras de solo foram coletadas nos dois experimentos em cada tratamento após a colheita das culturas, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

5.3 Análises de solo

Nos experimentos direcionados ao estudo de calagem, os atributos avaliados nas análises de solo realizadas foram pH do solo em CaCl_2 , saturação por bases (V %), alumínio trocável e a saturação por alumínio (Al %), segundo metodologias descritas em Tedesco et al. (1995). Para os experimentos de P e K, o teor de P e K disponível nas amostras de solo foram avaliados pelo extrator ácido Mehlich-1 (Tedesco et al., 1995).

Eventuais análises do pH do solo que foram realizadas em água, foram transformadas para pH em CaCl_2 pela subtração de 0,6 unidades de pH, conforme a relação obtida entre o pH do solo em H_2O e em CaCl_2 , previamente desenvolvida pela FAPA na região em estudo (Fontoura 2009, comunicação pessoal).

5.4 Coletas de amostras de biomassa vegetal e análises

Amostras de biomassa foram coletadas nos experimento de fósforo e potássio, em Guarapuava, Pinhão e Cândói.

No estágio de florescimento pleno coletou-se a folha índice das culturas - folha bandeira nas culturas de inverno e o primeiro trifólio plenamente desenvolvido na soja (trifólio maduro) - perfazendo a amostragem de 30 plantas por parcela. A matéria seca foi avaliada no início do enchimento de grãos, coletando nas culturas de inverno quatro metros lineares por parcela em duas repetições de dois metros. No verão (soja) foram coletados dois metros lineares por subparcela. As amostras foram secas e pesadas, para

quantificação do acúmulo de matéria seca. Por ocasião da colheita dos grãos, foi reservada uma amostra para posterior análise dos teores de P e K nos grãos no laboratório.

As amostras de tecido vegetal de folha índice, matéria seca e grãos foram secas a 60°C até peso constante, seguido de moagem e análise do teor de P e K por digestão ácida (Tedesco et al., 1995) e determinação de P em fotocolorímetro (Murphy & Riley, 1962) e K em fotômetro de chama.

A avaliação dos teores de P e K na folha índice e a quantidade absorvida de P e K pelas culturas tiveram como objetivo auxiliar na avaliação da camada diagnóstica da fertilidade do solo a partir da relação destes com os teores de P e K do solo nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade.

5.5 Análise e definição da camada diagnóstica da fertilidade do solo

Para o estudo da camada diagnóstica foram calculados os coeficientes de correlação entre o rendimento das culturas e os atributos do solo avaliados na camada 0-10 e 0-20 cm de profundidade. Nos experimentos que dispunham apenas das análises de solo nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, a camada de 0-20 cm foi calculada pela média aritmética entre estas duas camadas.

Os coeficientes de correlação foram calculados para as culturas de soja, milho e cereais de inverno (aveia branca, trigo e cevada), discriminadas dentro de cada experimento. No caso de algum experimento apresentar mais de uma safra da mesma cultura, o rendimento de cada safra foi transformado em rendimento relativo conforme a equação descrita abaixo (2), possibilitando a correlação com as várias safras.

$$RR = \frac{\text{rendimento da cultura no tratamento}}{\text{rendimento máximo da cultura}} \times 100 \quad (2)$$

Nos experimentos de calagem, os atributos do solo correlacionados com o rendimento das culturas foram pH, V %, Al trocável e Al %. Nos experimentos de fósforo, correlacionou-se o rendimento de grãos com o P disponível no solo e no experimento de potássio, com o K disponível no solo.

A partir dos coeficientes de correlação (r) obtidos para as culturas dentro de cada experimento, calculou-se o r ponderado para cada cultura, nas

profundidades de 0-10 e 0-20 cm, segundo a equação 3. Desta forma, os coeficientes de correlação obtidos a partir de várias safras da cultura terão maior peso no r ponderado e, conseqüentemente, maior proporção na decisão pela camada diagnóstica. Apenas os experimentos com r significativo ($p < 0,10$) foram utilizados no cálculo.

$$r \text{ ponderado} = \frac{\sum(n^{\circ} \text{ safras em cada experimento} \times r \text{ em cada experimento})}{n^{\circ} \text{ de safras da cultura}} \times 100 \quad (3)$$

Além das correlações entre o rendimento das culturas e os atributos do solo, realizaram-se correlações entre o teor de P e K em atributos de planta (folha índice, matéria seca e grãos) dos experimentos de P e K – Guarapuava, Pinhão e Candói, e os teores destes nutrientes no solo nas camadas 0-10 e 0-20 cm de profundidade.

5.6 Determinação do rendimento relativo e construção das curvas de resposta

O rendimento relativo de grãos nos experimentos de calagem foi calculado atribuindo-se o valor 100 para o maior rendimento de grãos da cultura na safra avaliada, calculando o rendimento dos demais tratamentos proporcionais a este (Equação 2).

Relações entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores da acidez do solo foram estabelecidas. Nestas relações, utilizaram-se preferencialmente valores da amostragem de solo anterior à semeadura da safra analisada. Entretanto, como nestes experimentos as análises de solo não foram realizadas semestralmente, para algumas safras utilizou-se a análise de solo posterior à colheita dos grãos. As safras que não dispunham de análise de solo anterior à semeadura ou posterior a colheita não foram utilizadas para o estudo, bem como as culturas de inverno utilizadas apenas como cobertura do solo.

Nos experimentos de fósforo e potássio, o rendimento relativo foi calculado atribuindo-se o valor 100 ao tratamento com maior rendimento na safra em estudo, calculando apenas o rendimento dos tratamentos testemunha que não tiveram a aplicação de P ou K na semeadura proporcional a este. Este critério visa descartar o efeito do fertilizante aplicado na semeadura, selecionando apenas o real rendimento relativo proporcionado pelo teor de P

ou K no solo no momento da semeadura. Assim, na construção das curvas de resposta para fósforo e potássio, os valores de rendimento relativo foram relacionados com os respectivos teores de nutrientes no solo (Mehlich-1) obtidos em análise anterior à semeadura.

5.7 Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio

Relações entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores da acidez do solo foram construídas. Os critérios de calagem foram estabelecidos segundo a metodologia dos quadrantes adaptada de Cate & Nelson (1971). Nesta metodologia, realiza-se a divisão do gráfico em quatro quadrantes (Figura 3), fixando a divisão horizontal no valor de rendimento relativo de 90 % e variando a divisão vertical para a definição do critério de calagem. Assim, no primeiro e segundo quadrante observam-se situações de alto rendimento de grãos em condição de baixo e alto teor no solo e, no terceiro quadrante, condições de baixo rendimento com teor no solo também baixo. Entretanto, no quarto quadrante, a condição de alto teor no solo com baixo rendimento das culturas é indesejável, por isso, para a definição do critério de calagem, aceitou-se que apenas 20 % dos valores acima do teor crítico estivessem abaixo do rendimento relativo de 90 % e nunca inferior a 80 %.

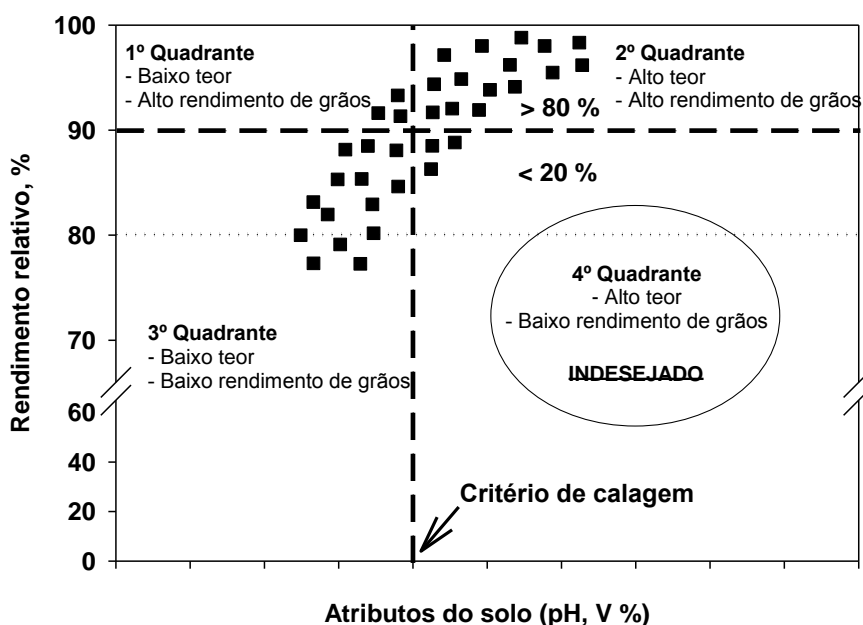


FIGURA 3. Esquema teórico da divisão por quadrantes para a definição dos critérios de calagem.

Para a definição dos teores críticos de P e K, os rendimentos relativos das culturas foram relacionados com o teor do nutriente no solo. A equação de Mitscherlich foi escolhida para o ajuste dos pontos em razão de apresentar bons coeficientes de determinação (r^2) com os dados. Esta equação caracteriza-se por ser uma equação exponencial, a qual é forçada a alcançar o rendimento relativo de 100 % (Equação 4).

$$y = A(1 - 10^{-bx}) \quad (4)$$

Onde y representa o rendimento relativo; A representa a produtividade máxima (fixado em 100); b é o coeficiente de eficácia do elemento; e x é o teor do nutriente no solo em mg dm^{-3} .

O teor crítico de P e K foi definido como o valor do nutriente no solo que proporcionou 90% do rendimento máximo das culturas (ajustado pela equação de Mitscherlich), que é considerado em geral, o ponto de maior retorno econômico das culturas à adubação (CQFS-RS/SC, 2004).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho estão divididos em cinco subitens. Inicialmente são explorados os resultados de fertilidade do solo e os rendimentos das culturas nos experimentos de calagem (6.1), fósforo e potássio (6.2). A interpretação destes resultados visa suporte à análise da camada diagnóstica (6.3), à definição dos critérios de calagem e os teores críticos de fósforo e potássio (6.4 e 6.5).

6.1 Fertilidade do solo e rendimento das culturas nos experimentos com calagem

As áreas experimentais de calagem apresentaram solos com uma acidez inicial baixa a moderada, apresentando variação de pH em CaCl_2 de 4,3 a 4,8 na camada de 0-20 cm (Tabelas 3 e 4). A obtenção de áreas com baixa fertilidade do solo, que apresentem alta acidez e baixos teores de nutrientes é uma dificuldade de pesquisa na região em estudo, devido ao alto investimento dos produtores na correção e manutenção da fertilidade do solo.

Em todos os experimentos de calagem, a adição de calcário aumentou o pH e a V % do solo, atingindo valores máximos de pH de 5,4 e V % de 80% na camada de 0-20 cm, e reduzindo os teores de alumínio trocável e a saturação por alumínio. Valores considerados baixos de Al trocável e Al % foram observados nos tratamentos em que a calagem elevou o pH acima de 5,0 (Al trocável < 0,10 e Al % < 0,5 %) (Tabelas 3 e 4).

TABELA 3. Atributos do solo (pH em CaCl₂, saturação por bases (V %), alumínio trocável e saturação por alumínio (Al %)) após um ano da aplicação de calcário nas localidades de Pinhão e Candói, nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de profundidade.

Experimento	pH CaCl ₂			V %			Al trocável			% Al		
	0-10	10-20	0-20	0-10	10-20	0-20	0-10	10-20	0-20	0-10	10-20	0-20
				----- % -----			----- cmol _c dm ⁻³ -----			----- % -----		
Calagem (Pinhão)												
Análise inicial	4,8	4,8	4,8	49	49	49	0,09	0,09	0,09	1,3	1,4	1,3
	<i>Após 1 ano</i>											
Testemunha	4,9	4,9	4,9	59	53	56	0,10	0,18	0,14	1,3	2,9	2,1
0,2 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 50 %)	4,9	4,9	4,9	57	51	54	0,10	0,20	0,15	1,2	3,1	2,1
2,3 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 65 %)	5,2	5,0	5,1	75	54	65	0,00	0,05	0,03	0,0	0,9	0,5
4,4 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 80 %)	5,1	5,0	5,0	75	59	67	0,00	0,10	0,05	0,0	1,7	0,8
7,3 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 100 %)	5,3	5,1	5,2	81	63	72	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
Calagem (Candói)												
Análise inicial	-	-	4,8	-	-	45	-	-	0,04	-	-	0,6
	<i>Após 1 ano</i>											
Testemunha	4,9	4,8	4,8	60	45	53	0,38	0,55	0,46	6,4	11,8	9,1
0,8 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 50 %)	4,7	4,6	4,7	53	42	47	0,23	0,83	0,53	3,0	9,1	6,0
3,2 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 65 %)	5,2	4,9	5,0	74	49	61	0,00	0,40	0,20	0,0	7,3	3,6
5,6 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 80 %)	5,2	4,7	4,9	75	42	53	0,00	0,78	0,39	0,0	8,6	4,3
8,7 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 100 %)	5,4	5,1	5,2	82	55	69	0,00	0,20	0,10	0,0	3,6	1,8

TABELA 4. Atributos do solo (pH em CaCl₂, saturação por bases (V %), alumínio trocável e saturação por alumínio (Al %)) após 5 anos nos experimentos de calagem com gesso e com pré-culturas e após 3 anos no experimento de calagem com fósforo, nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de profundidade.

