



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, A. L.; CAMPOS, M. L.
INFLUÊNCIA DA COMBINAÇÃO DE FÓSFORO E CALCÁRIO NO RENDIMENTO DE MILHO
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 24, núm. 3, 2000, pp. 537-544
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218342007>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

SEÇÃO IV - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

INFLUÊNCIA DA COMBINAÇÃO DE FÓSFORO E CALCÁRIO NO RENDIMENTO DE MILHO⁽¹⁾

P. R. ERNANI⁽²⁾, J. A. L. NASCIMENTO⁽³⁾,
M. L. CAMPOS⁽⁴⁾ & R. J. CAMILLO⁽⁴⁾

RESUMO

A presença de Al em níveis tóxicos no solo inibe o crescimento das raízes com reflexos negativos na absorção de água e de alguns nutrientes, especialmente do P. Sendo assim, a adição de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados deverá tornar a absorção de P menos dependente da existência de um amplo sistema radicular e com isto diminuir a resposta das culturas à calagem. O presente trabalho objetivou avaliar o rendimento de milho de acordo com a aplicação de quantidades crescentes de P e de calcário. O experimento foi desenvolvido em Lages (SC), de 1994 a 1998, num Latossolo Bruno argiloso com pH 4,7, Al trocável = 39 mmol_c kg⁻¹, 1 mg kg⁻¹ de P, que requeriam 9,0 t ha⁻¹ de calcário para elevar o pH a 6,0. Combinaram-se três doses de calcário (0, 4,5 e 9,0 t ha⁻¹) com quatro de P, no delineamento de parcelas subdivididas. As quantidades de P₂O₅ foram, respectivamente, de 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹, na primeira safra; de 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹, na segunda e na quarta, e de 30, 60, 90, e 120 kg ha⁻¹, na terceira safra, perfazendo uma média de 42, 85, 127 e 170 kg ha⁻¹ por cultivo, respectivamente. O efeito benéfico da calagem aumentou com o passar dos anos, de inexistente, no primeiro cultivo, para incrementos de até 39% no rendimento de milho. Na maioria das safras, a produtividade aumentou somente até pH 5,4, quando foi aplicada metade da dose de calcário recomendada pelo método SMP para elevar o pH até 6,0. Nos tratamentos que receberam as duas maiores doses de P₂O₅ (127 e 170 kg ha⁻¹ por cultivo), (média de 85 kg ha⁻¹ por cultivo), a calagem não influiu no rendimento de milho. A adubação fosfatada aumentou a produtividade de milho em todas as safras, porém em magnitudes que decresceram com a elevação do pH. Os maiores rendimentos foram obtidos com a dose recomendada em duas delas, porém, em outras duas, a quantidade necessária foi 50% maior.

Termos de indexação: calagem, adubação fosfatada, solos ácidos.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em abril de 1999 e aprovado em abril de 2000.

⁽²⁾ Professor do curso de Agronomia da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC. Av. Luis de Camões 2090, Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). Bolsista do CNPq. E-mail: prernani@cav.udesc.br.

⁽³⁾ Pesquisador da EPAGRI, CTA-Planalto Serrano. Rua João José Godinho s/n, Caixa Postal 181, CEP 88502-970 Lages (SC).

⁽⁴⁾ Graduando de Agronomia. Bolsista de Iniciação Científica do CNPq.

SUMMARY: INFLUENCE OF PHOSPHORUS AND LIMING COMBINATION ON CORN YIELD

The existence of soil exchangeable Al in toxic levels inhibits root growth and elongation, with negative effects on water and nutrient uptake, especially of P. Thus, as soil P increases, plants become less dependent on a large root system, that may decrease crop response to liming. This study was carried out to evaluate the effect of liming and phosphorus fertilization on corn yield. The experiment was conducted in Lages, Southern Brazil, from 1994 to 1998, in a clayed Oxisol (Hapludox) with pH 4.7, exchangeable Al of 39 mmol_c kg⁻¹, P of 1.0 mg kg⁻¹, and liming requirement of 9 t ha⁻¹ to raise soil water pH to 6.0. Treatments consisted of a factorial with three rates of liming (0, 4.5 and 9.0 t ha⁻¹) and four of P₂O₅, respectively 60, 120, 180 and 240 kg ha⁻¹ in the first crop; 40, 80, 120 and 160 kg ha⁻¹ in the second and fourth crop; and 30, 60, 90, and 120 kg ha⁻¹ in the third crop. The effect of liming increased with time from null in the first year up to increments of 39% on corn yield. On most growing seasons, yield increased up to pH 5.4, where half of the liming required to achieve pH 6.0 was applied. On treatments that received the two highest rates of P₂O₅ (127 and 170 kg⁻¹ ha⁻¹ per crop), liming had no effect on corn yield. Addition of P increased corn yield in all seasons but the magnitude decreased as soil pH increased. The highest productivities were obtained with recommended P rate in two growing seasons, but in the remaining two, it was necessary to apply 50% more.

Index terms: liming, phosphorus fertilization, acid soils.

