

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM AGRONOMIA**

**ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO E RESPOSTA DO MILHO À
CALAGEM SUPERFICIAL E À ADUBAÇÃO NITROGENADA
REALIZADA NA AVEIA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO**

ITACIR CESAR FELDHAUS

**PONTA GROSSA – PR
MARÇO – 2006**

ITACIR CESAR FELDHAUS

ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO E RESPOSTA DO MILHO À
CALAGEM SUPERFICIAL E À ADUBAÇÃO NITROGENADA
REALIZADA NA AVEIA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada à Universidade
Estadual de Ponta Grossa para obtenção do
título de Mestre em Agronomia - Área de
concentração: Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

PONTA GROSSA - PR
MARÇO – 2006

Ficha catalográfica elaborada por Cristina Maria Botelho CRB-9-994/BICEN/UEPG

F312a Feldhaus, Itacir Cesar
 Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem
 superficial e à adubação nitrogenada realizada na aveia em sistema
 plantio direto / Itacir Cesar Feldhaus. Ponta Grossa, 2006.
 82 f.

 Dissertação (mestrado) – Agronomia – Área de concentração em
 Agricultura.

 Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

 1-Solo-correção da acidez.2-Milho-calagem superficial. 3-Aveia-
 plantio direto. I.T.

CDD: 631.41



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: "Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem superficial e à adubação nitrogenada realizada na aveia em sistema plantio direto"

Nome: Itacir César Feldhaus

Orientador: Eduardo Fávero Cairns

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Fávero Cairns

Prof. Dr. Luiz Antonio Corrêa Lucchesi

Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá

Data da Realização: 17 de março de 2006.

Aos meus pais Evaldo e Ines,

pela minha educação, formação humana e espiritual
e pela constante dedicação e incentivo,

OFEREÇO

À minha estimada esposa Joselma
e à minha querida filha Julia,

pelo amor, apoio e compreensão

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus que me concedeu o dom da vida e a capacidade e motivação para realizar esse trabalho.

Ao Professor Eduardo Fávero Caires pela amizade, estímulo e dedicada orientação que contribuiu para o enriquecimento desse trabalho bem como para o meu aprendizado e crescimento profissional, e também pela paciência e compreensão nos momentos de dificuldades.

Aos Professores do programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Ponta Grossa pela valiosa contribuição na minha formação profissional e em especial ao Prof. David Jaccoud Filho pela amizade e confiança demonstradas.

Aos colegas da Pós-Graduação pela amizade e companheirismo em especial ao Fernando José Garbuio e ao Gabriel Barth pelo valioso auxílio na realização desse trabalho.

Aos colegas do Laboratório Evandro, Éder, Hélio, Paulo, Renato e em especial à Susana que sempre esteve disposta a ajudar em todas as etapas desse trabalho.

Aos amigos Julius Blum e Luis Cláudio Garcia pelo apoio e confiança demonstrada ao longo de todos os anos de convivência e em especial durante a realização do curso de mestrado.

Aos amigos José Cristóvão e Marcelo Ribas pela amizade e apoio.

Aos amigos e funcionários da Bunge Fertilizantes Francisco Souza, Daniel Campos e Eduardo Siqueira pela amizade e grande apoio concedido no período em que me desliguei da Bunge e ingressei no mestrado.

Aos funcionários do Laboratório de análises químicas de solo em especial à Verônica pela ajuda na realização das análises.

À Professora Roseli Aparecida Ferrari e ao pesquisador do ITAL Marcelo Antonio Morgano pelas análises realizadas nos grãos de milho.

Aos meus familiares Evaldo, Ines, Cleusa e Cristina pelo apoio e incentivo e em especial a minha esposa Joselma pelo apoio, compreensão e ajuda na realização das análises.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa por possibilitar a realização do Mestrado bem como do presente trabalho e ao Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola pelo fornecimento do laboratório para realização das análises.

À Fundação Araucária pela concessão da bolsa de estudo.

À Syngenta Seeds, em especial ao Gilber Argenta pelo apoio e incentivo.

E a todas as pessoas e entidades que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho.

ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO E RESPOSTA DO MILHO À CALAGEM SUPERFICIAL E À ADUBAÇÃO NITROGENADA REALIZADA NA AVEIA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

RESUMO

Os efeitos da calagem superficial e da adubação nitrogenada nas alterações químicas do solo, na produção de massa seca de aveia preta e no crescimento radicular, nutrição mineral e rendimento de grãos da cultura do milho, em sistema plantio direto, foram avaliados em um experimento realizado em Latossolo Vermelho Distrófico textura média, em Ponta Grossa (PR). O delineamento experimental empregado foi o de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. As parcelas receberam quatro tratamentos de calagem: sem calcário, 4, 8 e 12 t ha⁻¹ de calcário dolomítico na superfície antes da semeadura da aveia. Nas subparcelas foram empregados quatro tratamentos de adubação nitrogenada: sem N, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N aplicados a lanço no perfilhamento da aveia. Aos 110 dias após a aplicação, a calagem proporcionou correção da acidez do solo até a profundidade de 20 cm, apresentando efeito de maior magnitude na camada superficial do solo (0-5 cm). Aos 330 dias após a aplicação, a calagem elevou o pH e reduziu a acidez potencial até a profundidade de 20 cm, reduziu o Al³⁺ até a profundidade de 40 cm e elevou a saturação por bases até a profundidade de 60 cm. As doses de N promoveram acidificação das camadas superficiais do solo e elevaram os teores de N-Mineral nas camadas superficiais aos 60 dias após a aplicação, e nas do subsolo, aos 280 dias após a aplicação. Houve redução dos teores de Ca²⁺ nas camadas superficiais com a adubação nitrogenada, mas não houve correlação entre a lixiviação de NO₃⁻ e as melhorias nos atributos químicos do subsolo pela calagem. A produção de massa seca de aveia não foi influenciada pelos tratamentos de calagem e de N. Também não houve efeito dos tratamentos sobre o crescimento radicular do milho cultivado em sucessão à aveia. A calagem aumentou a concentração de Mg e de S nas folhas e nos grãos de milho, respectivamente, e reduziu a concentração foliar de Mn. Os tratamentos de adubação nitrogenada aumentaram a concentração de N nos grãos e de Mn nas folhas e nos grãos de milho. A calagem não influenciou a produção de massa seca, o rendimento de grãos e a concentração de óleo e de proteína de milho. Os tratamentos de N não afetaram a produção de massa seca, mas aumentaram o rendimento de grãos e o teor de óleo e de proteína de milho.

Palavras-chave: *Zea mays* L., *Avena strigosa*, acidez, alumínio, cálcio, nutrição mineral, sistema radicular, subsolo.

CHANGES IN SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND PERFORMANCE OF CORN AS AFFECTED BY SURFACE LIMING AND NITROGEN APPLICATION ON OATS UNDER A NO-TILL SYSTEM

ABSTRACT

The effects of surface liming and nitrogen application on soil chemical attributes, on the dry matter production of black oats and on the root growth, mineral nutrition and grain yield of corn, under a no-till system, were evaluated in a field trial carried out on a loamy Typic Hapludox, in Ponta Grossa, State of Paraná, Brazil. A randomized complete block, split-plot design was employed, with three replications. The plots received four treatments of lime: no lime, 4, 8 and 12 t ha⁻¹ of dolomitic lime applied on the surface before the sowing of the oats. In the subplots were employed four treatments of nitrogen: without nitrogen, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ of nitrogen spread out manually at tillering of oat plants. After 110 days of the application, liming provided soil acidity correction to a depth of 20 cm, with effects of larger magnitude in the uppermost soil layer (0-5 cm). After 330 days of the application, liming raised pH and reduced the potential acidity (H+Al) to a depth of 20 cm, reduced Al³⁺ to a depth of 40 cm and raised bases saturation to a depth of 60 cm. The treatments of N promoted acidification of the uppermost soil layers and raised the levels of N-Mineral in the uppermost soil layers 60 days after the application, and in the subsoil 280 after the application. The levels of Ca²⁺ in the uppermost layers were reduced with N application, but there was no correlation between NO₃⁻ leaching and the amelioration in the subsoil chemical attributes with liming. The dry matter production of oats was not affected by the treatments of liming and N. The root growth of the corn cultivated in succession was also not affected by the treatments. Liming increased the Ca and S levels in the leaves and in the grains of corn, respectively, and reduced the leaf Mn content. The treatments of N fertilization increased the content of N in the grains and of Mn in the leaves and in the grains of corn. Liming had no effect in the dry matter production, grain yield and content of oil and protein of corn. The N treatments had no effect in the dry matter production, but raised the grain yield and the content of oil and protein of corn.