Experimento	pH CaCl ₂			V %			Al trocável			% Al		
	0-10	10-20	0-20	0-10	10-20	0-20	0-10	10-20	0-20	0-10	10-20	0-20
				----- % -----			----- cmol _c dm ⁻³ -----			----- % -----		
Calagem x Gesso												
Análise inicial	4,7	4,8	4,8	52	48	49	0,08	0,05	0,05	0,9	0,7	0,7
	<i>Após 5 anos</i>											
Testemunha	4,8	4,7	4,7	58	52	55	0,23	0,41	0,32	2,6	5,3	4,0
Calcário (V 70 %)	5,2	5,0	5,1	77	63	70	0,00	0,03	0,01	0,0	0,4	0,2
Calcário Filler 1x	5,1	5,0	5,0	76	61	68	0,00	0,02	0,01	0,0	0,2	0,1
Calcário Filler parcelado	5,0	4,9	5,0	73	56	65	0,05	0,13	0,09	0,5	1,8	1,1
Calagem x Pré-culturas												
Análise inicial	4,7	4,8	4,8	52	48	49	0,08	0,05	0,05	0,9	0,7	0,7
	<i>Após 5 anos</i>											
Testemunha	4,9	4,8	4,8	62	53	57	0,13	0,23	0,18	1,4	3,1	2,2
2 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 65 %)	5,1	5,0	5,1	78	61	69	0,01	0,02	0,01	0,1	0,2	0,1
4 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 75 %)	5,2	5,1	5,2	83	66	75	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
8 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 100 %)	5,5	5,4	5,4	88	72	80	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
Calagem x Fósforo												
Análise inicial	4,4	4,3	4,3	26	21	23	0,60	0,73	0,67	13,8	23,2	18,5
	<i>Após 3 anos</i>											
Testemunha	4,2	4,2	4,2	27	19	23	1,11	1,14	1,13	21,1	30,4	25,8
2,5 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 30 %)	4,4	4,4	4,4	50	25	38	0,24	0,63	0,43	3,2	16,8	10,0
5,0 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 50 %)	5,0	4,4	4,7	58	33	45	0,18	0,55	0,36	2,8	11,5	7,2
7,5 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 70 %)	5,0	4,3	4,6	66	34	50	0,11	0,78	0,45	1,2	13,5	7,3
10 Mg ha ⁻¹ de Calcário (V 90 %)	5,2	4,4	4,8	70	36	53	0,01	0,30	0,16	0,2	5,4	2,8

Os maiores incrementos do pH e da V % do solo ocorreram na camada de 0-10 cm (Tabela 3 e 4), e isso se deve ao fato que a aplicação de calcário foi superficial em todos experimentos.

Nos experimentos de calagem com apenas um ano de condução (experimentos de Pinhão e Candói), o pH do solo com a maior dose de calcário (7,3 e 8,7 Mg ha⁻¹) foi em média 0,5 unidades superior à testemunha na camada de 0-10 cm e 0,3 unidades na camada de 10-20 cm (Tabela 3). Por sua vez, a saturação por bases também apresentou um expressivo incremento com a maior dose de calcário, elevando a V % na camada de 0-10 cm de 60 % para 82 %, o que corresponde a um aumento de 37 % em relação à testemunha. Na camada de 10-20 cm, esse incremento na V % também foi verificado, elevando a V % de 49 para 59 %, representando um aumento de 20 % em relação à testemunha.

O maior período de condução dos experimentos de Calagem x Gesso e Calagem x Pré-culturas proporcionaram um incremento no pH e na V % semelhante na camada de 0-10 e 10-20 cm, após cinco anos da aplicação do calcário (Tabela 4). Este incremento representa na camada de 0-20 cm, um aumento do pH em relação à testemunha de 4,7 para 5,1 e da V % de 55 para 70 % (+27 %) para a dose de calcário que visava atingir a saturação por bases de 70 %, e um acréscimo no pH de 4,8 para 5,4 e na V % de 57 para 80 (+40 %) para a dose que visava atingir 100 % da saturação por bases.

No experimento de Calagem x Fósforo, que foi a área com menor fertilidade do solo inicial dentre os experimentos de calagem, após três anos da aplicação do calcário, o maior incremento de pH e V % foi observado na camada de 0-10 cm, aumentando com a aplicação de 10 Mg ha⁻¹ de calcário o pH de 4,2 para 5,2 e a V % de 27 para 70 % (Tabela 4). Na camada de 10-20 cm, este incremento no pH com a maior dose de calcário foi de apenas 0,2 unidades em relação à testemunha (4,2 para 4,4), porém, a saturação por bases, que era de apenas 19 % na testemunha, aumentou cerca de 90 %, atingindo uma V % de 36 %. Na camada de 0-20 cm, a elevação do pH (4,2 para 4,8) e da V % (23 para 53 %) reduziu o teor de Al trocável de 1,13 cmol_c dm⁻³ no tratamento testemunha para 0,16 cmol_c dm⁻³ na dose máxima, e a saturação por alumínio de 25,8 % para 2,8 %.

O maior efeito da calagem superficial na camada de 0-10 cm é amplamente discutido na bibliografia (Caires et al., 2004; Ciotta et al., 2004; Corrêa et al., 2009). Entretanto, também tem sido observado um efeito da calagem nos atributos do solo ao longo do tempo em camadas de solo mais subsuperficiais no SPD (Caires et al., 2000; Silva et al., 2007). Diversos mecanismos são citados na explicação do efeito do calcário no solo em maiores profundidade no SPD (abaixo de 10 cm), como a formação e migração de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ (Oliveira & Pavan, 1996), o deslocamento de partículas de calcário através de canais formados por raízes mortas e canais de insetos (Pavan, 1994; Gassen & Kochhann, 1998) e a formação de pares iônicos do cálcio e do magnésio com ácidos orgânicos hidrossolúveis presentes nos resíduos das plantas (Miyazawa et al., 2002).

Em trabalho desenvolvido no município de Ponta Grossa, PR, em um Latossolo Vermelho-Escuro, Caires et al. (1998) observaram o efeito da calagem no pH e no alumínio trocável até 80 cm de profundidade dois anos após a aplicação de calcário. Os autores destacam a alta precipitação pluvial anual da região (2300 mm), que é semelhante à da região em estudo (1955 mm), contribuindo no transporte de partículas de calcário pela água percolada no perfil do solo (Amaral et al., 2004b).

As alterações dos atributos do solo proporcionadas pela aplicação de calcário melhoraram a fertilidade do solo, resultando no aumento do rendimento de grãos das culturas, evidenciado através de rendimentos relativos a partir 73 % (Tabela 5), indicando aumentos de rendimento de até 35 % em comparação às condições de fertilidade original.

Os rendimentos de grãos observados evidenciam o alto potencial produtivo da região, com rendimentos máximos nos experimentos de calagem de 4,1 Mg ha⁻¹ de soja, 13,6 Mg ha⁻¹ de milho, 5,8 Mg ha⁻¹ de aveia branca e de cevada, e 4,1 Mg ha⁻¹ de trigo (Tabela 5).

Em geral, a cultura da soja foi a que apresentou maior resposta à calagem, com incrementos médios no rendimento de grãos de 0,4 Mg ha⁻¹ e máximo de 0,8 Mg ha⁻¹ (Tabela 5). Dentre as demais culturas avaliadas, apenas o trigo (uma safra) apresentou rendimento relativo abaixo de 80 %, que foi na primeira safra após a aplicação de calcário no experimento de Calagem x Fósforo.

TABELA 5. Amplitude de rendimentos de grãos das culturas e o menor rendimento relativo em cada safra nos experimentos de calagem.

Experimento	Safra	Amplitude de rendimentos	Menor RR
		Mg ha ⁻¹	%
Calagem x Gesso			
Aveia branca	2004	5,1 – 5,8	87
Soja	2004/05	2,5 – 3,3	77
Milho	2005/06	11,8 – 13,6	87
Trigo	2006	3,6 – 4,1	89
Soja	2006/07	3,6 – 4,1	89
Cevada	2007	– ⁽¹⁾	-
Soja	2007/08	2,2 – 2,8	79
Soja	2008/09	2,0 – 2,7	73
Calagem x Pré-culturas			
Cevada	2004	3,9 – 4,1	96
Soja	2004/05	2,8 – 2,9	96
Soja	2004/05	2,8 – 3,0	95
Soja	2004/05	2,6 – 2,8	93
Aveia branca	2005	3,3 – 3,9	84
Milho	2005/06	9,0 – 9,6	94
Milho	2005/06	9,0 – 9,8	92
Milho	2005/06	9,9 – 10,4	95
Trigo	2006	3,5 – 4,0	88
Soja	2006/07	3,4 – 3,9	89
Soja	2006/07	3,9 – 4,1	93
Soja	2006/07	3,4 – 4,0	85
Aveia branca	2008	2,9 – 3,3	88
Soja	2008/09	3,0 – 3,3	90
Soja	2008/09	2,6 – 2,9	91
Soja	2008/09	2,5 – 2,9	85
Calagem x Fósforo			
Trigo	2000	2,3 – 2,9	79
Soja	2000/01	3,1 – 3,6	87
Aveia branca	2001	2,5 – 2,8	90
Milho	2001/02	5,9 – 6,6	89
Cevada	2002	2,6 – 3,1	83
Soja	2002/03	2,9 – 3,4	87
Calagem (Pinhão)			
Cevada	2008	5,6 – 5,8	97
Soja	2008/09	3,0 – 3,3	91
Calagem (Candói)			
Trigo	2008	3,5 – 4,1	85
Soja	2008/09	3,4 – 3,5	97
Cevada	2009	3,9 – 4,1	95

¹ Safra sem rendimento de grãos em razão da ocorrência de geada.

O maior incremento quantitativo proporcionado pela calagem no rendimento de grãos foi observado na cultura do milho, de 1,8 Mg ha⁻¹. Entretanto, em virtude do alto rendimento de grãos de milho nesta safra mesmo sem a aplicação de calcário (11,8 Mg ha⁻¹), o rendimento relativo foi de 87 % do rendimento máximo (Tabela 5).

O experimento de Calagem x Fósforo apresentou os menores rendimentos de aveia branca ($2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), cevada ($2,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), trigo ($2,3 \text{ Mg ha}^{-1}$) e milho ($5,9 \text{ Mg ha}^{-1}$) dentre todos os experimentos de calagem (Tabela 5). Este fato pode estar relacionado ao baixo pH e V % do solo na condição inicial da implantação do experimento, onde apesar da aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário, o pH na camada 0-20 cm após três anos da aplicação foi de apenas 4,8 e a saturação por bases de 53 %, condição esta que poderia não estar proporcionando o máximo rendimento das culturas.

6.2 Fertilidade do solo e rendimento das culturas nos experimentos com adubação fosfatada e potássica

A adição das doses de P e K na instalação dos experimentos em Guarapuava, Pinhão e Candói (inverno 2008), aliada à reaplicação do nutriente na safra seguinte (verão 2008/09), aumentaram os teores disponíveis destes nutrientes no solo, principalmente na camada de 0-10 cm (Tabela 6).

Após um ano da aplicação das doses de fósforo, as faixas de P disponível na camada de 0-10 cm variaram de 20,4 a 65,1 mg dm^{-3} no solo em Guarapuava, 7,9 a 15,1 mg dm^{-3} no solo em Pinhão e 4,5 a 17,3 mg dm^{-3} no solo em Candói, refletindo em um incremento no teor de P do solo em cada local de respectivamente, 319, 191 e 384 %.

O incremento do teor de P no solo também ocorreu na camada de 10-20 cm, porém, em menor intensidade que na camada de 0-10 cm (Tabela 6). Este incremento pode ter duas causas principais. O primeiro motivo seria a aplicação das doses na instalação do experimento, que aumentou o teor de P na camada 10-20 cm com a aplicação de $640 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ de 5,4 para 9,7 mg dm^{-3} no solo em Guarapuava, de 3,9 para 4,5 mg dm^{-3} no solo em Pinhão e de 2,5 para 3,1 mg dm^{-3} no solo em Candói. O segundo motivo seria a reaplicação de $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ na linha de semeadura na cultura da soja (verão 2008/09), que aumentou em média 1,6 mg P dm^{-3} na camada de 10-20 cm com a reaplicação de P no solo em Guarapuava (Tabela 6). Entretanto, estes incrementos de P na camada de 10-20 cm são muito pequenos, em vista das altas doses de P_2O_5 aplicadas, principalmente nas localidades de Pinhão e Candói.

O maior aumento do teor de P na camada de 10-20 cm observado no experimento P-Guarapuava, possivelmente decorreu em razão deste local apresentar um alto teor inicial de P (14,3 mg dm⁻³; 0-20 cm) e baixa acidez (pH em CaCl₂ de 5,2; 0-20 cm), reduzindo a adsorção de fósforo (Novais et al., 2007), que associado à um alto regime pluviométrico da região (Figura 1), pode ter facilitado o deslocamento deste nutriente para camadas abaixo dos 10 cm.

Nos experimentos de potássio, os teores iniciais na camada de 0-20 cm são considerados pela CQFS-RS/SC (2004) muito altos em Guarapuava (194 mg dm⁻³) e em Pinhão (212 mg dm⁻³), e médios em Candói (87 mg dm⁻³) (Tabela 6).

TABELA 6. Teores de fósforo e potássio disponíveis no solo (Mehlich-1), nos experimentos localizados em Guarapuava, Pinhão e Candói, nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de profundidade.