INTRODUÇÃO

A toxidez de Al e a deficiência de P são os principais entraves químicos ao aumento da produtividade da maioria das espécies vegetais cultivadas nos solos extremamente ácidos do sul do Brasil. No estado de Santa Catarina, grande parte dos solos revela pH inferior a 5,0 (Ernani & Almeida, 1986), alcançando, nas regiões de maior altitude, concentração de Al trocável superior a 30 mmol_c kg⁻¹, saturação por Al maior que 50%, saturação por bases inferior a 25%, além de requerer mais de 10 t ha⁻¹ de calcário para elevar o pH até 6,0 (Ernani & Almeida, 1986; Almeida et al., 1999). Nessas regiões, a grande quantidade de calcário necessária para a correção do solo representa alto custo inicial no estabelecimento das lavouras, principalmente se a calagem for feita numa só vez.

A fitotoxidez do Al manifesta-se principalmente por meio da restrição no crescimento das raízes (Ernani & Barber, 1991; Miyazawa et al., 1992; Rheinheimer et al., 1994), com reflexos negativos na absorção (Barber & Chen, 1990; Ernani & Barber, 1991), na translocação de nutrientes (Rheinheimer et al., 1994; Braccini et al., 1998) e na absorção de água. O P é o nutriente mais afetado, dada sua pequena mobilidade no solo em direção às raízes. Por isso, a absorção de P depende de um amplo sistema radicular e ela aumenta na razão direta do volume de solo ocupado com as raízes (Barber & Chen, 1990). A toxidez do Al também prejudica a absorção de P por diminuir a velocidade máxima de

absorção, V_{max}, (Castells et al., 1985) e por aumentar os valores da constante de Michaelis-Menten, K_m, (Castells et al., 1985; Petry et al., 1994) e da concentração de P na solução abaixo da qual a absorção paralisa, C_{min}, (Petry et al., 1994). A translocação de P das raízes para a parte aérea é prejudicada pelo Al graças à formação de compostos insolúveis entre esses dois elementos no sistema radicular (McCormick & Borden, 1974). A formação de precipitados de fosfatos de ferro e de alumínio no solo também contribui para a diminuição da disponibilidade de P aos vegetais em solos muito ácidos.

A solubilidade do Al diminui com a calagem e, quando o pH do solo atinge valores superiores a 5,4-5,5, o Al³⁺ precipita completamente (Ernani & Almeida, 1986) e deixa de prejudicar as plantas. A atividade do Al³⁺ e seu efeito tóxico também diminuem com a aplicação de resíduos orgânicos ao solo (Ernani & Gianello, 1983), mediante reações de complexação (Miyazawa et al., 1992) ou de gesso agrícola (Ernani, 1986), em decorrência, principalmente, do aumento de Ca no solo (Ernani, 1986) e da formação do par iônico AlSO₄⁺ (Kinraide & Parker, 1987). A adição de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados também pode diminuir a resposta das culturas à calagem (Vidor & Freire, 1972; Mendez & Kamprath, 1978), em virtude do aumento da difusão de P em direção às raízes, da diminuição da atividade do Al na solução do solo (Ernani & Barber, 1991) e internamente na raiz, em consequência de suas ligações com o P.

Em termos de reações no solo, há uma relação de substituição positiva entre adubação fosfatada e aplicação de calcário, na qual o aumento de um insumo provoca melhor eficiência de utilização do outro pelas plantas (Vidor & Freire, 1972). Além dos efeitos benéficos sobre as plantas, a elevação do pH aumenta as cargas negativas do solo e diminui a solubilidade do Fe e do Al e com isso aumenta a concentração de P na solução do solo (Ernani et al., 1996). O aumento da disponibilidade de P no solo, por outro lado, aumenta a taxa de chegada de P às superfícies das raízes, e com isso diminui a amplitude das zonas de depleção, o que deve permitir uma melhor performance das plantas em solos ácidos que contenham Al tóxico.

O presente trabalho objetivou avaliar o efeito da combinação de quantidades crescentes de P e de calcário no rendimento de grãos de milho num solo ácido do estado de Santa Catarina.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em Lages (SC), de 1994 a 1998, num Latossolo Bruno (Hapludox). A área experimental, antes nunca cultivada, era constituída de vegetação campestre nativa. O solo apresentou pH 4,7, Al trocável = 39 mmol_c kg⁻¹, Mn extraível com HCl 0,1 mol L⁻¹ = 31 mg kg⁻¹, matéria orgânica = 40 g kg⁻¹, argila = 550 g kg⁻¹, P e K (Mehlich-1) = 1 e 120 mg kg⁻¹, respectivamente. A necessidade de calcário, determinada pelo método SMP, foi de 9,0 t ha⁻¹ (PRNT 100%) (CFS/RS-SC, 1995).