Key-words: *Zea mays* L., *Avena strigosa*, acidity, aluminum, calcium, mineral nutrition, root system, subsoil.

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 - Dados climáticos de Ponta Grossa, PR. Precipitação pluvial média mensal da região (45 anos), precipitação pluvial mensal ocorrida durante a realização do experimento (maio/2004 a abril/2005) e temperaturas médias máximas e mínimas ocorridas no mesmo período (IAPAR, 2005).....	23
FIGURA 2 - Distribuição percentual do N aplicado, nas diferentes profundidades. Valores calculados em função do coeficiente angular das regressões ajustadas entre as doses de N e os teores de N-NO_3^- e N-NH_4^+ no solo. (A) e (B) 60 e 280 dias após a aplicação do N, respectivamente.....	36
FIGURA 3 - Valores de pH em CaCl_2 , para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem, (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.....	39
FIGURA 4 - Teores de Al trocável, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de N em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) e (●) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.....	40
FIGURA 5 - Acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}$), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura, na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.....	42
FIGURA 6 - Teores de Ca trocável, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.....	43
FIGURA 7 - Teores de Mg trocável, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.....	44

FIGURA 8 -	Teores de K trocável, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.....	45
FIGURA 9 -	Saturação por bases, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. *, **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.....	46
FIGURA 10 -	Produtividade de milho em função da aplicação de calcário na superfície e de nitrogênio em cobertura na aveia. *, significativo $P < 0,05$	63
FIGURA 11 -	Correlações entre a produtividade de milho e o percentual de Ca (A) e K (B) na soma catiônica (Ca+Mg+K) nas folhas de milho. Valores referentes a quatro tratamentos de calagem e quatro tratamentos de N (n = 48).....	64
FIGURA 12 -	Correlações entre a produtividade de milho e a absorção de N (A) e S (B). Valores referentes a quatro tratamentos de calagem e quatro tratamentos de N (n = 48).....	67
FIGURA 13 -	Concentração de óleo (■) e proteína (○), nos grãos de milho, em função dos tratamentos de calagem na superfície e N na aveia. *, significativo $P < 0,05$	68

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 - Resultados de análises químicas do solo, em diferentes profundidades, antes da instalação do experimento.....	19
TABELA 2 - Resultados de análises granulométricas do solo e quantidades estimadas de minerais na fração argila, antes da instalação do experimento.....	20
TABELA 3 - Histórico de rotação de culturas e quantidades de N, P ₂ O ₅ e K ₂ O aplicados de 1994 a 2003, na área experimental.....	21
TABELA 4 - Produção de matéria seca da parte aérea e concentração de nutrientes nas plantas de aveia de acordo com os tratamentos de calagem na superfície e nitrogênio em cobertura.....	29
TABELA 5 - Teores N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ e N-Total ($\hat{y}$, em mg dm ⁻³), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície (x, em t ha ⁻¹), 110 dias após a aplicação.....	31
TABELA 6 - Teores N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ e N-Total ($\hat{y}$, em mg dm ⁻³), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície (x, em t ha ⁻¹), 330 dias após a aplicação.....	33
TABELA 7 - Teores N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ e N-Total ($\hat{y}$, em mg dm ⁻³), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de N em cobertura, na aveia (x, em kg ha ⁻¹), 60 dias após a aplicação.....	35
TABELA 8 - Teores N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ e N-Total ($\hat{y}$, em mg dm ⁻³), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de N em cobertura, na aveia (x, em kg ha ⁻¹), 280 dias após a aplicação.....	37
TABELA 9 - Atributos de crescimento de raízes de milho, nas diferentes profundidades do solo, em função da calagem na superfície e da adubação nitrogenada em cobertura na aveia.....	54
TABELA 10 - Concentração de nutrientes nas folhas e nos grãos do milho, de acordo com os tratamentos de calcário na superfície e de N aplicado em cobertura na aveia.....	57
TABELA 11 - Absorção ⁽¹⁾ e exportação ⁽²⁾ de nutrientes pela cultura do milho, de acordo com os tratamentos de calcário na superfície e de nitrogênio aplicado em cobertura na aveia.....	61

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Acidez do solo.....	4
2.2 Comportamento das culturas em solos ácidos sob SPD.....	6
2.3 Correção da acidez do solo no SPD.....	8
2.4 Movimentação de bases no perfil do solo cultivado no SPD.....	10
2.5 Efeito dos ânions na lixiviação de bases e na melhoria de subsolos ácidos.....	12
2.6 Calagem superficial e adubação nitrogenada para a cultura do milho no SPD.....	14
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 Localização do experimento.....	19
3.2 Caracterização física e química do solo.....	19
3.3 Histórico da área experimental.....	20
3.4 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos.....	20
3.5 Cultura da aveia preta.....	21
3.6 Cultura do milho.....	22
3.7 Caracterização climática.....	22
3.8 Determinações.....	24
3.8.1 <i>Atributos químicos do solo</i>	24
3.8.2 <i>Produção de matéria seca e análises químicas das plantas de aveia</i>	24
3.8.3 <i>Análises químicas do tecido foliar do milho</i>	25

3.8.4	<i>Produção de matéria seca e análises químicas das plantas de milho.....</i>	25
3.8.5	<i>Sistema radicular do milho.....</i>	25
3.8.6	<i>Produtividade de milho.....</i>	26
3.8.7	<i>Concentração de óleo, proteína e nutrientes nos grãos de milho.....</i>	26
3.9	Análises estatísticas.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1	Produção de matéria seca e concentração de nutrientes na aveia preta.....	28
4.2	Atributos químicos do solo.....	31
4.2.1	Nitrogênio.....	31
4.2.2	Componentes da acidez e cátions básicos trocáveis.....	38
4.3	Atributos de crescimento radicular do milho.....	53
4.4	Concentração de nutrientes nas folhas e nos grãos de milho.....	56
4.5	Produção de matéria seca, absorção e exportação de nutrientes pela cultura do milho.....	59
4.6	Rendimento de grãos da cultura do milho.....	63
4.7	Concentração de óleo e proteína nos grãos de milho.....	68
5	CONCLUSÕES.....	70
6	REFERÊNCIAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) foi introduzido no Brasil no início da década de 1970 tendo como principais razões para sua adoção o controle da erosão e a conservação do solo, freqüentemente degradado pelos métodos convencionais de preparo. A partir da década de 1990 houve grande expansão da área cultivada em SPD no País, sendo atualmente cultivados no Brasil cerca de 23,6 milhões de hectares nesse sistema. A área mundial sob SPD é de aproximadamente 95 milhões de hectares. O Brasil ocupa a segunda maior área cultivada do mundo nesse sistema, depois dos Estados Unidos da América (Derpsch, 2005).

O não revolvimento do solo e a adição de resíduos vegetais, fertilizantes e corretivos na superfície, em SPD, promovem alterações nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo que se refletem na nutrição mineral das plantas. Por consequência, torna-se necessária a adoção de um novo enfoque, principalmente em relação ao manejo da fertilidade do solo no SPD.

Diversos trabalhos recentes têm sido realizados com a finalidade de esclarecer dúvidas relacionadas com o manejo da fertilidade do solo no SPD. Entretanto, ainda existem questionamentos quanto aos critérios a serem utilizados na recomendação de calagem para esse sistema de cultivo.

Apesar da baixa solubilidade do calcário e da pequena mobilidade dos produtos de sua solubilização no perfil do solo, a aplicação do corretivo na superfície, sem incorporação, tem mostrado efeito positivo na melhoria das condições de acidez, inclusive do subsolo, consolidando-se como uma estratégia importante de manejo da acidez do solo no SPD. Os mecanismos que têm sido propostos para explicar os efeitos da calagem superficial na melhoria

de subsolos ácidos são: (i) movimentação física de partículas do calcário através de canais formados a partir da decomposição de raízes, (ii) lixiviação de complexos orgânicos no perfil do solo, e (iii) lixiviação de bases trocáveis a partir da movimentação de ânions como NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- e HCO_3^- .