Experimento\Local	Guarapuava			Pinhão			Candói		
	0-10	10-20	0-20	0-10	10-20	0-20	0-10	10-20	0-20
----- mg dm ⁻³ -----									
Fósforo									
Análise inicial	17,9	7,8	14,3	8,5	5,0	5,4	4,6	2,6	4,9
<i>kg P₂O₅ ha⁻¹</i>	<i>Teor após 1 ano</i>								
0	20,4	5,4	13,2	7,9	3,9	5,4	4,5	2,5	3,7
0 + 60 ¹	25,9	7,1	13,5	7,9	3,8	5,3	5,1	3,7	5,0
80	26,2	4,7	14,4	9,4	4,1	5,8	5,2	2,5	4,0
80 + 60	26,6	6,6	14,1	10,9	4,1	6,7	5,9	3,1	4,6
160	31,6	6,2	13,3	8,9	2,5	5,2	9,6	2,5	4,5
160 + 60	29,7	8,3	14,2	9,5	2,6	6,3	9,0	2,4	6,2
320	41,6	8,0	23,3	11,2	4,2	6,5	11,1	3,0	5,3
320 + 60	40,5	9,6	26,9	13,0	4,2	7,7	10,6	3,6	6,8
640	65,1	9,7	34,3	14,9	4,5	11,3	17,3	3,1	8,7
640 + 60	63,3	10,5	32,7	15,1	4,2	11,0	16,5	4,0	8,4
Potássio									
Análise inicial	285	137	194	228	185	212	124	72	87
<i>kg K₂O ha⁻¹</i>	<i>Teor após 1 ano</i>								
0	258	131	196	310	198	219	118	47	85
0 + 60 ¹	319	154	196	375	228	279	139	58	89
80	249	110	170	372	201	244	118	53	94
80 + 60	329	137	212	354	233	276	185	118	167
160	307	118	189	377	257	294	226	94	169
160 + 60	443	168	271	376	250	307	227	108	125
320	577	195	296	473	309	372	254	147	175
320 + 60	380	181	283	512	353	424	252	125	207
640	514	286	396	531	400	487	341	177	224
640 + 60	504	280	383	549	388	464	336	200	257

¹ A dose de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O corresponde a dose de reposição aplicada na cultura da soja na safra 2008/09.

As doses de K₂O aplicadas na instalação dos experimentos de Guarapuava, Pinhão e Candói, aumentaram o teor de K no solo em todas as camadas amostradas, atingindo incrementos no teor de K com a maior dose

(640 kg K₂O ha⁻¹) de 220 % na camada de 0-10 cm e de 265 % na camada de 10-20 cm. Estes incrementos na camada de 10-20 cm após um ano da aplicação das doses de K no solo evidenciam a mobilidade do K aplicado a lanço em superfície do solo. A reaplicação de K na safra da soja também colaborou para um aumento do teor de K na camada de 10-20 cm, em média de 17 mg dm⁻³.

Nos experimentos de longa duração com P e K nas áreas de média e alta fertilidade, após cinco anos sem a aplicação de fertilizantes, os teores destes nutrientes na camada de 0-20 cm reduziram, passando na área de média fertilidade de 14,7 para 11,4 mg P dm⁻³ e de 108 para 92 mg K dm⁻³ e, na área de alta fertilidade, de 17,8 para 7,8 mg P dm⁻³ e de 150 para 115 mg K dm⁻³. Entretanto, os teores iniciais de P e K no solo foram mantidos, após cinco anos, com os tratamentos de meia dose recomendada de fertilizante, e foram acrescidos com os tratamentos da dose normal recomendada (Tabela 7).

TABELA 7. Teores de fósforo e potássio disponíveis no solo (Mehlich-1), nos experimentos de solos com média e alta fertilidade, nas camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm de profundidade.

Experimento	Fósforo			Potássio		
	0-10	10-20	0-20	0-10	10-20	0-20
----- mg dm ⁻³ -----						
P e K - Média fertilidade						
Análise inicial	-	-	14,7	-	-	108
	<i>Teor após 5 anos</i>					
Testemunha	12,5	10,4	11,4	113	71	92
½ Dose recomendada linha	20,3	11,4	15,8	139	81	110
½ Dose recomendada lanço	18,0	10,9	14,4	146	73	109
Dose recomendada linha	37,8	15,3	26,6	175	98	136
Dose recomendada lanço	27,0	12,6	19,8	181	102	148
P e K - Alta fertilidade						
Análise inicial	-	-	17,8	-	-	150
	<i>Teor após 5 anos</i>					
Testemunha	10,4	5,1	7,8	155	75	115
½ Dose recomendada linha	18,8	13,4	16,1	155	89	122
½ Dose recomendada lanço	21,3	10,0	15,6	163	85	124
Dose recomendada linha	28,0	10,9	19,4	215	147	181
Dose recomendada lanço	27,0	10,4	18,7	229	121	175

A forma de aplicação do fertilizante influenciou nos teores de P e K na camada de 10-20 cm, sendo observado após cinco anos de experimento, um incremento médio de 1,8 mg P dm⁻³ e de 8,5 mg K dm⁻³ quando a aplicação do fertilizante foi na linha de semeadura em comparação com a aplicação a

lanço na superfície do solo (Tabela 7). O acúmulo de P e K abaixo de 10 cm de profundidade com a adubação na linha de semeadura no SPD também foi observado por Costa (2008), em um Argissolo após 17 anos sob SPD, elevando em torno de 15 mg dm^{-3} o teor de P e de 30 mg dm^{-3} o teor de K na camada de 10-15 cm.

Os teores de P e de K no solo nos diferentes experimentos refletiram na resposta de rendimento das culturas. Em geral, os experimentos com doses de P e K apresentaram pequena resposta das culturas ao fertilizante (Tabela 8), que ocorreu em razão de ter poucas safras avaliadas (experimentos relativamente recentes), e dos teores iniciais de P e K serem considerados altos, principalmente em Guarapuava e em Pinhão (Tabela 6). Neste sentido, nos experimentos com doses de P e K observaram-se altos rendimentos de grãos das culturas, mesmo na ausência da adubação, de $3,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de aveia branca, $3,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de cevada, $3,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de trigo e $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de soja.

A resposta no rendimento de grãos com a adição de P e K ao solo foi distinta em cada cultura, sugerindo que as exigências de fertilidade do solo entre as culturas são diferentes. Os cereais de inverno apresentaram as maiores respostas à adubação, principalmente a cultura da cevada, que resultou em rendimento relativo mínimo de 51 % (Tabela 8).

Pequena resposta à adição de P e K no solo foi observada nas culturas da soja e do milho, sendo que, dentre as 38 safras de soja e 16 safras de milho avaliadas, todas apresentaram rendimento relativo de grãos acima de 80 % (Tabela 8). Cabe ressaltar o alto rendimento do milho na ausência de adubação fosfatada e potássica, apresentando o rendimento de grãos sempre superior a 10 Mg ha^{-1} .

Os menores rendimentos de grãos da soja observados nos experimentos de P e K no solo de média ($1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) e alta fertilidade ($1,3 \text{ Mg ha}^{-1}$) são considerados baixos, e ocorreram em razão de estresse hídrico pontual em uma safra, a qual proporcionou rendimentos baixos também aos tratamentos que receberam a adubação de P e K. Este detalhamento é importante na compreensão da amplitude de rendimentos de grãos na Tabela 8, onde que o rendimento mínimo e máximo apresentados não são necessariamente na mesma safra, e sim são valores extremos dentre todas as safras da cultura no experimento.

TABELA 8. Amplitude de rendimentos de grãos das culturas e o menor rendimento relativo de cada cultura nos experimentos de fósforo e potássio.

Experimento	Nº. safras	Amplitude de rendimentos	Menor RR
		Mg ha ⁻¹	%
Fósforo – Guarapuava			
Aveia branca	1	4,5 – 4,8	93
Soja	1	2,6 – 3,0	87
Fósforo – Pinhão			
Cevada	1	5,5 – 5,9	94
Soja	1	2,9 – 3,6	81
Fósforo – Candói			
Trigo	1	3,9 – 5,1	77
Soja	1	3,4 – 3,7	93
Cevada	1	3,3 – 4,0	84
Potássio – Guarapuava			
Aveia branca	1	3,9 – 4,5	86
Soja	1	2,5 – 2,8	88
Potássio – Pinhão			
Cevada	1	5,6 – 5,9	95
Soja	1	3,1 – 3,4	91
Potássio – Candói			
Trigo	1	4,2 – 4,4	96
Soja	1	3,4 – 3,7	91
Cevada	1	3,7 – 4,0	92
P e K – Média fertilidade			
Soja	14	1,5 – 3,3	83
Milho	7	10,8 – 14,8	83
Aveia branca	2	3,0 – 5,5	79
Cevada	5	2,4 – 5,8	51
Trigo	4	1,8 – 4,4	73
P e K – Alta fertilidade			
Soja	18	1,3 – 3,5	80
Milho	9	10,0 – 13,7	81
Aveia branca	3	4,2 – 5,1	84
Cevada	6	2,5 – 5,3	73
Trigo	5	2,4 – 4,4	85

6.3 Análise da camada diagnóstica em solos sob sistema plantio direto

A camada diagnóstica para fins de amostragem do solo é analisada neste trabalho sob dois critérios. O primeiro é que a camada diagnóstica deve ser aquela camada de solo que melhor representa o crescimento e o rendimento das culturas. O segundo, é que ela deve ser a camada de solo que melhor represente a condição de fertilidade do solo, ou seja, ser a camada que está sofrendo alterações pelas práticas de fertilização, seja através da calagem ou da adubação fosfatada e potássica.

6.3.1 Avaliação da camada diagnóstica pelo crescimento e rendimento das culturas

Para contemplar o primeiro critério da análise da camada diagnóstica, exploraram-se correlações entre os atributos do solo nas camadas de 0-10 e 0-20 cm com o rendimento de grãos das culturas nos experimentos de calagem, fósforo e potássio e, correlações dos atributos do solo nos experimentos de doses de P e K com atributos da planta.

Em geral, os coeficientes de correlação (r) entre o rendimento de grãos das culturas e os atributos do solo avaliados (pH em CaCl_2 , saturação por bases (V %), alumínio trocável, saturação por alumínio (Al %), P e K disponíveis por Mehlich-1) foram semelhantes nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade (Tabela 9 e 10). Nos experimentos de calagem, o coeficiente de correlação geral englobando todas as culturas e os atributos do solo avaliados foi de 0,58 na camada de 0-10 cm e 0,56 na camada de 0-20 cm (Tabela 9). Nos experimentos de fósforo, a correlação foi de 0,47 para ambas as camadas e, nos experimentos de potássio, foi de 0,38 na camada de 0-10 cm e 0,40 na camada de 0-20 cm (Tabela 10).

Através da avaliação da correlação entre os rendimentos de grãos e os atributos do solo por cultura, observaram-se comportamentos diferentes nas duas camadas amostradas. Em geral, a cultura da soja, que é a cultura mais importante financeiramente no sistema de rotação de culturas da região Centro-Sul do Paraná, apresentou melhor relação do rendimento de grãos com os atributos do solo na camada de 0-20 cm de profundidade (Tabelas 9 e 10).

Nos experimentos com calagem, a correlação do rendimento de grãos de soja com o pH, a V % e o Al trocável foi semelhante na camada 0-10 e 0-20 cm, porém, com a saturação por alumínio, a camada de 0-20 cm ($r=-0,68$) foi superior à camada de 0-10 cm ($r=-0,61$). Nos experimentos de P e K, os coeficientes de correlação da camada amostrada de 0-20 cm também foram superiores à camada de 0-10 cm na cultura da soja, sendo $r=0,72$ (0-20 cm) e $r=0,65$ (0-10 cm) para o fósforo e, $r=0,64$ (0-20 cm) e $r=0,57$ (0-10 cm) para o potássio (Tabela 10).

TABELA 9. Coeficientes de correlação linear (r , $p < 0,10$) entre os rendimentos relativos de soja, milho e cereais de inverno (aveia branca, cevada e trigo) e os componentes da acidez de solos em plantio direto nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade, em três experimentos envolvendo calagem.

Experimento ¹	No. safras	Atributos do solo – coeficientes de correlação linear (r)								Média (r em módulo)	
		pH em CaCl ₂		V %		Al trocável		Al %		0-10	0-20
		0-10	0-20	0-10	0-20	0-10	0-20	0-10	0-20		
<p style="text-align: center;">----- % ----- ----- cmol_c dm⁻³ ----- ----- % -----</p>											
Soja											
Calagem x Gesso	4	0,69	0,69	0,65	0,65	-0,60	-0,67	-0,58	-0,67	0,63	0,67
Calagem x Pré-culturas	9	0,50	0,49	0,28	0,27	-0,71	-0,70	-0,63	-0,68	0,53	0,54
Calagem x Fósforo	2	-0,08ns	0,01ns	-0,20ns	-0,17ns	-0,01ns	-0,08ns	-0,03ns	-0,02ns	-	-
r soja ponderado	13	0,56	0,55	0,39	0,39	-0,68	-0,69	-0,61	-0,68	0,56	0,58
Milho											
Calagem x Gesso	1	-0,45ns	-0,54ns	-0,41ns	-0,48ns	0,30ns	0,42ns	0,30ns	0,42ns	-	-
Calagem x Pré-culturas	3	0,42	0,57	0,55	0,63	-0,66	-0,55	-0,65	-0,55	0,57	0,58
Calagem x Fósforo	1	0,79	0,76	0,77	0,78	-0,61	-0,52	-0,63	-0,62	0,70	0,67
r milho ponderado	4	0,51	0,62	0,61	0,67	-0,65	-0,54	-0,65	-0,57	0,60	0,60
Cereais de inverno											
Calagem x Gesso	2	0,05ns	0,08ns	0,05ns	0,05ns	-0,11ns	-0,15ns	-0,10ns	-0,15ns	-	-
Calagem x Pré-culturas	3	0,21ns	0,05ns	0,6	0,47	-0,56	-0,47	-0,52	-0,46	0,56	0,47
Calagem x Fósforo	3	0,70	0,65	0,69	0,66	-0,52	-0,15	-0,69	-0,54	0,65	0,50
r cereais ponderado	6	0,70 ²	0,65*	0,65	0,57	-0,54	-0,31	-0,61	-0,50	0,61	0,49
r global ponderado	23	0,57	0,58	0,50	0,48	-0,64	-0,57	-0,62	-0,61	0,58	0,56

¹ Os experimentos de Calagem (Pinhão) e Calagem (Candói) não apresentaram resposta à calagem em nenhuma safra.