Os tratamentos consistiram de um fatorial com três doses de calcário dolomítico (0; 4,5 e 9,0 t ha⁻¹, PRNT 100%) e quatro doses de P₂O₅. Como os fertilizantes fosfatados mostravam efeito residual, as doses de P aplicadas diminuíram com o passar do tempo até à terceira safra, seguindo a filosofia da recomendação de adubação utilizada nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CFS/RS-SC, 1995). As doses de P₂O₅ foram, respectivamente, de 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹, na primeira safra; de 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹, na segunda, e de 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹, na terceira safra. Na quarta safra, foram usadas doses de manutenção iguais às aplicadas na segunda safra. As quantidades totais de P₂O₅ aplicadas nas quatro safras foram, respectivamente, de 170, 340, 510 e 680 kg ha⁻¹, com uma média, respectivamente, de 42, 85, 127 e 170 kg ha⁻¹ por cultivo. A segunda dose de P₂O₅, na qual foram aplicados 120, 80, 60 e 80 kg ha⁻¹, respectivamente, em cada um dos quatro cultivos, representa a recomendação dos órgãos de pesquisa para esse solo (CFS/RS-SC, 1995).

O calcário foi aplicado e incorporado ao solo numa única vez, na profundidade aproximada de 17-20 cm,

com enxada rotativa, dois meses antes da semeadura do primeiro cultivo de milho. O P foi aplicado anualmente, a lanço, sempre no dia da semeadura, na forma de superfosfato triplo, e incorporado ao solo com enxada rotativa nas três primeiras safras e com grade de discos na safra 97/98.

Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas, no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. As doses de calcário foram distribuídas nas parcelas principais, e as de P, nas subparcelas, que mediam 5,0 x 6,0 m, das quais somente os 12 m² centrais foram utilizados para as determinações.

Aplicaram-se uréia e cloreto de potássio em todas as subparcelas, nas doses de 120 e 100 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N e K₂O, respectivamente. Todo o K e ¼ do N foram incorporados ao solo juntamente com os tratamentos de P; o restante do N foi aplicado sobre a superfície do solo, quando o milho apresentou de quatro a seis folhas expandidas. O milho (Pioneer 3230, na primeira safra, e Cargill 855, nas demais) foi semeado na segunda quinzena de novembro, em filas distanciadas de 1,0 m, numa densidade de 5 x 10⁴ plantas ha⁻¹ após o desbaste manual. A área experimental permaneceu em pousio no período hibernar, com cobertura vegetal espontânea.

Além do rendimento de grãos de milho, corrigido para 13% de umidade, foram analisados o pH, as concentrações de P, Al, Ca, e Mg extraíveis do solo e a concentração de P nas folhas. As amostras de solo foram coletadas anualmente, após a colheita do milho, num total de oito subamostras por subparcela. Cálcio, Mg e Al trocáveis foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinados em espectrometria de emissão induzida por plasma. O P foi extraído com solução ácida diluída (Mehlich-1) e com resina trocadora de ânions (Tedesco et al., 1995). O pH foi determinado em água, na relação solo/solvente de 1:1. As amostras de tecido vegetal foram coletadas no estágio de grão leitoso, num total de dez folhas por subparcela, da posição imediatamente abaixo da espiga. As folhas foram secas em estufa a 60°C, até peso constante. A seguir, foram moídas e digeridas com ácido sulfúrico e água oxigenada, em chapa aquecida a 350°C (Adler & Wilcox, 1985), tendo sido o P determinado pelo método proposto por Murphy & Riley (1962).

A significância estatística do efeito dos tratamentos no rendimento de grãos de milho foi avaliada por meio da análise da variância (ANOVA), com vistas em obter informações sobre a interação de fósforo e calcário, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%. Posteriormente, esses dados foram ajustados por meio de modelos de regressão linear e quadrático. Os valores das determinações químicas no solo foram avaliados por meio de análises de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O rendimento médio de milho das quatro safras foi de 7,3 t ha⁻¹ e se assemelha ao obtido em outros experimentos na região do planalto catarinense (Ernani et al., 1997; Ernani et al., 1998). As produtividades extremas variaram de 2,9 t ha⁻¹, no tratamento que recebeu a menor dose de P₂O₅ e ausência de calcário, na safra 97/98, até 11,1 t ha⁻¹, no tratamento que recebeu as maiores quantidades de P₂O₅ (média de 170 kg ha⁻¹ por cultivo) e de calcário (9,0 t ha⁻¹), na safra 95/96 (Quadro 1).

A resposta do milho à calagem foi pequena. Na primeira safra, após a instalação do experimento, a aplicação de calcário não influenciou o rendimento de grãos, o qual foi de 6,3 t ha⁻¹ na ausência de calagem (Quadro 1). Em duas das quatro safras (95/96 e 97/98), a produtividade de milho aumentou com a calagem

somente até à dose intermediária (4,5 t ha⁻¹), a qual elevou o pH até 5,4 (Quadro 2) e proporcionou incrementos no rendimento de 9 e 39%, respectivamente. A safra 96/97 foi a única em que houve resposta até à maior dose de calcário utilizada, com um incremento de 36% no rendimento de milho.