Os solos brasileiros, em sua grande maioria, possuem elevada acidez, Al^{3+} em níveis tóxicos e baixos teores de Ca^{2+} nas camadas subsuperficiais. Essas características podem limitar o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e reduzir a absorção de água e de nutrientes, causando reflexos negativos no rendimento das espécies cultivadas. Portanto, é de fundamental importância o conhecimento dos mecanismos que podem contribuir para a amenização dos efeitos da acidez do subsolo para o desenvolvimento das plantas.

A disponibilidade de N mineral no solo normalmente é muito baixa. O amônio (NH_4^+), cátion que pode ser adsorvido nas cargas negativas do solo, normalmente sofre rápida nitrificação ($\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$). O nitrato (NO_3^-), forma nitrogenada mineral mais abundante no solo, por ter carga negativa, é repelido pela superfície das partículas do solo, permanecendo na solução de modo suscetível à lixiviação. Este comportamento, associado aos processos de mineralização e imobilização, torna o manejo do N um dos mais complexos.

Ao se movimentar no perfil do solo, o NO_3^- carrea equivalente quantidade de cátions que podem ser perdidos para o lençol freático. No entanto, havendo absorção do NO_3^- pelas raízes das plantas nas camadas subsuperficiais, os cátions acompanhantes são liberados e adsorvidos nas cargas negativas do solo. Durante o processo de absorção do NO_3^- pode ocorrer a liberação de ânions OH^- pelas raízes, favorecendo a elevação do pH em camadas do subsolo.

A aveia preta possui grande capacidade de desenvolver raízes no subsolo e elevado potencial de produção de matéria seca. Por essa razão, a aplicação de N na aveia, antecedendo a cultura do milho, tem sido proposta como alternativa para reduzir perdas desse nutriente por lixiviação, aumentando a ciclagem de nutrientes. Mediante a decomposição de seus resíduos, os nutrientes seriam disponibilizados para a cultura em sucessão, com menores riscos de perdas.

É possível que a lixiviação de NO_3^- , seguida de sua absorção pelas raízes no subsolo, contribua para a melhoria das condições de acidez das camadas mais profundas, mediante a calagem na superfície. Todavia, a disponibilidade de informações relacionadas a esse tema é restrita no Brasil, havendo a necessidade de mais estudos que contribuam para o esclarecimento de tais mecanismos.

Considerando a hipótese de que a calagem na superfície no SPD pode apresentar eficiência na correção da acidez do subsolo mediante a lixiviação de NO_3^- e, com isso, favorecer o crescimento radicular e a nutrição de plantas cultivadas em rotação, realizou-se este trabalho com o objetivo de avaliar as alterações químicas do solo, a produção de massa de aveia preta e o crescimento radicular, a nutrição mineral e o rendimento de grãos da cultura do milho, de acordo com a calagem na superfície e a adubação nitrogenada em cobertura na aveia preta.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Acidez do solo

Nos solos situados em regiões sob clima tropical e subtropical predominam aqueles com reação ácida, ou pela pobreza dos materiais de origem desprovidos de bases, ou por condições de pedogênese ou de formação do solo que favorecem a remoção de cátions básicos (Raij, 1991). Além da origem naturalmente ácida, os solos podem ainda sofrer contínua acidificação pela dissociação do gás carbônico ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$). Esta reação, em condições de $\text{pH} > 5,2$, libera o íon H^+ , que promove a acidificação do solo, e o íon HCO_3^- que pode favorecer a lixiviação de bases em profundidade (Quaggio, 1986).

A acidificação do solo também pode ser consequência da reação de nitrificação do amônio ($\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \Rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$). O H^+ tem grande afinidade com o solo e passa a ocupar posições de troca em forma não dissociada, liberando um cátion correspondente passível de ser lixiviado pelo ânion NO_3^- (Raij, 1991). Este processo torna-se ainda mais importante em solos cultivados onde as culturas recebem adubos nitrogenados contendo amônio ou uréia. Nos solos cultivados, a exportação de bases através das colheitas também contribui para o processo de acidificação.

A mineralização dos resíduos vegetais na superfície do solo, no SPD, provoca uma frente de acidificação com abaixamento do pH a partir da camada superficial (Salet, 1994). No estado do Mississippi (EUA), a adoção do SPD promoveu maior acidificação na camada superficial do solo (0-2,5 cm) do que o sistema convencional. Abaixo dessa camada (2,5-15 cm),

o SPD apresentou maiores valores de pH, indicando a formação de um gradiente de acidez a partir da superfície do solo, provavelmente em função da adição de adubos nitrogenados na superfície sem posterior incorporação (Rhoton, 2000). Outro trabalho realizado nos EUA, estado de Nebraska, mostrou maior acidificação da camada superficial do solo no SPD, atribuindo-se esse efeito à utilização de fertilizantes nitrogenados amoniacais e à lixiviação do NO_3^- , contribuindo para a remoção de bases das camadas superficiais do solo. De acordo com os níveis de acidez gerados nesse sistema de manejo, torna-se necessária a realização da calagem, visando principalmente a redução da toxidez de Al^{3+} e Mn^{2+} (Tarkalson et al., 2006).

No Brasil, um trabalho de longa duração realizado no estado do Paraná, mostrou aumento significativo da acidez apenas na camada superficial (0-5 cm) em um latossolo cultivado no SPD (Caires et al., 2005). A redução média nos valores de pH, nessa camada, ao longo de 10 anos, foi de 0,04 unidades de pH ao ano. Destaca-se que a acidificação dessa camada normalmente é causada pela decomposição dos resíduos vegetais e pela reação dos fertilizantes nitrogenados. Nesse trabalho, devido à predominância da cultura da soja no esquema de rotação, a quantidade de fertilizantes nitrogenados aplicada foi pequena (400 kg ha^{-1} de N em dez anos). Na camada de 5-10 cm, não houve alteração da acidez e na camada de 10-20 cm houve pequena elevação dos valores de pH ao longo dos 10 anos de estudo. Nessas camadas, a dissolução do Al mineral provavelmente tamponou os efeitos dos ácidos originados a partir dos ciclos do C e do N.

Alguns autores têm sugerido que a presença de resíduos vegetais na superfície do solo, no SPD, pode contribuir para a amenização dos efeitos negativos da acidez sobre o desenvolvimento das culturas de interesse agrícola (Miyazawa et al., 1993; Franchini et al., 1999; Cassiolato et al., 2000; Miyazawa et al., 2000).

A capacidade dos resíduos vegetais em reduzir a acidez do solo está associada aos seus teores de cátions de reação básica e de C orgânico solúvel, normalmente maiores em resíduos de adubos verdes como aveia-preta, mucuna, crotalária, nabo-forrageiro, tremoço,

leucena entre outros (Miyazawa et al., 1993). Destaca-se também a redução da toxidez do Al^{3+} pela ação dos resíduos vegetais. No SPD, devido ao maior aporte de resíduos vegetais, o Al^{3+} pode ser neutralizado por hidrólise, em decorrência da elevação do pH, ou pode ser complexado por ácidos orgânicos (Miyazawa et al., 2000).

2.2 Comportamento das culturas em solos ácidos sob SPD

O desenvolvimento do sistema radicular da maioria das espécies cultivadas é fortemente influenciado pelas condições de acidez do solo. A presença de Al^{3+} em concentrações tóxicas (Adamn & Lund, 1966; Gascho & Parker, 2001) e de baixos teores de Ca^{2+} (Rios & Pearson, 1964; Ritchey et al., 1982), decorrentes da acidez, limitam o crescimento das raízes.