² Coeficiente de correlação ponderado obtido a partir de três safras.

TABELA 10. Coeficientes de correlação linear (r , $p < 0,10$) entre os rendimentos relativos de soja, milho e cereais de inverno (aveia branca, cevada e trigo) e os teores de P e K disponíveis no solo, nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade.

Experimento	Fósforo			Potássio		
	No. safras	Profundidade		No. safras	Profundidade	
		0-10	0-20		0-10	0-20
Soja						
P Guarapuava	1	-0,26ns	-0,29ns	-	-	-
P Pinhão	1	0,74	0,71	-	-	-
P Candói	1	0,55	0,73	-	-	-
K Guarapuava	-	-	-	1	-0,54ns	-0,53ns
K Pinhão	-	-	-	1	0,57	0,64
K Candói	-	-	-	1	0,22ns	0,21ns
P e K média fertilidade	14	0,12ns	0,16ns	14	0,06ns	-0,05ns
P e K alta fertilidade	16	-0,19ns	-0,21ns	16	0,08ns	-0,04ns
<i>r soja ponderado</i>	2	0,65	0,72	1	0,57	0,64
Milho						
P e K média fertilidade	7	0,40	0,43	7	0,19ns	0,17ns
P e K alta fertilidade	8	0,12ns	0,06ns	8	0,26ns	0,19ns
<i>r milho ponderado</i>	7	0,40	0,43	-	-	-
Cereais de inverno						
P Guarapuava	1	0,79ns	0,67ns	-	-	-
P Pinhão	1	0,24ns	0,43ns	-	-	-
P Candói	1	0,96	0,99	-	-	-
K Guarapuava	-	-	-	1	0,93	0,86
K Pinhão	-	-	-	1	0,66ns	0,55ns
K Candói	-	-	-	1	0,67ns	0,75ns
P e K média fertilidade	9	0,61	0,61	9	0,30	0,32
P e K alta fertilidade	11	0,33	0,28	11	0,14ns	0,14ns
<i>r cereais ponderado</i>	21	0,48	0,46	10	0,36	0,37
<i>r global ponderado</i>	30	0,47	0,47	11	0,38	0,40

O rendimento de grãos de milho apresentou melhor correlação com o pH ($r=0,62$) e com a V % ($r=0,67$) na camada de 0-20 cm, enquanto que o alumínio trocável ($r=-0,65$) e a saturação por alumínio ($r=-0,65$) apresentaram melhor correlação com a camada 0-10 cm. Esta divergência possivelmente está associada ao pequeno número de safras de milho envolvidas nos experimentos de calagem. Nos experimentos de P e K, a cultura do milho apresentou correlação significativa apenas com o P no experimento de fertilidade média (7 safras), de 0,40 na camada de 0-10 cm e 0,43 na camada de 0-20 cm de profundidade (Tabela 10).

Em contraposto à cultura da soja, os cereais de inverno (aveia branca, cevada e trigo) apresentaram correlação do rendimento de grãos superior na camada de 0-10 cm, principalmente nos experimentos de calagem, destacando uma correlação média dos atributos do solo avaliados de 0,61 na camada de 0-10 cm contra 0,49 na camada de 0-20 cm. A maior relação do rendimento dos cereais de inverno com a camada de 0-10 cm possivelmente

está relacionada à distribuição de raízes mais superficial destas culturas, as quais concentram cerca de 70 % na camada superficial de 0-10 cm (Fante Jr et al., 1999).

Com relação à camada diagnóstica e acidez dos solos sob SPD, alguns autores indicam que a recomendação de calagem com base nos indicadores da acidez do solo pode ser realizada na camada de 0-10, 0-15 ou 0-20 cm de profundidade (Nolla & Anghinoni, 2006; Nicolodi et al., 2008), apresentando boas relações de pH, V % e Al trocável com o rendimento de grãos em ambas camadas.

A correlação dos atributos das plantas com os teores de P e K no solo foi muito semelhante na camada de 0-10 e 0-20 cm de profundidade (Tabela 11), apresentando diferença máxima entre os coeficientes de correlação (r) das duas camadas de apenas 0,04. Esta semelhança indica que ambas as camadas estão representando de forma similar a condição de fertilidade do solo demonstrada pelos atributos das plantas. Em estudo semelhante ao desenvolvido neste trabalho, Sá (1999) verificou em um Latossolo Vermelho há treze anos sob SPD, uma média das correlações de atributos da planta do milho com o teor de P no solo extraído por Mehlich-1, muito similar nas camadas de 0-10 cm ($r=0,77$) e de 0-20 cm ($r=0,75$).

Em geral, os experimentos de P apresentaram melhor correlação dos teores de P disponível no solo com a resposta da planta (Tabela 11). A razão disto pode ser parcialmente explicada pelos teores de P na implantação dos experimentos serem mais limitantes ao rendimento das culturas que os teores de K nos experimentos de K, como observado no experimento de P no Candói ($4,9 \text{ mg P dm}^{-3}$; 0-20 cm) (Tabela 2), que apresentou o maior número de correlações significativas do teor de P no solo com os atributos da planta (Tabela 11).

TABELA 11. Coeficientes de correlação linear (r , $p < 0,10$) entre os atributos da planta de cereais de inverno e soja e o teor de fósforo e potássio disponível no solo nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade, nos municípios de Guarapuava, Pinhão e Cândói.

Atributos da planta	Local					
	Guarapuava		Pinhão		Cândói	
	0-10	0-20	0-10	0-20	0-10	0-20
Fósforo						
Cereais de inverno						
Folha índice (g P kg ⁻¹)	0,90	0,99	0,51ns	0,69ns	0,98	0,92
Matéria Seca (g P kg ⁻¹)	0,65ns	0,79ns	0,91	0,91	0,90	0,92
Matéria Seca - Produção (kg ha ⁻¹)	-0,91	-0,92	0,24ns	0,40ns	0,92	0,99
Matéria Seca - Extração (kg ha ⁻¹)	-0,01ns	0,14ns	0,72	0,81	0,95	0,98
Grão (g P kg ⁻¹)	0,91	0,92	0,98	0,99	0,98	0,84
Produtividade (kg ha ⁻¹)	0,79ns	0,67ns	0,24ns	0,43ns	0,96	0,99
Grão - Extração (kg P ha ⁻¹)	0,93	0,85	0,93	0,99	0,99	0,96
Média	0,46	0,46	0,89	0,93	0,95	0,94
Soja						
Folha índice (g P kg ⁻¹)	0,93	0,93	0,52ns	0,46ns	0,41ns	0,47ns
Matéria Seca (g P kg ⁻¹)	0,86	0,88	0,78	0,77	0,79	0,70
Matéria Seca - Produção (kg ha ⁻¹)	0,36ns	0,44ns	0,36ns	0,24ns	0,54ns	0,47ns
Matéria Seca - Extração (kg ha ⁻¹)	0,76	0,79	0,68ns	0,56ns	0,72	0,64
Grão (g P kg ⁻¹)	0,78	0,83	0,10ns	0,04ns	0,87	0,77
Produtividade (kg ha ⁻¹)	-0,26ns	-0,29ns	0,74	0,71	0,55	0,73
Grão - Extração (kg P ha ⁻¹)	0,41ns	0,40ns	0,67	0,63	0,87	0,87
Média	0,83	0,86	0,73	0,70	0,76	0,74
Potássio						
Cereais de inverno						
Folha índice (g K kg ⁻¹)	0,65ns	0,54ns	0,63ns	0,64ns	0,54ns	0,50ns
Matéria Seca (g K kg ⁻¹)	0,77	0,86	0,63ns	0,73ns	-0,26ns	-0,13ns
Matéria Seca - Produção (kg ha ⁻¹)	0,13ns	0,25ns	0,54ns	0,59ns	-0,38ns	-0,34ns
Matéria Seca - Extração (kg ha ⁻¹)	0,54ns	0,67ns	0,66ns	0,75ns	-0,32ns	-0,24ns
Grão (g K kg ⁻¹)	-0,57ns	-0,50ns	-0,81ns	-0,77ns	0,22ns	0,30ns
Produtividade (kg ha ⁻¹)	0,93	0,86	0,66ns	0,55ns	0,67ns	0,75ns
Grão - Extração (kg K ha ⁻¹)	0,88	0,85	-0,71ns	-0,72ns	0,39ns	0,48ns
Média	0,86	0,86	-	-	-	-
Soja						
Folha índice (g K kg ⁻¹)	0,40ns	0,25ns	0,62	0,71	0,70	0,74
Matéria Seca (g K kg ⁻¹)	0,61ns	0,47ns	0,98	0,98	0,91	0,88
Matéria Seca - Produção (kg ha ⁻¹)	-0,12ns	0,14ns	0,19ns	0,12ns	0,30ns	0,32ns
Matéria Seca - Extração (kg ha ⁻¹)	0,26ns	0,42ns	0,66	0,61	0,89	0,87
Grão (g K kg ⁻¹)	0,47ns	0,52ns	-0,12ns	-0,28ns	0,67ns	0,52ns
Produtividade (kg ha ⁻¹)	-0,54ns	-0,53ns	0,57	0,64	0,22ns	0,21ns
Grão - Extração (kg K ha ⁻¹)	-0,49ns	-0,48ns	0,57ns	0,57ns	0,57ns	0,46ns
Média	-	-	0,71	0,74	0,83	0,83

6.3.2 Avaliação da camada diagnóstica em razão das alterações nos atributos do solo

Na análise da camada diagnóstica de solo como aquela a qual é afetada pela adição de calcário e fertilizantes fosfatados e potássicos no SPD, verificou-se que os efeitos destas práticas nos atributos de solo não se restringem somente à camada superficial (0-10 cm) (Figuras 4 e 5).

A adição de doses de calcário proporcionou um incremento no pH e na V % do solo nas duas camadas avaliadas (Figura 4). Os maiores coeficientes angulares das equações de regressão polinomial do pH e V % com as doses de calcário foram observados na camada de 0-10 cm (Tabela 12), indicando o maior efeito da calagem nesta camada. Entretanto, observou-se que na camada de 10-20 cm, as regressões das doses de calcário foram significativas ($p < 0,05$) com o pH e a V % nos experimentos de Calagem x Pré-culturas e Calagem (Pinhão) e, com apenas com a V %, no experimento Calagem x Fósforo, apresentando em todos os casos, alto coeficiente de determinação ($r^2 > 0,94$) (Tabela 12).

O efeito da calagem na camada de 10-20 cm nos experimentos de pré-culturas e fósforo era esperado e representa um efeito de 5 e 3 anos, respectivamente, após a aplicação de calcário. Porém, a regressão significativa do pH e da V % na camada de 10-20 cm, verificada no experimento Calagem (Pinhão), indica a correção da acidez do solo nesta camada, após apenas um ano da calagem. Este fato não ocorreu no outro experimento com apenas um ano de condução (Calagem (Candói)), sendo verificado efeito significativo das doses de calcário no pH e na V % somente na camada de 0-10 cm (Tabela 12), apesar de haver uma tendência do aumento do pH e da V % na camada de 10-20 cm com o acréscimo das doses de calcário (Figura 4).

O efeito da calagem nos atributos do solo foi observado por Caires et al. (2000) e Silva et al. (2007), indicando que a descida do calcário no sistema plantio direto está relacionada com o tempo após a calagem, encontrando incrementos no pH e V % após 12 meses da calagem na camada de 0-10 cm, e após 24 meses na camada de 10-20 cm. Caires et al. (2000) também observou durante 5 anos após a calagem, aumentos significativos no pH e V % até 60 cm de profundidade.