Pequeno incremento proporcionado pela calagem também foi observado por Ernani et al. (1998) nesse mesmo solo quando fertilizado adequadamente com P. Presume-se que isso seja, pelo menos em parte, devido aos efeitos benéficos da matéria orgânica do solo (40 g kg⁻¹) sobre a atividade do Al (Bloom et al., 1979), o qual diminui de intensidade com o tempo de cultivo, como aconteceu no presente trabalho. A resposta à calagem até pH 5,4, observada para a média das quatro safras, mostra que o alumínio trocável foi o maior entrave ao aumento do rendimento.

Quadro 1. Rendimento de grãos de quatro safras de milho, conforme a aplicação de quantidades crescentes de calcário e de fósforo a um Latossolo Bruno álico

Calcário ⁽¹⁾	Fósforo ⁽²⁾	Safrá				Média
		94/95	95/96	96/97	97/98	
t ha ⁻¹						
C 0	P1	3,9 bB	7,0 bA	3,9 bB	2,9 cB	4,8 cB
C 0	P2	6,8 aA	9,1 aA	5,4 aB	4,8 bB	6,3 bB
C 0	P3	6,8 aA	10,0 aA	5,3 aB	6,4 aA	6,8 abB
C 0	P4	7,5 aA	10,3 aA	6,4 aB	6,2 aA	7,6 aB
C 4,5	P1	6,1 aA	8,1 bA	5,9 bA	6,2 bA	6,6 cA
C 4,5	P2	6,2 aA	9,9 aA	6,2 abB	7,3 abA	7,4 bAB
C 4,5	P3	7,1 aA	10,9 aA	6,7 abAB	7,3 abA	8,0 abAB
C 4,5	P4	7,4 aA	10,9 aA	7,3 aAB	7,8 aA	8,4 aA
C 9,0	P1	5,9 bA	8,6 bA	6,3 bA	7,0 aA	7,0 bA
C 9,0	P2	8,1 aA	10,4 aA	7,0 abA	7,5 aA	8,1 aA
C 9,0	P3	7,6 aA	10,9 aA	7,5 aA	7,5 aA	8,3 aA
C 9,0	P4	7,6 aA	11,1 aA	7,7 aA	7,7 aA	8,5 aA
Média C 0		6,3 A	9,1 B	5,3 C	5,1 B	6,4 B
Média C 4,5		6,7 A	9,9 A	6,5 B	7,1 A	7,6 A
Média C 9,0		7,3 A	10,3 A	7,2 A	7,4 A	8,0 A
	Média P1	5,3 B	7,9 C	5,4 C	5,4 B	6,1 C
	Média P2	7,0 A	9,8 B	6,2 B	6,5 A	7,3 B
	Média P3	7,2 A	10,6 AB	6,5 AB	7,1 A	7,7 AB
	Média P4	7,5 A	10,8 A	7,1 A	7,2 A	8,2 A
Probabilidade > F	CALC	NS	0,01	0,00042	0,0024	0,014
	P	0,00002	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
	CALC x P	0,021	NS ⁽³⁾	NS	0,0035	0,110

⁽¹⁾ C 0, C 4,5 e C 9,0 equivalem à ausência de calagem e à aplicação de 4,5 e 9,0 t ha⁻¹ de calcário. ⁽²⁾ P1, P2, P3 e P4 equivalem a doses crescentes de P₂O₅, respectivamente, de 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹, na safra 94/95; de 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹, nas safras 95/96 e 97/98, e de 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹, na safra 96/97. Em cada uma das safras e na média das mesmas, letras minúsculas diferentes, na coluna, significam diferença estatística entre doses de P dentro de cada dose de calcário; letras maiúsculas diferentes, na coluna, significam diferença estatística entre doses de calcário dentro de cada dose de P, e entre médias de P ou de calcário, pelo teste de Tukey a 5%. ⁽³⁾ Não-significativo a P = 0,05.

Quadro 2. Valores de pH e de Al trocável nas amostras de solo coletadas após cada safra de milho em função da aplicação de quantidades crescentes de calcário e de fósforo a um Latossolo Bruno álico

P ₂ O ₅ ⁽¹⁾	pH					Al ³⁺				
	94/95	95/96	96/97	97/98	Média	94/95	95/96	96/97	97/98	Média
kg ha ⁻¹	cmolc kg ⁻¹									
	Sem calcário									
P1	4,7	4,7	4,6	4,7	4,7	3,9	4,4	3,0	4,2	3,9
P2	4,7	4,6	4,6	4,7	4,7	3,9	4,4	3,9	3,8	4,0
P3	4,7	4,7	4,6	4,7	4,7	4,0	4,4	3,8	3,5	3,9
P4	4,7	4,7	4,7	4,8	4,7	3,7	4,1	3,6	3,1	3,6
Média	4,7	4,7	4,6	4,7	4,7	3,9	4,3	3,6	3,6	3,8
	4,5 t ha ⁻¹ de calcário									
P1	5,2	5,4	5,4	5,5	5,4	0,8	0,8	0,3	0,6	0,6
P2	5,1	5,3	5,3	5,3	5,3	0,8	0,8	0,6	0,8	0,7
P3	5,2	5,5	5,4	5,5	5,4	0,8	0,8	0,4	0,5	0,6
P4	5,2	5,5	5,4	5,4	5,4	0,8	0,8	0,4	0,6	0,6
Média	5,2	5,4	5,4	5,4	5,4	0,8	0,8	0,4	0,6	0,6
	9,0 t ha ⁻¹ de calcário									
P1	5,8	5,7	6,1	6,2	6,0	0	0	0	0	0
P2	5,7	6,1	5,9	6,1	6,0	0	0	0	0	0
P3	5,8	6,1	5,7	5,9	5,9	0	0	0	0	0
P4	5,8	6,2	6,0	6,1	6,0	0	0	0	0	0
Média	5,8	6,0	5,9	6,1	6,0	0	0	0	0	0