A quantidade de raízes nas camadas superficiais do solo no SPD é maior do que no sistema convencional de preparo (Qin et al., 2005) e isso pode prejudicar a absorção de água e nutrientes pelas plantas em períodos de estiagem (Freire, 1984; Sumner, 1995). Esse comportamento pode ser consequência de subsolos ácidos nesse sistema de manejo. Caires et al. (2004) observaram que a calagem realizada na superfície proporcionou maior concentração do sistema radicular do milho na camada superficial do solo (0-10 cm). Tal efeito não foi observado quando a calagem na superfície foi acompanhada da aplicação de gesso agrícola, refletindo os efeitos benéficos de sua utilização na melhoria de subsolos ácidos (Sumner, 1995).

A absorção de nutrientes pelas plantas também é influenciada pela reação do solo. Em condições de elevada acidez ocorre diminuição na disponibilidade de fósforo, cálcio, magnésio, potássio e molibdênio e aumento na solubilização de íons como zinco, cobre, ferro, manganês e alumínio que, dependendo do manejo do solo e da adubação, podem atingir níveis de deficiência e toxicidade às plantas, respectivamente (Malavolta et al., 1997). No SPD, entretanto, a nutrição mineral das plantas tem sido menos influenciada pelo pH do solo. Mesmo em condições de elevada acidez, as culturas têm apresentado adequado estado nutricional (Caires et

al., 2001; 2002a; 2003; 2004), provavelmente em decorrência de maior umidade disponível no solo nesse sistema de manejo.

Um aspecto que tem chamado a atenção no SPD é o alto rendimento das culturas em condições de elevada acidez, caracterizada pelo baixo pH, presença de alumínio trocável em concentrações consideradas tóxicas para as plantas e pela alta necessidade de calagem (Anghinoni & Nicolodi, 2004). Na ausência de calagem, em solos com pH (CaCl_2 0,01 mol L⁻¹) inferior a 4,5, tem-se obtido produtividades de soja superiores a 2.700 kg ha⁻¹ (Sá, 1999; Caires & Fonseca, 2000) e de milho superiores a 8.000 e kg ha⁻¹ (Sá, 1999; Caires et al., 2002; 2005). Esse aspecto tem sido associado ao elevado teor de matéria orgânica dos solos cultivados no SPD. O maior teor de matéria orgânica nesse sistema eleva a capacidade de troca de cátions (CTC) do solo. Neste caso, mesmo em solo com baixo valor de saturação por bases (V), a soma de bases (SB) é alta, estando os cátions básicos em concentrações adequadas para as culturas (Caires et al., 1999). Além disso, a maior parte do alumínio na solução do solo encontra-se complexado com Al-ligantes orgânicos (Salet et al., 1999) ou está fortemente ligado à matéria orgânica do solo, fazendo com que as culturas tenham condições adequadas de desenvolvimento, mesmo em condições de elevada acidez e baixos valores de saturação por bases (Cambri, 2004). Deve-se considerar ainda que no SPD há maior umidade nas camadas superficiais do solo (Salton & Mielniczuk, 1995), o que favorece os processos de absorção e transporte de nutrientes (Caires & Fonseca, 2000), além de reduzir a toxidez do Al (Freire, 1984). Em ano com adequada precipitação pluvial, a cultura do trigo também tem apresentado elevado rendimento de grãos em solo com elevada acidez, mas com teores suficientes de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e ausência de Al^{3+} tóxico (Caires et al., 2002b). Já, em condições de escassez de água, os efeitos da acidez parecem ser mais prejudiciais à cultura. Corrêa et al. (2004), numa condição de deficiência hídrica durante a fase de desenvolvimento vegetativo, observaram severas restrições ao crescimento radicular do trigo em solo com teor de Al trocável da ordem de 10 mmol_c dm⁻³. Neste trabalho, o incremento médio no rendimento de grãos do trigo com a calagem na superfície (4 t ha⁻¹), foi da ordem de

195%, mostrando de forma inquestionável a importância da correção da acidez do solo para a obtenção de altos tetos de rendimento no SPD. Grande parte dos resultados que mostram altas produtividades de milho em condições de elevada acidez no SPD foi obtida sob condições adequadas de precipitação pluvial. É possível que em condições de escassez de água, o crescimento radicular, a nutrição mineral e o rendimento de grãos da cultura do milho também sejam afetados pelas condições de acidez do solo.

2.3 Correção da acidez do solo no SPD

A correção da acidez do solo, independentemente do sistema de manejo, é realizada mediante a aplicação de carbonato de cálcio (CaCO_3), material corretivo mais utilizado na agricultura. O CaCO_3 é um sal de baixíssima solubilidade, mas a pequena dissolução que ocorre na presença de gás carbônico é suficiente para desencadear uma série de reações que resultam na neutralização da acidez do solo.

Devido à baixa solubilidade do CaCO_3 e a pequena mobilidade dos produtos de sua solubilização abaixo das camadas de aplicação, recomenda-se, no sistema convencional de preparo do solo, a sua incorporação na camada cuja acidez pretende-se neutralizar, normalmente a camada arável (0-20 cm).

A ausência de revolvimento e a manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo são fundamentos do SPD. Portanto, neste sistema de cultivo não se pretende revolver o solo para incorporar o material corretivo. Assim, no SPD o calcário é distribuído sobre superfície do solo sem incorporação. Em função da baixa solubilidade do CaCO_3 , a eficiência da calagem superficial tem sido muito questionada, particularmente na correção da acidez do subsolo.

Embora no Brasil os estudos sobre calagem na superfície sejam relativamente recentes, nos Estados Unidos da América em 1978 já haviam resultados que evidenciavam a viabilidade da aplicação de calcário na superfície para a correção da acidez do solo no SPD (Blevins et al., 1978).

A região dos Campos Gerais no Paraná foi pioneira em estudos sobre calagem no SPD no Brasil. Os primeiros experimentos comparando a aplicação de calcário na superfície com calcário incorporado já apontavam melhoria das condições de acidez com a calagem superficial. Em um Cambissolo álico na região dos Campos Gerais observou-se, nove meses após a aplicação, que a calagem superficial ou incorporada apresentava efeito semelhante sobre os valores de pH e os teores de cálcio trocável até a profundidade de 10 cm (Sá, 1999).

Um dos primeiros trabalhos que mostrou efeitos pronunciados da calagem superficial na melhoria das condições de acidez do subsolo foi publicado por Oliveira & Pavan (1996). Neste trabalho, oito meses após a aplicação, a calagem superficial já havia promovido elevação dos valores de pH até a profundidade de 20 cm. Trinta e dois meses após a aplicação, os efeitos da calagem superficial sobre os valores de pH, alumínio e cálcio trocáveis foram semelhantes aos do calcário incorporado, até a profundidade de 40 cm. A calagem, independentemente do modo de aplicação, apresentou efeito residual positivo nas camadas subsuperficiais do solo por mais de 50 meses.

Trabalhos mais recentes também têm mostrado efeitos positivos da calagem superficial na melhoria das condições de acidez das camadas superficiais e do subsolo (Caires et al., 2000; Petrere & Anghinoni, 2001; Fidalski & Tormena, 2005).

Os resultados obtidos por Caires et al. (2000) em um Latossolo Vermelho textura média manejado há 15 anos no SPD mostraram efeitos da calagem superficial até 60 cm de profundidade sobre os valores de pH, saturação por bases, acidez potencial e Ca + Mg trocáveis. Os efeitos da calagem tiveram comportamento quadrático até a profundidade de 10 cm e linear de 10-60 cm para as doses 0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹ de calcário. Após 12 meses da aplicação do calcário na superfície foram observados efeitos pronunciados até 10 cm, com a máxima reação ocorrendo entre 28 e 30 meses da aplicação. Na camada de 10-20 cm, os efeitos foram mais lentos ocorrendo melhorias significativas a partir de 28 meses da aplicação. Também foram observadas relações significativas entre os valores de pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e a saturação por bases do

solo nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, sendo que as relações mais estreitas foram observadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm.

Resultados como esses possibilitaram a adoção da calagem superficial como estratégia para a correção da acidez do solo no SPD (Oliveira & Pavan, 1996; Pöttker & Ben, 1998; Caires et al., 2000, Anghinoni & Nicolodi, 2004). Entretanto, ainda existem dúvidas com relação aos mecanismos envolvidos na movimentação do calcário ou dos produtos de sua solubilização abaixo das camadas de aplicação. Enquanto alguns trabalhos têm mostrado efeitos positivos da calagem na correção da acidez do subsolo em curto prazo (Oliveira & Pavan, 1996; Caires et al., 2000; 2002a), outros indicaram ausência de efeitos no subsolo ou apenas efeitos em longo prazo (Moschler et al., 1973; Gonzales-Érico et al., 1979; Pavan et al., 1984).