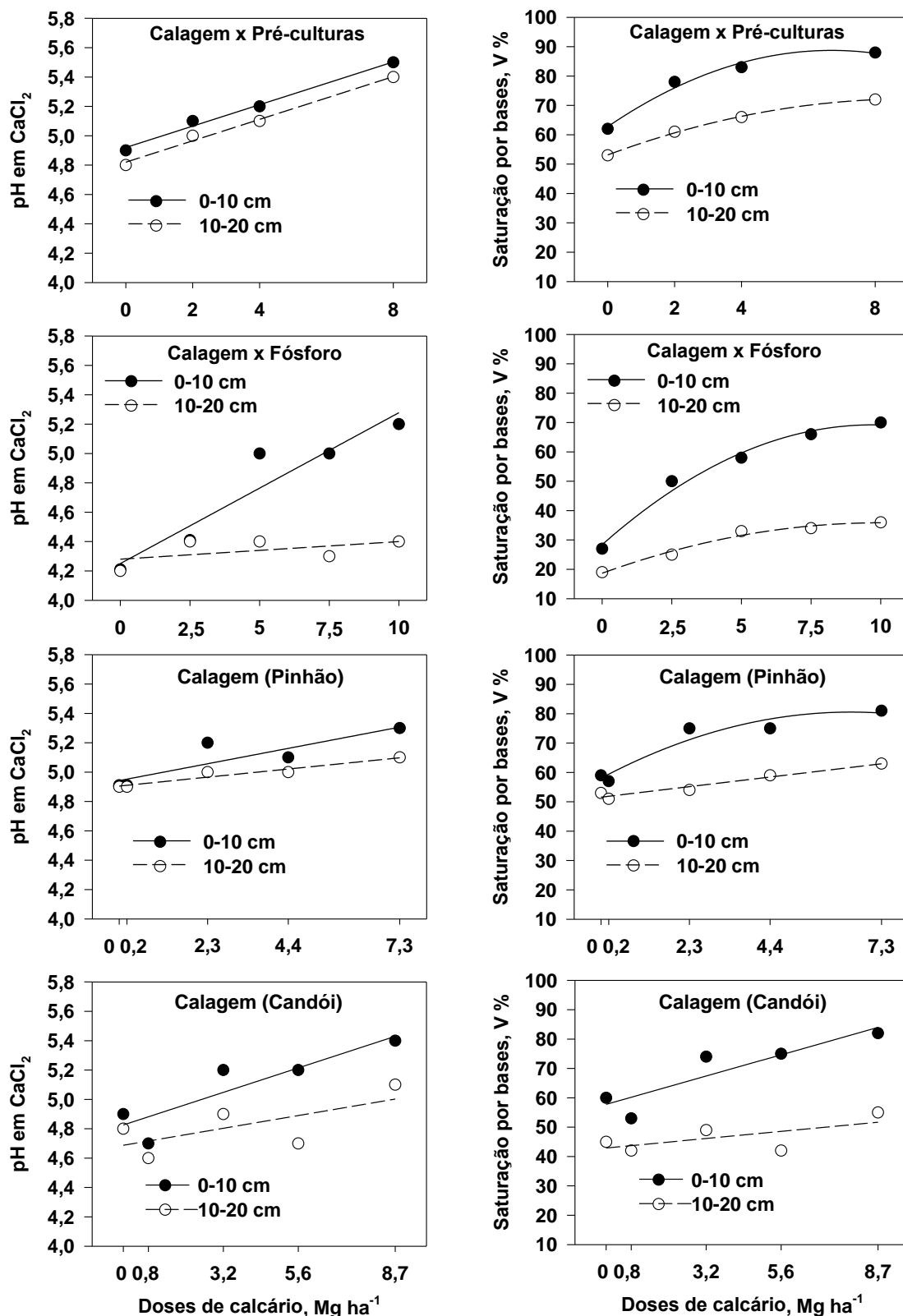


FIGURA 4. Incrementos do pH e da V % do solo com a aplicação de doses de calcário em quatro experimentos, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

TABELA 12. Equações de regressão polinomial dos incrementos no pH e na V % do solo com a aplicação de doses de calcário em quatro experimentos, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

Experimento	Prof.	Equação de regressão polinomial	r ²	p
pH em CaCl ₂				
Calagem x Pré-culturas	0-10	y=0,0729x+4,92	0,99	<0,01
	10-20	y=0,0729x+4,82	0,99	<0,01
Calagem x Fósforo	0-10	y=0,1028x+4,25	0,90	0,01
	10-20	y=0,0120x+4,28	0,28	0,36
Calagem (Pinhão)	0-10	y=0,0499x+4,94	0,78	0,05
	10-20	y=0,0264x+4,90	0,94	<0,01
Calagem (Candói)	0-10	y=0,0694x+4,83	0,80	0,04
	10-20	y=0,0362x+4,69	0,45	0,21
V %				
Calagem x Pré-culturas	0-10	y=-0,579x ² +7,76x+62,8	0,98	0,14
	10-20	y=-0,233x ² +4,22x+53,1	0,99	0,03
Calagem x Fósforo	0-10	y=-0,434x ² +8,42x+28,4	0,99	0,01
	10-20	y=-0,171x ² +3,43x+18,7	0,98	0,02
Calagem (Pinhão)	0-10	y=-0,533x ² +6,93x+58,0	0,93	0,07
	10-20	y=1,559x+51,57	0,96	<0,01
Calagem (Candói)	0-10	y=3,014x+57,77	0,82	0,04
	10-20	y=1,007x+42,91	0,43	0,23

Um fato observado nas curvas de pH e V % é que o aumento do pH com as doses de calcário apresenta um comportamento linear, enquanto os incrementos na V % é de forma quadrática (Figura 4), principalmente nos experimentos com maior período após a calagem (Calagem x Pré-culturas e Calagem x Fósforo). Este comportamento quadrático da V % com doses de calcário também foi observado em outros trabalhos (Caires et al., 2000; Silva et al., 2007), sendo essa característica quadrática atribuída por Silva et al. (2007), aos íons hidrogênios retidos por ligações covalentes no complexo de troca dos colóides do solo, que dificilmente serão deslocados através da calagem.

Os incrementos de P e K disponíveis no solo com as doses de P₂O₅ e K₂O são demonstrados na figura 5, com as respectivas regressões na tabela 13. Dentre os experimentos com doses de fósforo, pode se destacar que todos apresentaram incremento do teor de P na camada de 0-10 cm de profundidade (Tabela 13), porém, apenas o P-Guarapuava apresentou aumento significativo (p<0,05) do teor de P na camada de 10-20 cm. Esta maior concentração de fósforo na camada superficial do solo no SPD é amplamente destacada na literatura (Schlindwein & Anghinoni, 2000; Ciotta et al., 2002), sendo observado incrementos abaixo dos 10 cm com a aplicação de fertilizantes na linha com o uso de haste sulcadora (Costa et al., 2009).

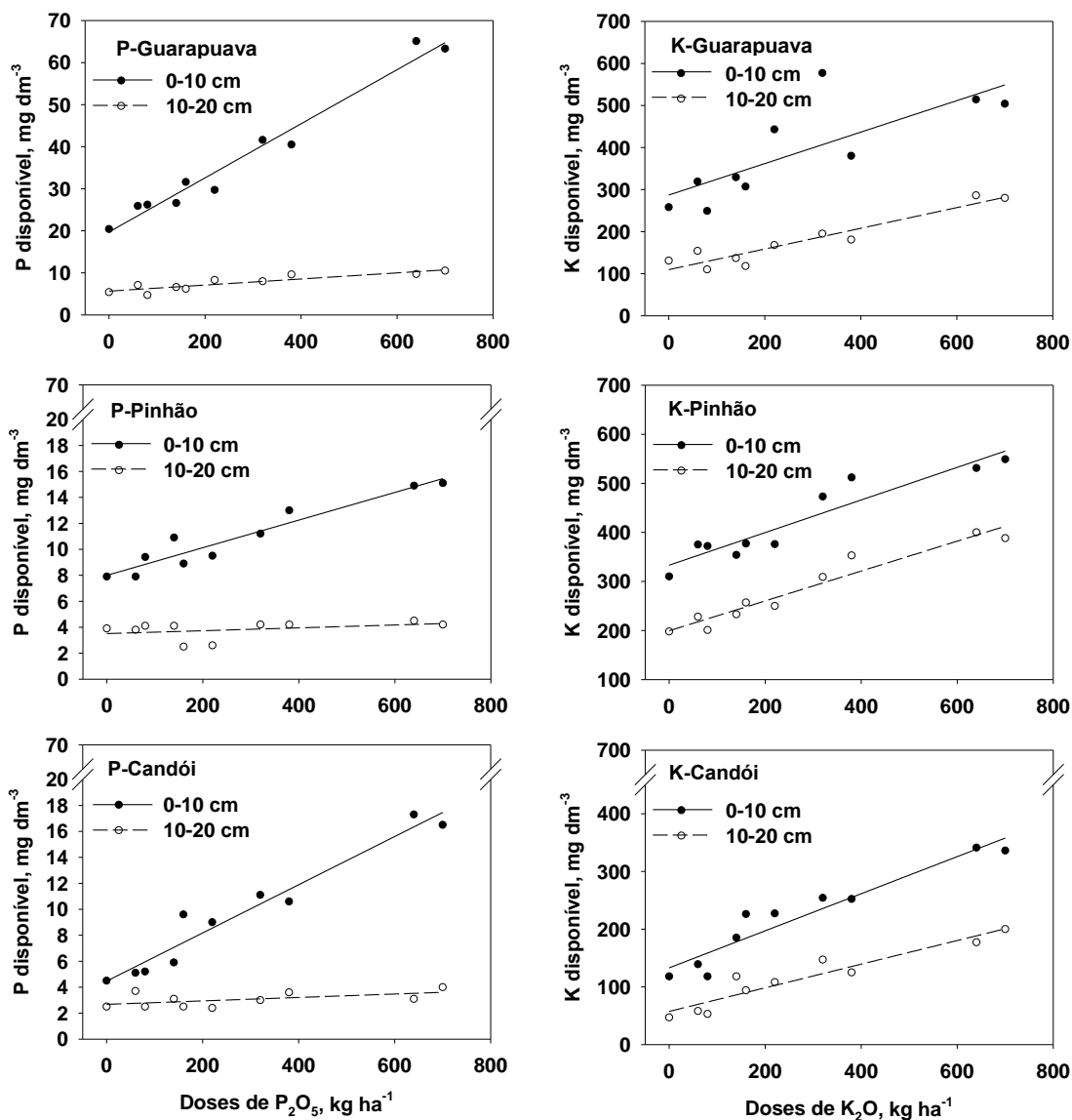


FIGURA 5. Incrementos no teor de P e K disponíveis no solo com a aplicação de doses de P₂O₅ e K₂O nos experimentos em Guarapuava, Pinhão e Candói, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

O aumento dos teores de K disponível no solo observados nos experimentos com doses de K₂O foram altamente significativos ($p < 0,01$) nas três áreas de estudo, nas duas camadas de solo (Tabela 13). Destaque deve ser dado ao fato que a adição das doses de K₂O aumentaram o teor de K no solo de forma semelhante na camada de 0-10 e 10-20 cm, como evidenciado pelos coeficientes angulares similares das equações de regressão linear (Tabela 13). Isso demonstra que para o potássio, a adubação em superfície no SPD exerce uma grande influência nos teores deste nutriente na camada também abaixo de 10 cm de profundidade.

TABELA 13. Equações de regressão polinomial dos incrementos no teor de P e K disponível no solo com a aplicação de doses de P_2O_5 e de K_2O nos experimentos em Guarapuava, Pinhão e Candói, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

Experimento	Prof.	Equação de regressão polinomial	r^2	p	Dose
					Fósforo
					kg $P_2O_5$¹
P-Guarapuava	0-10	$y=0,0643x+19,73$	0,97	<0,01	15,6
	10-20	$y=0,0072x+5,66$	0,80	<0,01	138,9
P-Pinhão	0-10	$y=0,0106x+7,99$	0,92	<0,01	94,3
	10-20	$y=0,0011x+3,51$	0,15	0,27	909,1
P-Candói	0-10	$y=0,0186x+4,47$	0,95	<0,01	53,8
	10-20	$y=0,0013x+2,68$	0,31	0,09	769,2
					Potássio
					kg K_2O²
K-Guarapuava	0-10	$y=0,3741x+287,0$	0,61	<0,01	2,7
	10-20	$y=0,2458x+109,6$	0,90	<0,01	4,1
K-Pinhão	0-10	$y=0,3322x+333,2$	0,89	<0,01	3,0
	10-20	$y=0,3043x+199,5$	0,94	<0,01	3,3
K-Candói	0-10	$y=0,3212x+132,9$	0,92	<0,01	3,1
	10-20	$y=0,2045x+57,5$	0,90	<0,01	4,9

¹ kg de P_2O_5 necessário para elevar o teor de P no solo em 1 mg dm^{-3} .

² kg de K_2O necessário para elevar o teor de K no solo em 1 mg dm^{-3} .

As equações de regressão obtidas pelos teores de P e K no solo (mg dm^{-3}) e a quantidade adicionada em P_2O_5 e K_2O (kg ha^{-1}) permitiram estimar a quantidade de fertilizante necessária para aumentar o teor do nutriente no solo em 1 mg dm^{-3} . Para o fósforo, a dose de P_2O_5 estimada teve grande variação entre os três locais (Guarapuava, Pinhão e Candói), sendo necessários para elevar 1 mg P dm^{-3} na camada de 0-10 cm, $15,6 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ em Guarapuava, $94,3 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ no solo em Pinhão e $53,8 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ no solo em Candói. As altas doses estimadas (139 a $909 \text{ } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$) para a camada de 10-20 cm mostram a pequena influência exercida pelas altas doses de fósforo nesta camada após apenas um ano da aplicação de P no solo.

Nos experimentos de potássio, a dose de K_2O estimada para elevar o teor de K em 1 mg dm^{-3} foi semelhante nos três locais, sendo em média $2,9 \text{ kg } K_2O \text{ ha}^{-1}$ para a camada 0-10 cm e $4,1 \text{ kg } K_2O \text{ ha}^{-1}$ para 10-20 cm.

As doses de P_2O_5 e K_2O estimadas neste trabalho são altas quando comparadas às observadas em solos do Rio Grande do Sul por Schlindwein (2003), de $17,2 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ e $0,9 \text{ kg } K_2O \text{ ha}^{-1}$ para a camada de 0-10 cm de profundidade.

6.3.3 Considerações finais e proposição da camada diagnóstica

A análise conjunta da relação entre os atributos do solo e o rendimento das culturas, e do efeito da aplicação de calcário e de fertilizantes fosfatados e potássicos na fertilidade do solo em profundidade no solo em SPD visando à definição da camada diagnóstica da fertilidade do solo no permite inferir que:

- A mudança de amostragem da camada para 0-10 cm para fins de análise da fertilidade do solo em SPD não apresentou nenhuma vantagem em comparação à camada diagnóstica atualmente utilizada de 0-20 cm.

- Ao contrário do verificado em solos do RS e SC, em que as alterações na fertilidade do solo pela calagem e adubação na superfície em restringiu-se praticamente à camada de 0-10 cm, nos solos da região sob SPD de longa duração, ocorre um significativo efeito da calagem e da adubação potássica na fertilidade da camada de 10-20 cm do solo. A adubação fosfatada também promoveu aumento da disponibilidade de P nesta camada, porém, em menor magnitude. Portanto, a camada fertilizada em SPD é a camada de 0-20 cm, e esse efeito da calagem e adubação nesta camada de solo como um todo é um fator que determina que a amostragem de 0-20 cm seja mais adequada na avaliação da fertilidade de solos em SPD na região.