⁽¹⁾ P1, P2, P3 e P4 correspondem a doses crescentes de P₂O₅, respectivamente, de 60, 120, 180 e 240, na safra 94/95; de 40, 80, 120 e 160, nas safras 95/96 e 97/98, e de 30, 60, 90 e 120, na safra 96/97. Equações de regressão para média das safras: pH = 4,43 + 0,140 t ha⁻¹ calc., r² = 0,99; Al = 3,85 - 1,02 t ha⁻¹ calc. + 0,068 (t ha⁻¹ calc)², r² = 1,0. Os coeficientes de regressão para a aplicação de P não foram significativos a 5%.

A interação de fósforo e calcário foi significativa (P > 0,05) somente na primeira e na última safra (Quadro 1). Na safra 94/95, a calagem aumentou o rendimento de milho somente no tratamento que recebeu a menor dose de P₂O₅ (média de 42 kg ha⁻¹ por cultivo); na safra 97/98, isso ocorreu até à segunda dose, que, na média, foi de 85 kg ha⁻¹ por cultivo. A resposta à calagem diminuiu com o aumento da fertilização fosfatada. Na menor dose de P₂O₅ usada (média de 42 kg ha⁻¹ por cultivo), a elevação do pH de 4,7 para 5,4 e 6,0, respectivamente, pela aplicação de 4,5 e 9,0 t ha⁻¹ de calcário, aumentou o rendimento médio das safras de 4,8 para 6,6 e 7,0 t ha⁻¹, com incrementos de 37 e 46% respectivamente (Quadro 1). Na média dos tratamentos com P, o incremento ocasionado pela calagem foi menor, 12 e 25%, respectivamente (kg ha⁻¹ = 6.500 + 176 t ha⁻¹ calcário; r² = 0,88). A calagem, no entanto, não influiu no rendimento de milho nos tratamentos que receberam as duas maiores doses de P₂O₅ (média de 127 e 170 kg ha⁻¹ por cultivo), as quais foram bem maiores que a recomendação média para esse solo (85 kg ha⁻¹ por cultivo).

A inexistência de resposta à calagem no solo fertilizado com as maiores doses de P, em duas das

quatro safras, mostrou que os efeitos adversos da acidez não prejudicaram o milho nesses tratamentos, mesmo havendo 31 mg kg⁻¹ de Mn extraível, 39 mmolc kg⁻¹ de Al³⁺ e 60% de saturação por Al. Os valores de Ca (1,4 mmolc kg⁻¹) e de Mg (0,9 mmolc kg⁻¹) trocáveis não eram limitantes e, por isso, acredita-se que, nesses tratamentos, as plantas absorveram e metabolizaram as quantidades necessárias de P, mesmo com a possibilidade da existência de um sistema radicular prejudicado pela presença de Al (Ernani & Barber, 1991; Miyazawa et al., 1992). A maior absorção de P foi, provavelmente, consequência do aumento da difusão de P no solo em direção às raízes, decorrente do aumento da concentração de P na solução (Barber & Chen, 1990; Cox & Barber, 1992) e do estímulo ocasionado no crescimento radicular. A formação de precipitados de fosfatos de alumínio nas regiões adjacentes aos grânulos de fertilizantes fosfatados (Figueiredo, 1985), o aumento do pH do solo nos microssítios de adsorção de P e a associação entre P e Al internamente na raiz (Barceló et al., 1996) também podem ter diminuído a fitotoxidez do Al. Segundo Mendez & Kamprath (1978), apesar de o Al precipitar P internamente nas

Quadro 3. Valores de cálcio e de magnésio trocáveis nas amostras de solo coletadas após cada safra de milho em função da aplicação de quantidades crescentes de calcário e de fósforo a um Latossolo Bruno álico