É possível que essas divergências estejam relacionadas aos diferentes mecanismos que podem estar envolvidos na correção da acidez de subsolos em SPD, por meio da calagem na superfície.

2.4 Movimentação de bases no perfil do solo cultivado no SPD

A ausência de revolvimento e o contínuo aporte de matéria orgânica no SPD propiciam um ambiente favorável à atividade dos microorganismos e da meso e macrofauna, favorecendo a estruturação do solo e a formação de uma rede contínua de canais (Hendrix et al., 1986). A decomposição de raízes também deixa canais que, na ausência de revolvimento, se mantêm intactos por longos períodos. Estes canais têm sido apontados como uma possível explicação para a melhoria das condições químicas do subsolo mediante a aplicação de calcário na superfície (Pavan, 1994). Um trabalho realizado para esclarecer esses efeitos mostrou a existência de movimentação física das partículas mais finas do calcário (de 0,105 a 0,053 mm) no perfil do solo, em período de tempo relativamente curto (Amaral et al., 2004b).

O maior aporte de resíduos vegetais e a utilização de plantas de cobertura no SPD promovem a liberação de compostos orgânicos hidrossolúveis. Estes compostos, além da

capacidade de neutralizar alumínio, também podem formar complexos com cátions presentes no solo. Os complexos formados apresentam carga nula ou negativa, conseqüentemente, passíveis de migração no perfil do solo (Miyazawa et al., 2000). A adição de elevadas quantidades de resíduos vegetais tem mostrado, em estudos de laboratório, grande capacidade de neutralização da acidez e movimentação de Ca^{2+} em profundidade (Miyazawa et al., 1993; Franchini et al., 1999). Entretanto, Amaral et al. (2004a) observaram, em amostras de solo indeformadas, que a adição de até 10 t ha^{-1} de resíduos de aveia preta, ervilhaca comum e nabo forrageiro não influenciou a acidez no subsolo, ficando seus efeitos restritos à camada superficial (0-2,5 cm). Esses autores também não identificaram ácidos orgânicos nos solos que receberam os resíduos vegetais. A não detecção de ácidos orgânicos pode estar relacionada com a elevada atividade microbiana no solo manejado em SPD, ocasionando rápida transformação dos ácidos orgânicos (Wolt, 1994; Jones et al., 1996; Jones 1998; Franchini et al., 1999). Portanto, é possível que seja pequena a contribuição desse mecanismo para a melhoria das condições de acidez de subsolos ácidos no SPD.

Uma das condições indispensáveis para a lixiviação de cátions no solo é a presença de ânions solúveis como NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , OAc^- e HCO_3^- (Miyazawa et al., 2000). A partir da dissolução do calcário aplicado na superfície ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$) ocorre a liberação do ânion bicarbonato (HCO_3^-). Em condições de acidez ($\text{pH} < 5,2$), o HCO_3^- reage com o H^+ produzindo água e CO_2 ($\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \Rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$). No SPD, após a adição de calcário na superfície, ocorre elevação do pH. Nestas condições, o HCO_3^- pode se ligar a Ca^{2+} ou Mg^{2+} formando $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ou $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, passíveis de migração no perfil do solo (Oliveira & Pavan, 1996). No sistema convencional de preparo, tem sido observado efeito da aplicação do calcário em profundidades maiores àquelas da incorporação do corretivo (Quaggio et al., 1985; Caires & Rosolem, 1993; Gascho & Parker, 2001). Além da possível migração do $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ou $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ em função da utilização de elevadas doses de calcário, Gascho & Parker (2001) alertam para um possível efeito do ânion nitrato na movimentação de bases para camadas

inferiores às aquelas da incorporação do corretivo, pois após o cultivo de plantas exigentes em adubações nitrogenadas (milho, algodão e canola) foram observados efeitos mais pronunciados da calagem até 90 cm de profundidade. Neste caso, a absorção alcalina de nitratos estaria promovendo a redução da acidez no subsolo, conforme observado por Raij et al. (1988).

2.5 Efeito dos ânions na lixiviação de bases e na melhoria de subsolos ácidos

É provável que as perdas mais importantes de nutrientes, em regiões úmidas, aconteçam por lixiviação. Como a maioria dos solos apresenta cargas negativas, os ânions indiferentes com relação à carga negativa do solo, como NO_3^- , Cl^- e SO_4^{2-} , não são retidos e, portanto, tornam-se passíveis de arrastamento pelas águas de percolação. Ao se movimentarem através do solo, esses ânions, obedecendo ao princípio da eletronegatividade, carregam quantidades equivalentes de cátions que, em geral, são Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ ou Na^+ (Raij, 1991).

Nos solos tropicais predominam as cargas dependentes de pH (Raij, 1991). Nesses solos, a adição de corretivos da acidez eleva o pH e aumenta a quantidade de cargas negativas, refletindo em maior lixiviação de ânions e menor lixiviação de cátions (Pavan & Roth, 1992).

No SPD, a realização da calagem acompanhada da aplicação de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tem sido proposta como alternativa para movimentar bases no solo pela formação de pares iônicos neutros (CaSO_4^0 , MgSO_4^0 e K_2SO_4^0) e reduzir o Al trocável no subsolo (Reeve & Sumner, 1972; Pavan et al., 1984).

O NO_3^- , por ser o ânion mais abundante nos solos, é provavelmente o mais importante nos processos de lixiviação. Em geral, este ânion provém da nitrificação do íon amônio, seja ele originado da matéria orgânica do solo ou de adubos nitrogenados (Raij, 1991).

Caires et al. (1999) sugerem que os ânions NO_3^- e SO_4^{2-} , liberados a partir da decomposição de restos vegetais na superfície do solo, lixiviam no perfil transportando cátions, como Ca^{2+} e Mg^{2+} , à subsuperfície. Após 16 meses da adição de uréia como fonte de N, Cahn et

al. (1993) observaram intensa lixiviação de Ca^{2+} e Mg^{2+} e acidificação das camadas superficiais do solo.

Pearson et al. (1962) observaram efeitos pronunciados no subsolo com a aplicação de calcário e adubos nitrogenados na superfície. No entanto, na ausência de N, os efeitos da calagem no subsolo foram inexpressivos.

Raij et al. (1988) também destacam a influência do N nas alterações da acidez do subsolo. Esses autores observaram que a maior absorção de ânions em relação aos cátions, pela cultura do sorgo, reduziu a acidez do subsolo.

Existem ainda outros relatos na literatura de que a aplicação de calcário e fertilizantes acidificantes, na superfície do solo, pode promover melhoria das condições de acidez no subsolo (Weir, 1974; Adams, 1981). Um exemplo é a adição de fertilizantes nitrogenados em solos corrigidos promovendo a lixiviação de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ para o subsolo. Íons como NO_3^- , K^+ e Cl^- são absorvidos mais rapidamente pelas raízes, enquanto a absorção de Ca^{2+} e SO_4^{2-} é relativamente lenta. A diferença na taxa de absorção significa que as plantas removem cátions e ânions do meio em quantidades desiguais (Mengel & Kirkby, 1987). Föhse et al. (1991) observaram, na cultura do trigo, elevação do pH do solo pela maior absorção de ânions indicando excreção de HCO_3^- na rizosfera. A absorção de nitrato também pode ocorrer com troca de OH^- o que parece predominar em espécies que absorvem mais ânions do que cátions (Kirkby & Armstrong 1980, citados por Primavesi et al., 2005). Também merece atenção o fato de que o ânion NO_3^- chega até o simplasto das células das raízes por transporte ativo. Esse transporte é feito via simporte, ou seja, o ânion passa do apoplasto para o simplasto acompanhado do íon H^+ , promovendo alcalinização do apoplasto (Taiz & Zeiger, 2002). Portanto, a lixiviação de NO_3^- acompanhado de bases e sua posterior absorção no subsolo pelas raízes das plantas pode elevar o pH e aumentar o conteúdo de bases em camadas subsuperficiais. De acordo com Sumner (1995), as reações envolvidas nesse processo são as seguintes:

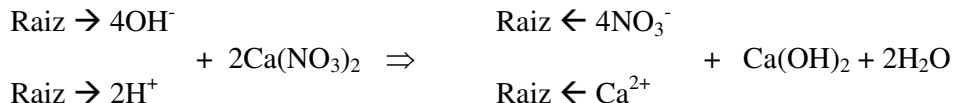
- Nitrificação (1)



- Reação com o CaCO_3 (2)



- Absorção diferenciada de Ca^{2+} e NO_3^- pelas raízes (3)



Nota-se que a elevação do pH e do conteúdo de bases no subsolo, por meio da adição de fertilizantes ácidos, só ocorre após a absorção do NO_3^- pelas raízes das plantas. Torna-se necessário, portanto, a utilização de espécies que toleram a acidez do solo e que possuem grande capacidade para desenvolverem raízes no subsolo (Sumner, 1995).