Além desses aspectos, alguns outros fatores reforçam a proposição da camada diagnóstica de 0-20 cm para avaliação da fertilidade do solo:

- Na região em estudo é comum a ocorrência de teores altos de nutrientes, sobretudo na camada superficial do solo. Nesta condição de elevada fertilidade, a variação da fertilidade da camada subsuperficial do solo pode ser fundamental na nutrição vegetal, permitindo diferenciar áreas em que o solo foi ou não corrigido inicialmente na implantação do SPD.

- A camada subsuperficial (10-20 cm) do solo pode ser fator fundamental na nutrição vegetal em regiões e em anos agrícolas com ocorrência de déficit hídrico. Nestas situações, a amostragem do solo na camada de 0-20 cm seria potencialmente mais adequada na avaliação da fertilidade do solo do que a camada de 0-10 cm.

6.4 Critérios de acidez do solo

Os dois indicadores da acidez do solo utilizados neste estudo para a definição dos critérios de calagem foram o pH em CaCl_2 e a saturação por bases (V %). Dentre estes, o pH foi o indicador da acidez do solo que apresentou uma melhor relação com o rendimento das culturas (Figuras 6 e 7). O alumínio trocável e a saturação por alumínio não foram considerados como indicadores da acidez do solo em razão de apresentar uma pequena amplitude de valores no solo com grande variação no rendimento relativo, não permitindo assim a definição de critérios de calagem para estes indicadores.

A cultura da soja demonstrou-se mais sensível à acidez do solo, apresentando incremento no rendimento relativo de grãos com o aumento do pH do solo resultante da calagem. Este fato pode ser explicado pela relação existente entre a fixação biológica de nitrogênio (FBN) pelos rizóbios e o pH do solo (Moreira & Siqueira, 2006), reduzindo drasticamente a população de rizóbios abaixo do pH em água 5,5 (~pH 4,9 em CaCl_2) (Bala et al., 2003).

O critério de calagem observado para a cultura da soja foi de pH de 5,0 e V % de 65 % na camada 0-10 cm (Figura 6), e pH de 4,9 e V % de 60 % para a camada de 0-20 cm (Figura 7). Este valor de V % para a camada 0-20 cm está abaixo do recomendado pela Embrapa (2008b), que recomenda para a cultura da soja uma saturação por bases de 70 %. A saturação por bases de 60 % na camada 0-20 cm deste trabalho é a mesma recomendada no Estado de São Paulo (Raij et al., 1997), bem como os critérios para a camada de 0-10 cm são idênticos à recomendação de calagem para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004), que recomenda pH em água de 5,5 (~pH 4,9 em CaCl_2) e V % de 65 %.

Os valores dos critérios de calagem encontrados neste trabalho também foram similares aos obtidos nos trabalhos de Nolla & Anghinoni (2006), que encontraram como critérios de acidez do solo em SPD na camada de 0-10 cm os valores de pH em CaCl_2 de 4,7 e saturação por bases de 64 %, e o de Nicolodi et al. (2008), que avaliaram o rendimento de grãos em áreas de lavouras, sugerindo como critérios de calagem para a camada de 0-10 cm o pH em CaCl_2 de 5,2 e V % de 65 %, e para a camada de 0-20 cm o pH de 5,0 e V % de 60 %.

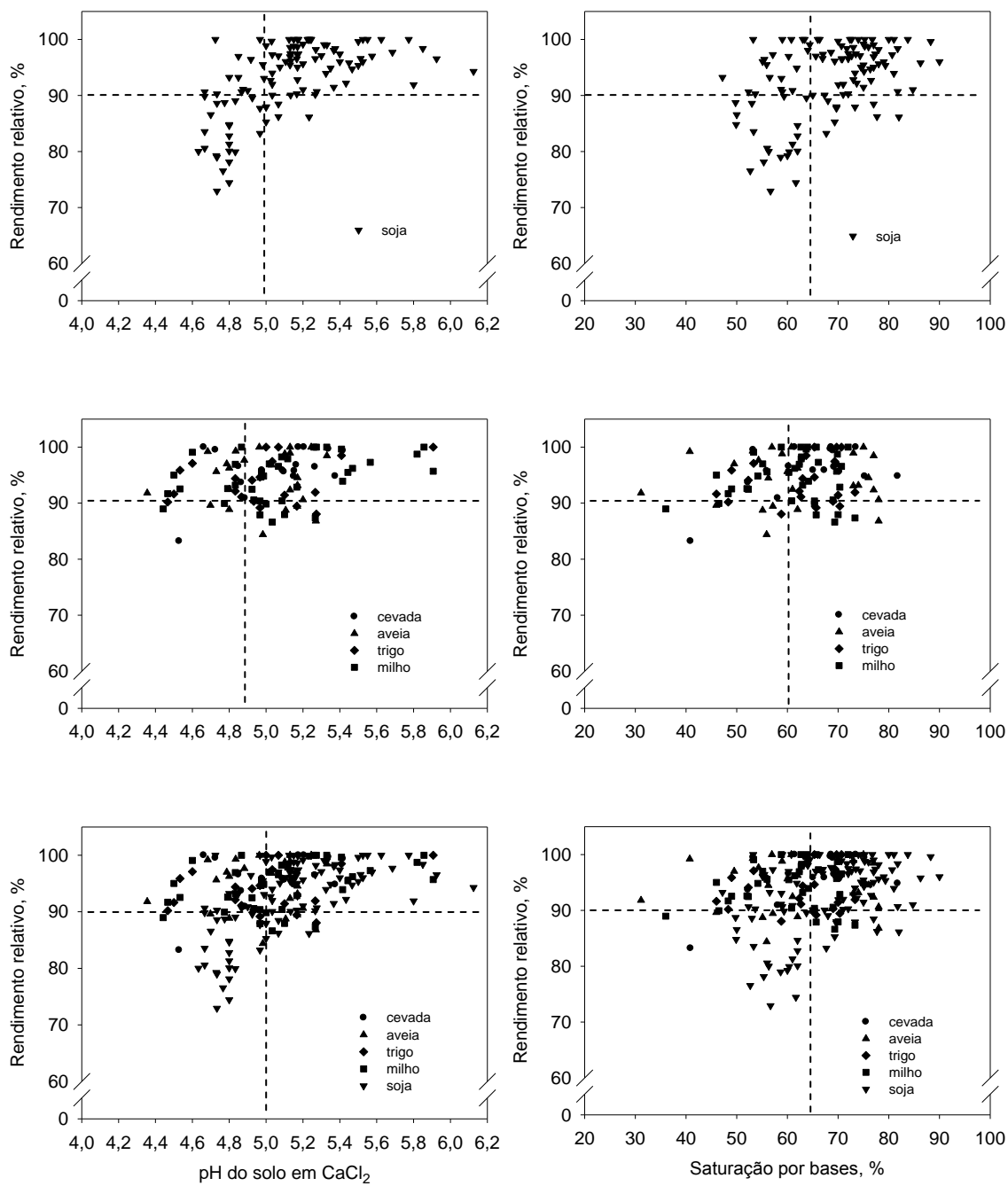


FIGURA 6. Relação entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de acidez do solo na camada de 0-10 cm de profundidade sob sistema plantio direto.

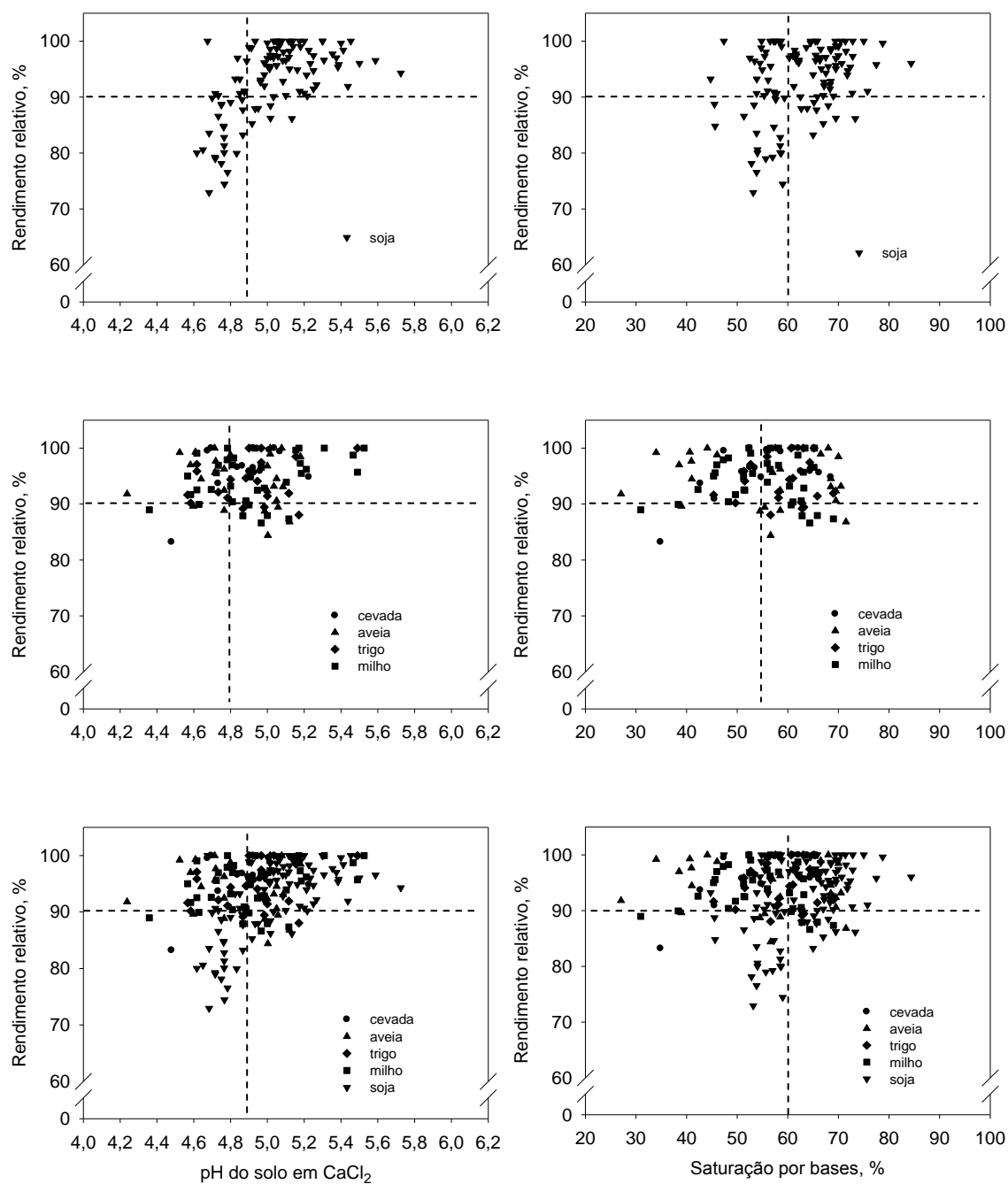


FIGURA 7. Relação entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de acidez do solo na camada de 0-20 cm de profundidade sob sistema plantio direto.

As gramíneas cultivadas (aveia branca, cevada, trigo e milho) apresentaram pequena resposta à calagem, apresentando valores de rendimento relativo acima de 80 % na faixa de pH de 4,3 a 6,0 e V % de 30 a 80 % na camada 0-10 cm, e de pH 4,2 a 5,6 e V % 25 a 70 % na camada 0-20 cm (Figuras 6 e 7).

Os valores de referência de pH e V % para as gramíneas foram inferiores aos obtidos para a soja, sendo de pH 4,9 e de V % de 60 % para a camada 0-10 cm e pH 4,8 e de V % de 55 % para a camada 0-20 cm. Esta baixa resposta das culturas gramíneas à calagem pode estar relacionada ao alto teor de matéria orgânica nestes solos ($>50 \text{ g dm}^{-3}$), que reduz a toxicidade do alumínio no solo, proporcionando alto rendimento das culturas mesmo em condição de baixa fertilidade do solo (Miyazawa et al., 1993; Franchini et al., 1999; Vieira et al., 2009).

A recomendação para o trigo e triticale (RCBPTT, 2008) indica como critério de calagem para estas culturas a saturação por bases de 60 % (0-20 cm), a qual corrobora com a indicação de Raij et al., (1997) para cultivares de trigo tolerantes à acidez do solo.

Para a cultura do milho, o Estado de São Paulo considera como teor critério de calagem V % de 70 % (0-20 cm). Entretanto, em condições onde o teor de matéria orgânica está acima de 50 g dm^{-3} , o valor de V % crítico é reduzido à 50 %, semelhante ao valor de 55 % obtido neste trabalho (Figura 7). Para a cultura da cevada e aveia branca, a saturação por bases adotada pelo Estado de São Paulo é de 70 % (Raij et al., 1997), independente dos outros atributos químicos do solo.

Quando reunidas todas as culturas em análise conjunta, os critérios de calagem obtidos são os mesmos para a cultura da soja, a qual é a cultura mais importante nos sistema de rotação de culturas da região Centro-Sul do Paraná. Assim, os critérios de calagem para a rotação de culturas na camada 0-10 cm são pH do solo em CaCl_2 de 5,0 e saturação por bases de 65 % e, para a camada 0-20 cm, pH de 4,9 e saturação por bases de 60 % (Tabela 14).

TABELA 14. Critérios de calagem para as culturas de soja, aveia branca, trigo, cevada e milho, sob sistema plantio direto, em duas profundidades de amostragem.