P ₂ O ₅ ⁽¹⁾	Ca					Mg				
	94/95	95/96	96/97	97/98	Média	94/95	95/96	96/97	97/98	Média
cmol _c kg ⁻¹										
Sem calcário										
P1	1,3	1,3	1,7	1,1	1,4	1,0	1,0	1,1	0,6	0,9
P2	1,6	1,6	1,4	1,3	1,5	1,1	1,0	0,80	0,8	0,9
P3	1,7	1,5	1,7	1,5	1,6	1,1	0,8	0,90	0,9	0,9
P4	1,7	1,6	1,8	1,7	1,7	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
Média	1,6	1,5	1,5	1,4	1,5	1,1	1,0	1,0	0,8	0,9
4,5 t ha⁻¹ de calcário										
P1	3,6	3,6	4,8	4,4	4,1	3,1	2,8	4,1	3,6	3,4
P2	3,6	3,6	4,2	3,6	3,8	3,0	3,0	3,6	3,9	3,4
P3	4,0	3,7	4,7	4,2	4,1	3,3	3,2	3,9	3,4	3,4
P4	3,8	3,6	4,8	3,7	4,0	3,2	2,9	3,9	2,9	3,2
Média	3,7	3,6	4,6	4,0	4,0	3,2	3,0	3,9	3,4	3,4
9,0 t ha⁻¹ de calcário										
P1	5,5	4,8	7,5	6,1	5,8	5,1	4,6	6,9	5,4	5,5
P2	5,0	4,9	7,5	5,8	5,8	4,6	4,4	6,7	5,2	5,2
P3	5,2	5,1	7,0	5,3	5,6	4,8	4,9	6,2	4,6	4,8
P4	5,1	5,0	7,6	5,8	5,9	4,8	4,8	6,8	5,0	5,3
Média	5,2	5,0	7,4	5,7	5,8	4,8	4,7	6,6	5,0	5,2

⁽¹⁾ P1, P2, P3 e P4 correspondem a doses crescentes de P₂O₅, respectivamente, de 60, 120, 180 e 240, na safra 94/95, de 40, 80, 120 e 160, nas safras 95/96 e 97/98, e de 30, 60, 90 e 120, na safra 96/97. Equações de regressão para a média das safras: Ca = 1,74 + 0,47 t ha⁻¹ calc., r² = 0,98; Mg = 1,15 + 0,47 t ha⁻¹ calc., r² = 0,98. Os coeficientes de regressão para a aplicação de P não foram significativos a 5%.

raízes, as plantas conseguem metabolizar quantidades suficientes de P, desde que o solo contenha altos valores desse nutriente e seja a saturação por Al inferior a 60%.

A aplicação de fósforo aumentou o rendimento de milho em todas as safras, porém com magnitudes que variaram entre os anos (Quadro 1). Na primeira e na última safra, a produtividade de grãos aumentou somente até a segunda dose de P₂O₅, a qual foi de 120 kg ha⁻¹, na safra 94/95, e de 80 kg ha⁻¹, na safra 97/98, nessa última com aplicações acumuladas de 340 kg ha⁻¹ no período e média de 85 kg ha⁻¹ cultivo⁻¹. Essas quantidades representam a recomendação de P para esse solo. Nas duas safras intermediárias, o rendimento de milho aumentou até à terceira dose de P₂O₅ aplicada, cuja média foi de 150 e 130 kg ha⁻¹ por cultivo, respectivamente, para as safras 95/96 e 96/97. Na média de todo o período experimental, o rendimento também aumentou até à terceira dose, na qual se aplicou um total de 510 kg ha⁻¹ P₂O₅, com uma média de 127 kg ha⁻¹ por cultivo, a qual é aproximadamente 50% maior que a recomendada (CFS/RS-SC, 1995).

O incremento no rendimento provocado pelo fósforo decresceu com o aumento da dose de calcário

nas duas safras onde houve interação de P e calcário (Quadro 1). Com a elevação da dose média de P₂O₅ de 42 para 85 kg ha⁻¹, o rendimento médio das quatro safras, estimado pelas equações de regressão, aumentou 25% no solo sem calagem (pH 4,7) e 14% no solo com a maior dose de calcário (pH 6,0). O aumento da eficiência do P nos maiores valores de pH pode ter sido causado pela maior liberação de ânions orgânicos, que competem com o P pelos sítios de adsorção, pela diminuição ou eliminação do Al trocável (Ernani & Barber, 1991), pelo aumento das cargas negativas do ânion fosfato e, principalmente, pelo aumento das cargas negativas das superfícies sólidas do solo. Ernani et al. (1996), avaliando o efeito do pH do solo nas reações de P em vinte solos catarinenses, verificaram que a retenção de P diminuiu com o aumento do pH em quinze deles, inclusive no solo utilizado neste trabalho.

A relação de substituição de calcário por P já havia sido verificada na década de setenta na cultura da soja (Vidor & Freire, 1972) e do milheto (Mendez & Kamprath, 1978). Os dados deste trabalho ratificam a importância dessa relação, pois implica uma economia de calcário para os solos com altos valores de P disponível e de P para solos que tenham

pH elevado, sendo isso importante sobretudo para as espécies vegetais em que a nutrição representa alto percentual do custo produtivo total.

A concentração de P no tecido vegetal aumentou com a calagem (%P no tecido = $0,403 + 0,0058 \text{ t ha}^{-1}$ calcário; $r^2 = 0,97$) e com a aplicação de P (%P no tecido = $0,37 + 0,00037 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5), porém o P disponível no solo somente foi afetado pela aplicação do fertilizante fosfatado (Quadro 4).