A aveia preta, cultura com elevada capacidade de extração de N, é amplamente cultivada no sul do Brasil. Entre as principais vantagens de seu cultivo destacam-se a sua elevada capacidade de produção de biomassa (Sá, 1997) e a agressividade de seu sistema radicular (Floss, 2000). A atividade e o crescimento do sistema radicular da aveia preta é estimulado pela maior disponibilidade de N (Olson & Kurtz, 1982; Yanai et al., 1996). Sendo assim, espera-se que a aveia preta possa contribuir para a melhoria das condições de acidez no subsolo, por meio da calagem associada ao uso de fertilizantes nitrogenados.

2.6 Calagem superficial e adubação nitrogenada para a cultura do milho no SPD

Uma série de estudos tem mostrado altas produtividades de milho e ausência de resposta da cultura à calagem superficial em solos com elevada acidez no SPD (Pöttker & Ben, 1998; Sá, 1999; Caires et al., 2000; Alleoni et al., 2003; Tissi et al., 2004; Caires et al., 2005). Provavelmente, tais efeitos são devidos aos elevados teores de matéria orgânica e à maior disponibilidade de água para as plantas nesse sistema. Os resultados de uma sucessão de culturas

em rotação, na região dos Campos Gerais no Paraná, não mostraram efeitos significativos da calagem superficial na produção de grãos de soja, milho, trigo e triticale; todavia, a produção acumulada em sete safras aumentou significativamente com a aplicação de calcário na superfície (Caires et al., 2000). Isso mostra que apesar das altas produtividades das culturas em condições de elevada acidez do solo no SPD, os pequenos incrementos anuais no rendimento de grãos com a calagem na superfície têm ocasionado implicações importantes no retorno econômico em longo prazo.

Embora a elevada acidez e a presença de alumínio em concentrações tóxicas sejam importantes barreiras ao crescimento radicular das plantas, a correção desses atributos por meio da calagem na superfície no SPD praticamente não tem alterado o comprimento e o raio médio das raízes de milho. Caires et al. (2002a) não observaram restrição ao crescimento radicular do milho cultivado no SPD, em solo com concentrações de Al^{3+} de até $10 \text{ mmol}_e \text{ dm}^{-3}$. Entretanto, a calagem na superfície melhorou a distribuição relativa das raízes de milho no perfil do solo, tendo ocasionado redução no comprimento relativo de raízes na camada superficial (0-10 cm) e aumento no subsolo (20-60 cm). Esse efeito esteve relacionado positivamente com o Ca trocável e negativamente com o Al trocável, mostrando efeitos positivos da calagem sobre os parâmetros morfológicos das raízes, na presença de solo compactado.

No SPD, o Al pode estar complexado aos ligantes orgânicos ou fortemente ligado à matéria orgânica do solo causando efeitos menos tóxicos às raízes das plantas. Soma-se a isso o fato de que os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} normalmente são adequados, mesmo em condições de baixa saturação por bases devido à elevada CTC dos solos sob SPD. Essas condições têm propiciado elevadas produtividades, mesmo em solos com alta acidez, nesse sistema de cultivo.

A saturação por Ca^{2+} e Mg^{2+} na CTC a pH 7,0 tem influenciado significativamente a nutrição e o rendimento de grãos de milho, justificando respostas positivas da cultura à calagem em solos com ausência de toxidez de alumínio e teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis considerados suficientes (Caires et al. 2004).

O N tem funções relevantes na produção e síntese de aminoácidos, sendo exigido em elevadas quantidades pela cultura do milho. A dinâmica desse nutriente no solo é bastante influenciada pelo sistema de manejo. Devido ao intenso aporte de resíduos vegetais e a ausência de revolvimento, o SPD aumenta a quantidade de matéria orgânica (Sá et al., 2001), implicando em maior estoque de N total no solo (Lovato et al., 2004). No entanto, devido à menor taxa de mineralização e à maior taxa de imobilização microbiana, a disponibilidade de N nesse sistema pode ser menor (Amado et al., 2000), pois apenas as formas inorgânicas (NH_4^+ e NO_3^-) são absorvidas pelas plantas (Raij, 1991). O cultivo de espécies com elevada relação C/N (aveia preta, milheto, brachiaria, etc.), visando a produção de resíduos mais persistentes no solo, resulta na imobilização temporária do N mineral pela biomassa microbiana, contribuindo ainda mais para a redução da disponibilidade de N no solo. A inclusão de leguminosas e a realização de adubação nitrogenada na cultura de cobertura têm sido sugeridas como estratégias para aumentar simultaneamente os estoques de C e de N do solo (Lovato et al., 2004).

A disponibilidade de N para as plantas também é influenciada pelas condições de acidez do solo. Além de interferir nos processos de decomposição e mineralização da matéria orgânica (Silva et al. 1999), o pH do solo interfere nas reações de nitrificação. A calagem aumenta a população de bactérias nitrificantes (Andrade et al., 1995) favorecendo a formação do ânion nitrato que é muito móvel e pode ser perdido por lixiviação. A maior nitrificação pela realização da calagem acontece independentemente do modo de aplicação (incorporado ou em superfície) do corretivo (Rosolem et al., 2003).

A eficiência da adubação nitrogenada realizada a lanço na superfície em SPD tem sido questionada. A menor eficiência dessa forma de aplicação estaria relacionada com a maior volatilização da amônia ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}^+$) formada devido ao elevado pH da camada superficial do solo (Howard & Essington, 1998). A presença de resíduos vegetais na superfície também pode favorecer a volatilização da amônia (Sangoi et al., 2003) pela maior atividade da

enzima urease, pela menor difusão do fertilizante para o solo e pela maior disponibilidade de água nos resíduos favorecendo a formação da amônia.

A complexa dinâmica do N no solo e a sua elevada exigência pela cultura do milho têm motivado diversos estudos ao longo dos anos visando a recomendação de fertilizantes nitrogenados. Contudo, existem controvérsias a respeito do manejo da adubação nitrogenada para o milho cultivado em SPD.

O uso freqüente de gramíneas (aveia) antecedendo a cultura do milho, visando elevada produção de resíduos vegetais de alta relação C/N, favorece a imobilização do N (Lovato et al., 2004), reduzindo a sua disponibilidade para o milho. Para amenizar esse efeito tem sido sugerida a realização de adubação nitrogenada no perfilhamento da cultura da aveia ou no momento de seu manejo, ou ainda a utilização de maior dose de N (30 kg ha^{-1}) na semeadura da cultura do milho (Sá, 1999).

A aplicação de todo o N na pré-semeadura do milho também pode ser uma alternativa para amenizar os efeitos da imobilização do N pelos microorganismos (Sá, 1996). Contudo, em condições favoráveis à lixiviação do NO_3^- (elevada precipitação pluvial, solos arenosos, etc.), essa prática pode resultar em falta de N para a cultura na fase de florescimento, período em que a cultura pode absorver quantidades superiores a $4,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N por dia (EMBRAPA, 1996), e redução no rendimento de grãos de milho. Trata-se, portanto, de uma prática de alto risco (Bortolini et al., 2001; Basso & Ceretta, 2000; Ceretta et al., 2002).