Culturas	pH CaCl_2		Saturação por bases (%)	
	0-10 cm	0-20 cm	0-10 cm	0-20 cm
Soja	5,0	4,9	65	60
Aveia branca, trigo, cevada e milho	4,9	4,8	60	55
Rotação de culturas	5,0	4,9	65	60

Estes resultados indicam que não há necessidade de correção da saturação por bases até 70 % no SPD, como sugerido pela Embrapa (2008b), que sugere este valor como referência também para o sistema de preparo convencional.

6.5 Determinação dos teores críticos de fósforo e potássio no solo

As curvas de rendimento relativo de fósforo e potássio foram construídas a partir dos dados de rendimento relativo das culturas em relação aos teores de P e K no solo de oito experimentos conduzidos a campo, totalizando 107 observações.

No geral, as culturas de inverno (aveia branca, trigo e cevada) apresentaram maior incremento no rendimento de grãos com a aplicação de fósforo e potássio do que as culturas de verão (milho e soja), refletindo em uma faixa de rendimentos relativos das culturas de inverno mais ampla (51 a 100 %) que as culturas de verão (80 a 100 %) (Tabela 8, Figuras 8 e 9).

Em razão destas divergências de respostas das diferentes culturas à adubação, para o estudo dos teores críticos de fósforo e potássio, as culturas foram agrupadas pela sua semelhança na resposta, separando as culturas de inverno (Figura 8a e 9a) das culturas de verão (Figura 8b e 9b), para as duas profundidades de amostragem. Em adição, uma análise geral com todas as culturas do sistema de rotação foi realizada, visando à comparação com sistemas de recomendação que não discriminam as culturas no teor crítico (Figura 8c e 9c).

Os ajustes dos dados de rendimento relativo de grãos e os respectivos teores de nutrientes no solo através da equação de Mitscherlich apresentaram coeficientes de determinação (r^2) variando de 0,35 a 0,82 para fósforo, e 0,48 a 0,83 para o potássio (Figuras 8 e 9), sendo todos altamente significativos ($p < 0,01$). Em virtude de se tratar de um estudo envolvendo experimentos de campo em locais diferentes, com várias safras e anos de condução, alguns coeficientes considerados baixos em condição singular tornam-se aceitáveis neste estudo.

6.5.1 Teor crítico de fósforo no solo

O teor crítico de fósforo obtido na camada 0-10 cm para os cereais de inverno foi de $10,8 \text{ mg dm}^{-3}$ e para as culturas de verão foi de $7,4 \text{ mg dm}^{-3}$ (Figura 8). Quando consideradas conjuntamente as cinco culturas do sistema de rotação, o teor crítico foi intermediário, de $9,1 \text{ mg dm}^{-3}$. Este valor é superior ao teor crítico de fósforo sugerido pela CQFS-RS/SC (2004) pra solos com teor de argila acima de 600 g kg^{-1} (6 mg dm^{-3}) e inferior ao valor de $10,5 \text{ mg dm}^{-3}$, encontrado por Schlindwein & Gianello (2008) para solos com teor de argila acima de 550 g kg^{-1} .

Na camada de 0-20 cm, os teores críticos de fósforo foram inferiores à camada de 0-10 cm (Figura 8). Para os cereais de inverno, o teor crítico encontrado foi de $7,5 \text{ mg dm}^{-3}$, um pouco inferior ao teor de $9,0 \text{ mg dm}^{-3}$ (0-20 cm), recomendado para o trigo e triticale (RCBPTT, 2008).

Para a cultura da soja e milho, o teor crítico de fósforo na camada de 0-20 cm foi de $6,8 \text{ mg dm}^{-3}$, valor muito semelhante à 6 mg dm^{-3} , atual recomendação para a soja no Paraná (Embrapa, 2008b).

Analisando o conjunto com todas as culturas utilizadas na rotação, o teor crítico de P na camada de 0-20 cm foi de $7,1 \text{ mg dm}^{-3}$, muito semelhante ao valor de $7,6 \text{ mg dm}^{-3}$ sugerido por Schlindwein & Gianello (2008) para solos do RS e, superior ao teor crítico de 6 mg dm^{-3} recomendado para culturas anuais no cerrado por Sousa & Lobato, (2004). Esta variação de teores críticos encontrados pelos autores supracitados sugere que os teores críticos são influenciados por características locais, necessitando de uma calibração dos teores críticos a nível regional.

Além da variação existente entre as regiões, o teor crítico também pode ser influenciado por características químicas do solo na mesma região. Neste sentido, Sousa & Lobato (2004) observaram a influência da matéria orgânica (MO) no teor crítico de fósforo em um Latossolo muito argiloso, reduzindo o teor crítico de 6 mg dm^{-3} para 3 mg dm^{-3} com o aumento do teor de MO de $28,4 \text{ g kg}^{-1}$ para $37,3 \text{ g kg}^{-1}$.

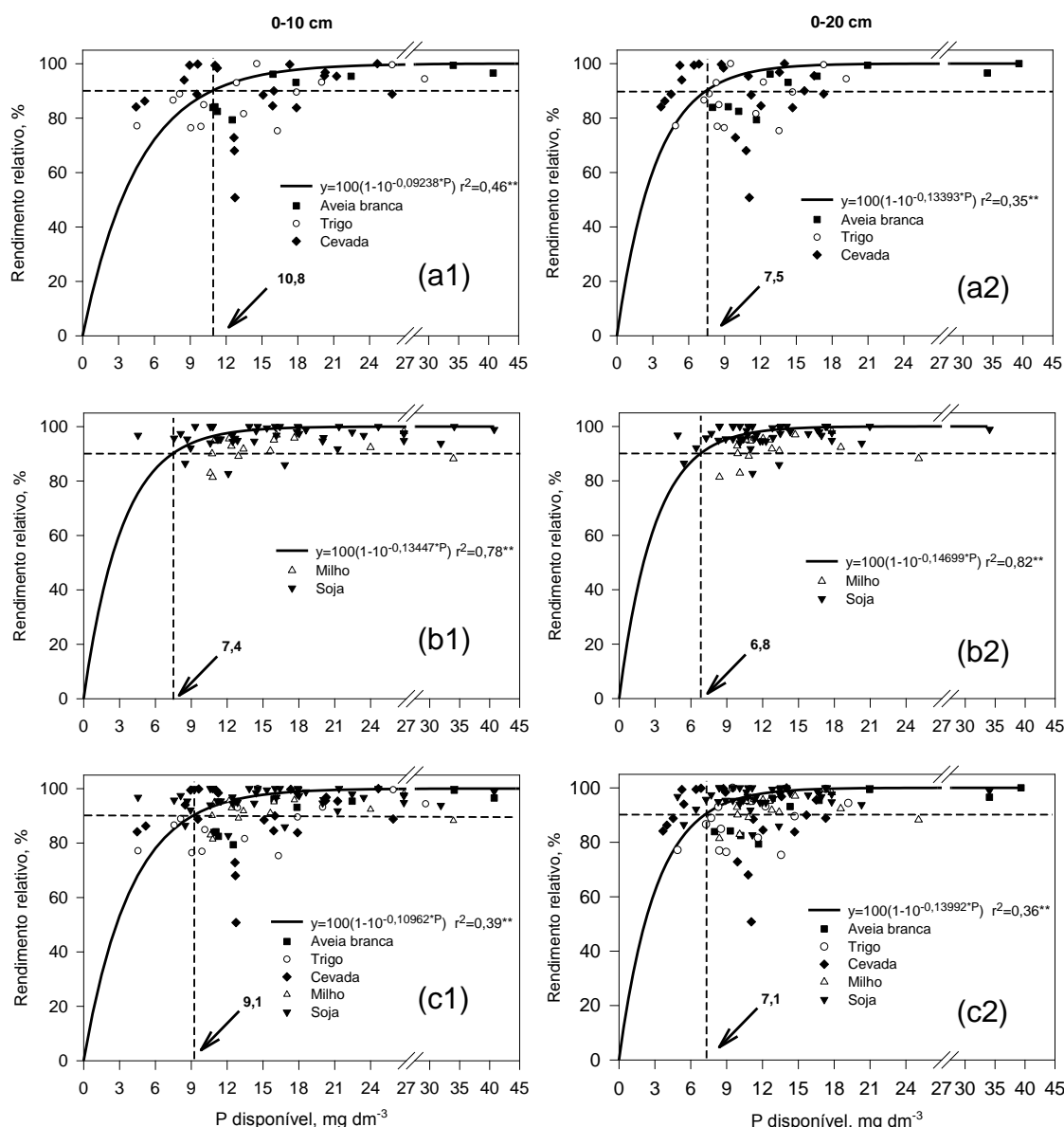


FIGURA 8. Rendimento relativo de aveia branca, trigo e cevada (a), milho e soja (b) e todas as culturas (c) em função do fósforo disponível no solo pelo extrator Mehlich-1 nas camadas de 0-10 e 0-20 de profundidade.

As recomendações mais avançadas de fósforo para as culturas anuais consideram o teor de argila no solo como uma variável no teor crítico deste nutriente, principalmente quando relacionado com a análise de solo utilizando o extrator Mehlich-1, onde solos argilosos apresentam teores críticos menores que solos arenosos (CQFS-RS/SC, 2004; Sousa & Lobato, 2004; Schlindwein & Gianello, 2008). Entretanto, neste trabalho, todos os solos apresentam um teor de argila acima de 60 %, não sendo possível a discriminação pelo teor de argila.

6.5.2 Teor crítico de potássio no solo

Para o potássio, os teores críticos apresentaram comportamento semelhante ao fósforo, sendo maiores para os cereais de inverno e na camada de 0-10 cm. Assim, o teor crítico de potássio na camada de 0-10 cm foi de 156 mg dm⁻³ para os cereais de inverno e 81,7 mg dm⁻³ para a soja e milho (Figura 9). Para o sistema de rotação de culturas (todas culturas em conjunto), o teor crítico de K estimado na camada de 0-10 cm foi de 110,4 mg dm⁻³, valor este muito inferior ao sugerido por Schlindwein & Gianello (2008), de 185 mg dm⁻³ e, superior ao teor de 90 mg dm⁻³, indicado pela CQFS-RS/SC (2004) para solos com CTC_{pH7,0} acima de 15 cmol_c dm⁻³ (que é o caso da maioria dos solos da região Centro-Sul do Paraná).

A divisão dos solos pela CTC para o teor crítico de potássio é utilizada em calibrações em estágio mais avançado (CQFS-RS/SC, 2004; Sousa & Lobato, 2004), e objetiva principalmente manter uma saturação de K na CTC do solo em uma faixa adequada, evitando salinidade e perdas de K por lixiviação (Sousa & Lobato, 2004).

Na camada de 0-20 cm, o teor crítico de potássio encontrado no estudo para os cereais de inverno (118 mg dm⁻³) foi muito semelhante à recomendação existente para o trigo e triticale, de 120 mg dm⁻³ (RCBPTT, 2008). Entretanto, o mesmo teor de 120 mg dm⁻³, recomendado para a soja (Embrapa, 2008b), é cerca de duas vezes maior que o teor crítico encontrado neste estudo para a soja e o milho, de 63,4 mg dm⁻³ (Figura 9).

Em geral, os teores críticos de fósforo e potássio na camada de 0-10 cm foram 30 % superiores aos teores da camada 0-20 cm de profundidade (Tabela 15). No trabalho de Schlindwein & Gianello (2008), a diferença entre os teores críticos nas camadas de 0-10 e 0-20 cm foi de 38 % maior na camada de 0-10 cm para o fósforo e 52 % para o potássio. O acúmulo destes nutrientes na camada mais superficial em SPD gerando o gradiente de concentração no perfil do solo explica esta diferença entre as camadas (Eltz et al., 1989; Schlindwein & Anghinoni, 2000).