Embora o método da resina trocadora de ânions tenha extraído, em média, aproximadamente, 50% mais P do solo do que o de Mehlich (Quadro 4), com os valores superiores em $2,9 \text{ mg kg}^{-1}$, eles correlacionaram-se ($r = 0,87$). A correlação entre o P aplicado e o P extraído do solo foi alta e igual entre os métodos ($r = 0,82$), porém a correlação entre o P no solo e o rendimento médio das safras foi maior para o método Mehlich ($r = 0,51$) do que para o da resina ($r = 0,31$). O nível crítico de P para esse solo, pelo método de Mehlich, é $6,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (CFS/RS-SC, 1995), e esse valor foi atingido pela aplicação de 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 , na ausência de calcário, e de

180 kg ha^{-1} de P_2O_5 , no solo que recebeu calagem. Em 1997/98, o nível crítico não foi atingido nos tratamentos com pH 5,4 em nenhuma dose de P; no solo com pH 6,0, ele foi atingido somente em um dos quatro anos. A amplitude de variação de P no solo, de um ano para outro, atingiu até 100% dentro da mesma dose de P, para os dois métodos analíticos.

A aplicação de 4,5 e de $9,0 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário aumentou o pH médio do solo de 4,7 para 5,4 e 6,0 respectivamente, diminuiu o Al trocável de 39 para 6 e $0 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Quadro 2) e diminuiu a saturação por Al de 60 para 7 e 0%, respectivamente. Os valores de Ca e de Mg trocáveis aumentaram, e na mesma magnitude, com o aumento da calagem. O Ca variou de 14 para $59 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e o Mg de 9 para $52 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Quadro 3). O pH e as concentrações de Al, Ca e Mg mantiveram-se praticamente inalteradas durante os quatro anos. A aplicação de P, na forma de superfosfato triplo, não influiu no pH e na concentração de Al e Mg trocáveis, mas proporcionou pequeno incremento no Ca (aproximadamente $3 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) no tratamento sem calagem (Quadros 2 e 3).

Quadro 4. Valores de P no solo determinados pelos métodos de Mehlich-1 e da resina trocadora de ânions nas amostras coletadas após cada safra de milho em função da aplicação de quantidades crescentes de calcário e de fósforo a um Latossolo Bruno álico

$\text{P}_2\text{O}_5^{(1)}$	Mehlich-1					Resina				
	94/95	95/96	96/97	97/98	Média	94/95	95/96	96/97	97/98	Média
mg kg ⁻¹										
Sem calcário										
P1	4,0	6,3	2,0	2,4	3,7	7,2	8,5	6,6	4,6	6,7
P2	6,7	5,9	5,7	5,6	6,0	9,5	8,6	7,6	6,9	8,2
P3	7,0	9,2	6,9	6,1	7,3	8,2	10,4	12,0	11,1	10,4
P4	11,0	10,3	10,2	7,6	9,8	11,2	12,0	14,4	12,5	12,5
Média	7,2	7,9	6,2	5,4	6,7	9,0	9,9	10,2	8,8	9,4
4,5 t ha⁻¹ de calcário										
P1	2,7	4,1	1,2	2,5	2,6	6,5	4,7	5,5	4,7	5,4
P2	4,8	5,4	2,6	3,0	4,0	6,2	6,5	5,4	5,8	6,0
P3	6,0	7,2	5,9	4,8	6,0	6,8	8,5	10,4	8,0	8,4
P4	7,4	8,4	9,5	6,8	8,0	12,2	11,5	15,1	8,6	11,8
Média	5,2	6,3	4,8	4,3	5,2	7,9	7,8	9,1	6,8	7,9
9,0 t ha⁻¹ de calcário										
P1	3,1	3,4	2,2	1,5	2,6	7,0	4,1	5,5	3,9	5,1
P2	3,2	6,3	3,0	3,4	4,0	5,7	8,0	7,7	5,6	6,8
P3	4,9	9,2	4,8	5,2	6,0	6,7	13,2	9,2	8,0	9,3
P4	6,1	9,5	9,3	6,1	7,8	10,6	11,8	13,9	10,2	11,6
Média	4,3	7,1	4,8	4,0	5,1	7,5	9,3	9,1	6,9	8,2

⁽¹⁾ P1, P2, P3 e P4 correspondem a doses crescentes de P_2O_5 , respectivamente, de 60, 120, 180 e 240 kg ha^{-1} , na safra 94/95; de 40, 80, 120 e 160, nas safras 95/96 e 97/98, e de 30, 60, 90 e 120, na safra 96/97. Equações de regressão para a média das safras: P-resina = $9,1 - 0,14 \text{ t ha}^{-1} \text{ calc.}$, $r^2 = 0,57$; P-resina = $3,5 + 0,033 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$, $r^2 = 0,97$; P-Mehlich = $6,4 - 0,18 \text{ t ha}^{-1} \text{ calc.}$, $r^2 = 0,78$; P-Mehlich = $1,0 + 0,031 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$, $r^2 = 0,99$. Todos os coeficientes de regressão linear foram significativos a 5%.