A fertilização nitrogenada da aveia, no início de seu perfilhamento, é uma importante estratégia para aumentar a produção de biomassa e melhorar a qualidade dos resíduos, ocasionando redução na relação C/N e aumento na ciclagem de nutrientes (Santi et al., 2003). Além dessas vantagens, Amado et al. (2003) observaram que a utilização de N na aveia reduziu a relação C/N dos resíduos produzidos e aumentou o rendimento de grãos de milho cultivado em sucessão. Todavia, o N liberado da aveia não foi suficiente para atender a demanda da cultura do milho.

Considerando o grande interesse em aportar elevadas quantidades de resíduos no SPD, a realização de adubação nitrogenada na cultura de cobertura poderá tornar-se uma importante estratégia de manejo. Nesse caso, a reação do solo também deverá receber especial atenção, pois a acidificação das camadas superficiais poderá acentuar-se enquanto que a movimentação do NO_3^- poderá contribuir para a melhoria da fertilidade do subsolo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização do experimento

O experimento foi realizado no município de Ponta Grossa (PR), Fazenda Estância dos Pinheiros, cujas coordenadas geográficas são 25°05'58" de latitude sul e 50°09'30" de longitude oeste, e altitude de 880 m.

3.2 Caracterização física e química do solo

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distrófico textura média. Análises químicas do solo realizadas antes da instalação do experimento, de acordo com os métodos descritos por Pavan et al. (1992), revelaram os resultados apresentados na tabela 1. Os resultados das análises granulométricas do solo (EMBRAPA, 1997) e mineralógicas da fração argila (Cambri, 2004), também realizadas antes da instalação do experimento, são mostrados na tabela 2.

TABELA 1. Resultados de análises químicas do solo, em diferentes profundidades, antes da instalação do experimento.

Profun- didade	pH (CaCl ₂)	H + Al	Al	Ca	Mg	K	P (Mehlich-1)	C	CTC a pH 7,0	V ¹	m ²
(cm)		mmol _c dm ⁻³					mg dm ⁻³	g dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³	---- % ----	
0–20	4,1	110	12	5	5	1,7	6,0	18	121,7	9,6	50,6
20–40	4,2	105	10	4	3	1,3	1,9	15	113,3	7,3	54,6
40–60	4,3	94	7	5	2	1,0	0,8	13	102,0	7,8	46,7

¹V = saturação por bases. ²m = saturação por alumínio.

TABELA 2. Resultados de análises granulométricas do solo e quantidades estimadas de minerais na fração argila, antes da instalação do experimento.

Profun- didade	Análises granulométricas			Análises mineralógicas		
	Areia	Silte	Argila	Caulinita	Hematita	Goethita
(cm)	----- g kg ⁻¹ -----					
0–20	465	240	295	265,8	2,4	26,8

3.3 Histórico da área experimental

Desde 1978 a área experimental é manejada no SPD. As culturas utilizadas no sistema de rotação e as respectivas adubações realizadas nos 10 anos anteriores à instalação do experimento estão apresentadas na tabela 3. Nitrogênio, fósforo e potássio foram aplicados predominantemente na forma de uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente. Na cultura do trigo, em 2003, o nitrogênio foi aplicado na forma de nitrato de amônio. A aveia preta, nos anos em que foi cultivada, foi dessecada na fase de grão leitoso para a produção de cobertura vegetal. Devido à predominância da cultura da soja no sistema de rotação, pequenas quantidades de fertilizantes nitrogenados foram adicionados no sistema (Tabela 3).

3.4 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas principais foram aplicados quatro tratamentos de calagem. Os tratamentos consistiram de uma testemunha e três doses de calcário dolomítico (31% de CaO e 23% de MgO) com 85% de poder relativo de neutralização total (PRNT): 4, 8 e 12 t ha⁻¹, calculadas visando elevar a saturação por bases do solo (V) da camada de 0-20 cm a, aproximadamente, 40, 65 e 90%, respectivamente. As doses de calcário foram aplicadas a lanço na superfície do solo em maio de 2004, após a colheita da cultura da soja. Nas subparcelas foram empregados quatro tratamentos de adubação nitrogenada sendo uma testemunha e três doses de N aplicadas na forma de nitrato de amônio: 60, 120 e 180 kg ha⁻¹. As doses de N foram aplicadas

em julho de 2004, a lanço, no início do perfilhamento da aveia preta. As áreas de cada parcela e subparcela foram de 166,4 e 41,6 m², respectivamente.

TABELA 3. Histórico da rotação de culturas e quantidades de N, P₂O₅ e K₂O aplicadas de 1994 a 2003 na área experimental.

Ano agrícola	Cultura	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
----- kg ha ⁻¹ -----				
1994	Aveia preta	0	0	0
1994-1995	Milho	65	68	40
1995	Aveia preta	0	0	0
1995-1996	Soja	0	50	50
1996	Trigo	58	62	62
1996-1997	Soja	0	0	48
1997	Triticale	60	73	74
1997-1998	Soja	0	0	48
1998	Aveia preta	0	0	0
1998-1999	Soja	0	64	65
1999	Aveia preta	0	0	0
1999-2000	Soja	0	30	30
2000	Aveia preta	0	0	0
2000-2001	Milho	132	64	98
2001	Aveia preta	0	0	0
2001-2002	Soja	5	46	43
2002	Aveia preta	0	0	0
2002-2003	Soja	0	53	55
2003	Trigo	80	0	40
2003-2004	Soja	0	60	60
Total		400	570	713

3.5 Cultura da aveia preta

A cultura da aveia preta foi implantada em 14 de junho de 2004. A semeadura foi realizada em linhas espaçadas de 0,17 m utilizando-se 80 kg ha⁻¹ de sementes, não sendo realizada nenhuma adubação por ocasião da semeadura. No dia 12 julho de 2004, início do perfilhamento da cultura, foram aplicados os tratamentos de N (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N) utilizando-se como fonte o nitrato de amônio (32% de N: 16% N-NO₃⁻ e 16% N-NH₄⁺). Na fase

de grão leitoso (27/08/2004) realizou-se o manejo químico da aveia preta com um dessecante à base de *Gliphosate* na dosagem de $0,96 \text{ kg ha}^{-1}$ do ingrediente ativo.

3.6 Cultura do milho

A semeadura do milho, híbrido AG6018, foi realizada em 24 de setembro de 2004 na densidade de 5,7 sementes por metro e espaçamento de 0,80 m entre as linhas. A adubação utilizada na semeadura foi de 26 kg ha^{-1} de N, 92 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 52 kg ha^{-1} de K_2O . Aos 17 dias após a semeadura foi realizada a primeira cobertura aplicando-se 54 kg ha^{-1} de N, a lanço, na forma de uréia. A segunda cobertura foi realizada aos 50 dias após a semeadura na dose de 40 kg ha^{-1} de N e 15 kg ha^{-1} de K_2O , também a lanço por meio da fórmula 36-00-12. O manejo das plantas daninhas foi realizado através da aplicação de um herbicida a base de *Atrazine* na dosagem de $1,2 \text{ kg ha}^{-1}$ do ingrediente ativo. Para o controle de lagartas do cartucho (*Spodoptera frugiperda*) foi realizada uma aplicação do inseticida *Lufenuron* na dosagem de $7,5 \text{ g ha}^{-1}$ do ingrediente ativo.

3.7 Caracterização climática

O clima da região é classificado como Subtropical Úmido Mesotérmico, tipo Cfb conforme classificação de Köppen, com temperaturas amenas no verão e ocorrência de geadas severas e frequentes no inverno, não apresentando estação seca (Maack, 1981). A precipitação pluvial média histórica na região é de 1550 mm anuais. A temperatura média histórica é de $17,8^{\circ}\text{C}$, com média das máximas de $24,1^{\circ}\text{C}$ e média das mínimas de $13,3^{\circ}\text{C}$ (IAPAR, 2005). Logo após a aplicação dos tratamentos de calcário (maio/2004) houve intensa precipitação pluvial, ficando o volume de chuva no mês de maio (198 mm) superior à média histórica da região (118 mm) para esta época do ano (Figura 1). A partir da segunda quinzena de julho de 2004 até o final de setembro de 2004 houve déficit hídrico na região. Essa estiagem afetou sobremaneira o desenvolvimento da cultura da aveia limitando seu potencial de produção de

biomassa para cobertura do solo. Durante o desenvolvimento da cultura do milho (outubro/2004 a janeiro/2005), as condições climáticas foram favoráveis para a cultura com médias de precipitação pluvial superiores às médias históricas. Apenas nos meses de fevereiro e março de 2005 voltou a ser registrada deficiência hídrica, mas sem afetar a cultura do milho que se encontrava na fase de maturidade fisiológica.