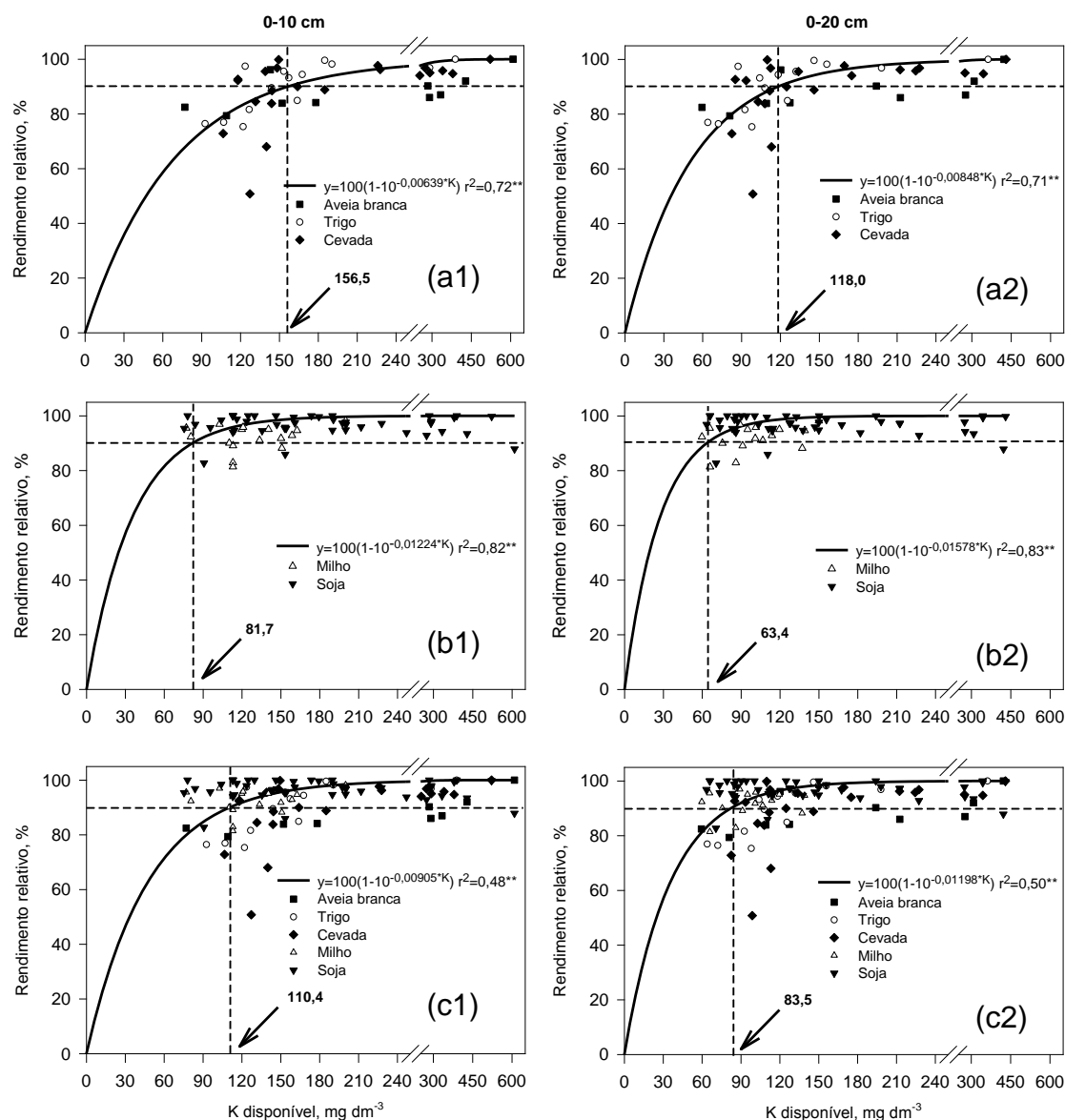


FIGURA 9. Rendimento relativo de aveia branca, trigo e cevada (a), milho e soja (b) e todas as culturas (c) em função do potássio disponível no solo pelo extrator Mehlich-1 nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade.

TABELA 15. Teores críticos de fósforo e potássio para as culturas de inverno (aveia branca, trigo e cevada), verão (milho e soja) e todas as culturas, sob sistema plantio direto, nas camadas de 0-10 e 0-20 cm de profundidade.

Culturas	Fósforo		Potássio	
	0-10 cm	0-20 cm	0-10 cm	0-20 cm
	----- mg dm ⁻³ -----			
Aveia branca, trigo e cevada	11	8	160	120
Milho e Soja	7	6	80	60
Rotação de culturas	9	7	110	90

6.6 Recomendações preliminares de critérios para o manejo da calagem e adubação fosfatada e potássica para o sistema de rotação de culturas predominante na região Centro-Sul do Paraná

A recomendação dos critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio dos solos em SPD na Região Centro-Sul do Paraná foi baseada na condição que a fertilidade do solo deve ser manejada visando atender as exigências da cultura mais exigente do sistema de rotação de culturas. Este critério do nivelamento da fertilidade do solo pela cultura mais exigente é necessário visto que esta é uma recomendação para um sistema de rotação de culturas, objetivando-se o máximo retorno econômico, em uma região com alto potencial produtivo de grãos.

A cultura mais exigente verificada nos critérios de calagem foi a soja. Caso oposto ocorreu nos teores críticos de fósforo e potássio, onde as culturas de maiores exigências foram os cereais de inverno (aveia branca e, principalmente, cevada e trigo). Assim, o critério de calagem recomendado para a camada de 0-20 cm é de pH do solo em CaCl_2 de 4,9 e V % de 60 % e, o teor crítico de fósforo é de $8,0 \text{ mg dm}^{-3}$ e de potássio é de 120 mg dm^{-3} (Tabela 16).

TABELA 16. Recomendação de critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná.

Profundidade	Acidez do solo		P disponível	K disponível
	pH CaCl_2	V %		
cm		%	----- mg dm^{-3} -----	
0-10	5,0	65	11	160
0-20	4,9	60	8,0	120

Contudo, as recomendações apresentadas são preliminares. Há necessidade da condução de experimentos, principalmente para os teores críticos de fósforo e potássio, em áreas que apresentem teores destes nutrientes no solo que proporcionem rendimentos de grãos baixos, principalmente abaixo de 70 %, permitindo assim, um melhor ajuste da curva de calibração, incrementando a confiabilidade no teor crítico do nutriente para a região em estudo.

7. CONCLUSÕES

No sistema plantio direto, as alterações nos atributos do solo com a calagem e adubações fosfatadas e potássicas não são restritas à camada superficial de 0-10 cm, sendo a camada de 0-20 cm de profundidade, a camada do solo mais adequada para a avaliação da fertilidade do solo em sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná.

Os critérios de calagem para a camada de 0-20 cm em solos sob sistema plantio direto foram pH em CaCl_2 de 4,9 e saturação por bases de 60 %, sendo inferior à atual recomendação de saturação por bases de 70 %.

Os teores críticos de fósforo e potássio para a camada de 0-20 cm de profundidade, nas áreas com rotação de culturas sob sistema plantio direto na região Centro-Sul do Paraná, foram de 8 mg dm^{-3} de fósforo e de 120 mg dm^{-3} de potássio.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRÁRIA. **Agrária em Números.** Disponível em: <<http://www.agraria.com.br/>>. Acesso em: 19/02/2010.

AGROSOFT. **Paraná vai estimular a retomada do sistema de plantio direto na palha.** Disponível em: <<http://www.agrosoft.org.br/agropag/103907.htm>>. Acesso em: 11/12/2009.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 115-123, 2004a.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; HINRICHES, R.; BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 359-367, 2004b.

ANGHINONI, I. Amostragem do solo, dinâmica da acidez e calagem em plantio direto. In: FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. (Eds.) **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. p.31-57.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.873-928.

ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Amostragem de solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N. J. (Ed.) **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p.27-52.

ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Reaplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado. In: KAMINSKI, J. (Ed.) **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: Núcleo Regional Sul, 2000. p.41-59. (Boletim Técnico, 4)

BALA, A.; MURPHY, P. J.; OSUNDE, A. O.; GILLER, K. E. Nodulation of tree legumes and the ecology of their native rhizobial populations in tropical soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 22, n. 3, p. 211-223, 2003.

BORGES, G. O. Resumo histórico do plantio direto no Brasil. In: EMBRAPA-CNPT; FECOTRIGO-FUNDACEP; ABC, F. (Eds.) **Plantio Direto no Brasil**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. p.13-18.

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, n. 1, p. 161-169, 2000.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 27-34, 1998.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 125-136, 2004.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; FUENTES LLANILLO, R. **Fatores que promoveram a evolução do sistema plantio direto e desenvolvimento de máquinas agrícolas motomecanizadas.** Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/informativos/ed36_febra.pdf>. Acesso em: 10/12/2009.

CATE, R. B., JR.; NELSON, L. A. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 35, n. 4, p. 658-660, 1971.

CERETTA, C. A. Ciclagem de nutrientes como estratégia à maior eficiência no uso dos nutrientes. In: FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. (Eds.) **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. p.105-116.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. E.; FONTOURA, S. M. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; WOBETO, C. Acidificação de um latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1055-1064, 2002.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 317-326, 2004.

CORRÊA, J. C.; FREITAG, E. E.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, D. M.; MARCELINO, R. Aplicação superficial de calcário e diferentes resíduos em soja cultivada no sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 1059-1068, 2009.

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 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008.

COSTA, S. E. V. G. A.; SOUZA, E. D.; 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, n. 5, p. 1237-1247, 2009.

CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

CUBILLA, M. M.; AMADO, T. J. C.; WENDLING, A.; ELTZ, F. L. F.; MIELNICZUK, J. Calibração visando à fertilização com fósforo para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1463-1474, 2007.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo sob sistemas de manejo com milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 4, p. 471-477, 1993.

DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH; Curitiba: IAPAR, 1991. 268 p.

DICK, D. P.; SCHWERTMANN, U. Microaggregates from Oxisols and Inceptisols: Dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 74, n. 1-2, p. 49-63, 1996.

ELTZ, F. L. F.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 259-267, 1989.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Paraná**. Londrina: Embrapa-SNLCS : SUDESUL : IAPAR, 1984. 414 p. (Embrapa-SNLCS, Boletim Técnico, 57)

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja - Paraná 2007**. Londrina: Embrapa Soja, 2006a. 217 p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006b. 306 p.

EMBRAPA. **Indicações técnicas para produção de cevada cervejeira nas safras 2007 e 2008**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 104 p. (Sistemas de Produção, 3)

EMBRAPA. **Informações técnicas para a safra 2008:** trigo e triticale. Londrina: Embrapa Soja, 2008a. 147 p. (Documentos, 301)

EMBRAPA, S. **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil – 2009 e 2010.** Londrina: Embrapa Soja : Embrapa Cerrados : Embrapa Agropecuária Oeste, 2008b. 262 p. (Sistemas de Produção, 13)

FANTE JR, L.; REICHARDT, K.; JORGE, L. A. D. C.; BACCHI, O. O. S. Distribuição do sistema radicular de uma cultura de aveia forrageira. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1091-1100, 1999.

FENTON, G.; HELYAR, K. The role of the nitrogen and carbon cycle in soil acidification. **Encarte Técnico do Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 1, n. 98, p. 1-10, 2002.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na Região Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1721-1732, 2009.

FRANCHINI, J. C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 533-542, 1999.

GASSEN, D.; KOCHHANN, R. A. Benefícios de insetos de solos sob plantio direto. In: NUERNBERG, N. J. (Ed.) **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p.151-160.

HELYAR, K. R. Nitrogen cycling and soil acidification. **Journal of the Australian Institute of Agricultural Science**, North Ryde, v. 42, n. 4, p. 217-221, 1976.

HELYAR, K. R.; PORTER, W. M. Soil acidification, its measurement and the processes involved. In: ROBSON, A. D. (Ed.) **Soil acidity and plant growth**. Sydney: Academic Press, 1989. p.61-101.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal - Cereais, Leguminosas e Oleaginosas 2007.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pamclo/2007/pamclo2007.pdf>>. Acesso em: 11/12/2009.

INDA JUNIOR, A. V.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; SALTON, J. C.; TONIN, A. T. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1301-1307, 2007.

LANTMANN, A. F.; ROESSING, A. C.; SFREDO, G. J.; OLIVEIRA, M. C. N. **Adubação fosfatada e potássica para sucessão soja-trigo em latossolo roxo distrófico sob semeadura direta.** Londrina: Embrapa Soja, 1996. 44 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 15)

MAPA. **Plantio direto ocupa 70% das áreas de lavoura de grãos.** Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 10/12/2009.

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. (Eds.) **Potássio na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p.165-178.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.; DEBARBA, L. Manejo de solos e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p.209-248.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 411-416, 1993.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Evaluation of Plant Residues on the Mobility of Surface Applied Lime. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 251-256, 2002.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A Modified Single Solution Method for Determination of Phosphate in Natural Waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 26, n. 1, p. 31-&, 1962.

MUZILLI, O. Adubação fosfatada no Estado do Paraná. In: OLIVEIRA, A. J. (Ed.) **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília: Embrapa, 1982. p.61-101.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 1, p. 95-102, 1983.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 237-247, 2008.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 475-483, 2006.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-550.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, n. 1-2, p. 47-57, 1996.

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ, V.,

V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Eds.) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p.393-486.

PAIVA, P. J. R.; VALE, F. R.; FURTINI NETO, A. E.; FAQUIN, V. Acidificação de um latossolo roxo do estado do Paraná sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 71-75, 1996.

PAVAN, M. A. Movimentação de calcário no solo através de técnicas de manejo de cobertura vegetal em pomares de macieira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 16, n. 1, p. 86-91, 1994.

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

REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE. **Informações técnicas para a safra 2008: trigo e triticale**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 147 p.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 151-160, 2001.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems under subtropical conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, n. 15-16, p. 2339-2354, 2003.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no sistema de 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. (Eds.) **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - UFLA, 1999. p.267-319.

SÁ, J. C. M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.) **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p.201-222.

SCHLINDWEIN, J. A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto**. 2003. 169 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 611-617, 2000.

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**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2037-2049, 2008.

SELLES, F.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; ZENTNER, R. P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1-2, p. 23-34, 1997.

SILVA, M. A. C. D.; NATALE, W.; PRADO, R. D. M.; CORRÊA, M. C. M.; STUCHI, E. S.; ANDRIOLI, I. Aplicação superficial de calcário em pomar de laranjeira pêra em produção. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 606-612, 2007.

SORRENSON, W. J.; MONTOYA, L. J. **Implicações econômicas da erosão do solo e do uso de algumas práticas conservacionistas no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1989. 110 p. (Boletim Técnico, 21)

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Correção do solo e adubação da cultura da soja**. Planaltina: Embrapa CPAC, 1996. 30 p. (Embrapa CPAC. Circular Técnica, 33)

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2008. 330 p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H. V., S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p. (Boletim Técnico 5)

VIEIRA, F. C. B.; BAYER, C.; ZANATTA, J.; ERNANI, P. R. Organic matter kept Al toxicity low in a subtropical no-tillage soil under long-term (21-year) legume-based crop systems and N fertilisation. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 47, n. 7, p. 707-714, 2009.

VIEIRA, F. C. B.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; ZANATTA, J.; BISSANI, C. A. Long-term acidification of a Brazilian Acrisol as affected by no till cropping systems and nitrogen fertiliser. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 46, n. 1, p. 17-26, 2008.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F. C. B.; MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 510-519, 2007.