CONCLUSÕES

1. O rendimento de milho aumentou com a calagem e com a adubação fosfatada.
2. A resposta do milho à calagem foi, entretanto, menor que a proporcionada pela adubação fosfatada e aumentou com o passar dos anos.
3. Para doses de P superiores às recomendadas para o estado de Santa Catarina, a aplicação de calcário não influenciou o rendimento de milho.
4. Houve uma relação de substituição entre P e calcário e, na maioria das safras, foi necessário aplicar menos calcário e mais fertilizantes fosfatados do que as quantidades atualmente recomendadas.

LITERATURA CITADA

- ADLER, P.R. & WILCOX, G.E. Rapid perchloric acid digest methods for analysis of major elements in plant tissue. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 16:1153-1163, 1985.
- ALMEIDA, J.A.; ERNANI, P.R. & MAÇANEIRO, K.C. Recomendação alternativa de calcário para solos altamente tamponados do extremo sul do Brasil. *Ci. Rural*, 29:651-656, 1999.
- BARBER, S.A. & CHEN, J. Using a mechanistic model to evaluate the effect of soil pH on phosphate uptake. *Plant Soil*, 81:143-146, 1990.
- BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, Ch.; VÁZQUEZ, M.D. & GUNSÉ, B. Aluminium phytotoxicity: a challenge for plant scientists. *Fert. Res.*, 43:217-223, 1996.
- BLOOM, P.R.; McBRIDE, M.B. & WEAVER, R.M. Aluminum organic matter in acid soils, buffering a solution aluminum activity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:488-493, 1979.
- BRACCINI, M.C.L.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; CAMPAIO, N.F. & PEREIRA, A.A. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva. II. Teores de P, Ca, e Al e eficiência ao P e Ca. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:443-450, 1998.
- CASTELLS, A.J.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SANT'ANNA, R. & NEVES, J.C. Absorção de fósforo como critério de seleção de genótipos de soja quanto à tolerância ao alumínio. *Pesq. Agropec. Bras.*, 20:1163-1170, 1985.
- COX, M.S. & BARBER, S.A. Soil supply levels needed for equal P uptake from four soils with different water contents at the same water potential. *Plant Soil*, 143:93-98, 1992.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – CFS/RS-SC. Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, SBCS-Núcleo Regional Sul, 1995. 224p.
- ERNANI, P.R. Alterações em algumas características químicas na camada arável do solo pela aplicação de gesso agrícola sobre a superfície de campos nativos. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:241-245, 1986.
- ERNANI, P.R. & ALMEIDA, J.A. Comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do estado de Santa Catarina. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:143-150, 1986.
- ERNANI, P.R. & BARBER, S.A. Corn growth and changes of soil and root parameters as affected by phosphate fertilizers and liming. *Pesq. Agropec. Bras.*, 26:1309-1314, 1991.
- ERNANI, P.R.; FIGUEIREDO, O.A.R.; BECEGATO, V. & ALMEIDA, J.A. Decréscimo da retenção de fósforo no solo pelo aumento do pH. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:159-162, 1996.
- ERNANI, P.R. & GIANELLO, C. Diminuição do alumínio trocável do solo pela incorporação de esterco de bovinos e camas de aviário. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:161-165, 1983.
- ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L. & FREITAS, E.G. Aumento do rendimento de grãos e de massa verde de milho para silagem pela aplicação de nitrogênio. *Agropec. Gaúcha*, 2:201-205, 1997.
- ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L. & OLIVEIRA, L.C. Increase of grain and green matter of corn by liming. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:275-280, 1998.
- FIGUEIREDO, O.A.R. Reações do superfosfato triplo e de cama de galinha poedeira com um Latossolo Bruno. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 74p. (Tese de Mestrado)
- KINRAIDE, T.B. & PARKER, D.R. Non-phytotoxicity of the aluminum sulfate ion, $AlSO_4^+$. *Physiol. Plant.*, 71:207-212, 1987.
- McCORMICK, L.H. & BORDEN, F.Y. The occurrence of aluminum-phosphate precipitate in the plant roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 38:931-935, 1974.
- MENDEZ, J. & KAMPRATH, E.J. Liming of Latossols and the effect on phosphorus response. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:86-88, 1978.
- MIYAZAWA, M.; CHIERICE, G.O. & PAVAN, M.A. Amenização da toxicidade de alumínio às raízes de trigo pela complexação com ácidos orgânicos. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:209-215, 1992.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, 27:31-36, 1962.
- PETRY, C.; RHEINHEIMER, D.S.; PETRY, C.; KAMINSKY, J.; PESSOA, A.C.S. & CASSOL, L.C. Influência do estresse de alumínio em plantas de fumo. II. Efeitos nos parâmetros cinéticos de absorção de fósforo. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:69-72, 1994.
- RHEINHEIMER, D.S.; PETRY, C.; KAMINSKY, J. & BARTZ, H.R. Influência do estresse do alumínio em plantas de fumo. I. Efeitos no sistema radicular, na absorção de fósforo e cálcio e no acúmulo de massa seca. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:63-68, 1994.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- VIDOR, C. & FREIRE, J.R.J. Efeito da calagem e da adubação fosfatada sobre a fixação simbiótica do nitrogênio pela soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Agron. Sulriograndense*, 7:181-190, 1972.