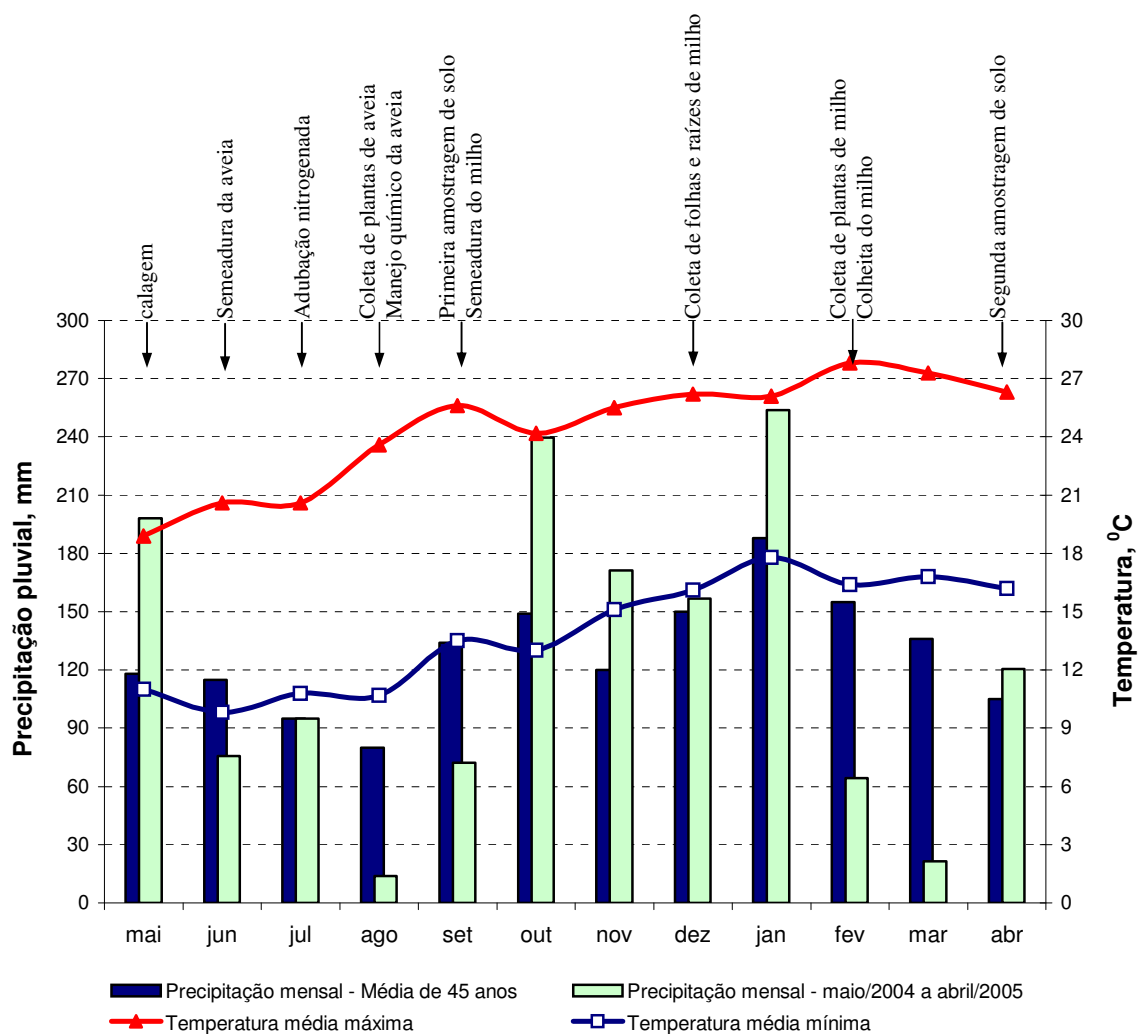


FIGURA 1. Dados climáticos de Ponta Grossa, PR. Precipitação pluvial média mensal da região (45 anos), precipitação pluvial mensal ocorrida durante a realização do experimento (maio/2004 a abril/2005) e temperaturas médias máximas e mínimas ocorridas no mesmo período (IAPAR, 2005).

3.8 Determinações

3.8.1 Atributos químicos do solo: para a avaliação dos efeitos da calagem e dos tratamentos de N nos atributos químicos do solo foram realizadas duas coletas de amostras de solo. A primeira amostragem, nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, foi realizada antes da semeadura do milho em 18 de setembro de 2004, correspondendo a 110 e 60 dias após a calagem e aplicação de N, respectivamente. A segunda amostragem, nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, foi realizada após a colheita do milho em 26 de abril de 2005, correspondendo a 330 e 280 dias após a calagem e aplicação de N, respectivamente. Nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, as amostras foram coletadas por meio de trado calador retirando-se 12 subamostras por subparcela para compor uma amostra composta. Nas profundidades de 20-40 e 40-60 cm foram retiradas cinco subamostras por subparcela, por meio de trado holandês, para formar uma amostra composta. Imediatamente após a coleta das amostras, estas foram fracionadas em duas porções. Uma das porções foi imediatamente acondicionada em caixa de isopor, contendo gelo, para preservação dos teores de N mineral até a chegada no laboratório, com posterior congelamento em freezer. Os teores de N inorgânico (NH_4^+ e NO_3^-) foram determinados pelo método de destilação a vapor descrito por Cantarella & Trivelin (2001a). A outra porção das amostras foi encaminhada para secagem em estufa com circulação forçada de ar à 40°C. De acordo com os métodos descritos por Pavan et al. (1992) foram determinados o pH e os teores de H+Al, Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Os teores de N total foram determinados conforme os métodos propostos por Cantarella & Trivelin (2001b).

3.8.2 Produção de matéria seca e análises químicas das plantas de aveia: na fase de grão leitoso (27/08/04) foi determinada a produção de matéria seca da parte aérea da aveia coletando-se um metro linear de plantas por subparcela. A parte aérea das plantas coletadas foi lavada com água desionizada e colocada para secar em estufa com circulação forçada de ar à 60°C. Após a secagem, as amostras foram pesadas para a determinação da matéria seca e,

posteriormente moídas para a determinação das concentrações de N, P, K e S, de acordo com os métodos descritos em Malavolta et al. (1997).

3.8.3 Análises químicas do tecido foliar do milho: para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn nas folhas de milho, foi coletada, no início do florescimento da cultura, o terço média da folha imediatamente abaixo e oposta à espiga em 30 plantas por subparcela. As folhas foram lavadas em água desionizada e colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60°C. Posteriormente, as amostras foram moídas e acondicionadas em recipientes plásticos até a realização das análises químicas de acordo com os métodos descritos em Malavolta et al. (1997).

3.8.4 Produção de matéria seca e análises químicas das plantas de milho: na maturidade fisiológica da cultura do milho foram retiradas cinco plantas consecutivas na linha de semeadura, por subparcela, as quais foram secas em estufa à 60°C e pesadas para a determinação da produção de matéria. Após, as plantas foram moídas para a determinação do teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn (Malavolta et al. 1997). Os dados de produção de matéria seca e de concentração de nutrientes na parte aérea na maturidade fisiológica foram utilizados para estimar a absorção de nutrientes pela cultura do milho.

3.8.5 Sistema radicular do milho: no início do florescimento da cultura do milho foram coletadas amostras de raízes, por meio de trado cilíndrico, em quatro profundidades (0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm) retirando-se seis subamostras, sendo três na linha de semeadura e três nas entrelinhas, equidistantes 10 cm da planta, para formar uma amostra composta. As amostras, com 3,5 cm de diâmetro, foram tomadas ao acaso em apenas quatro tratamentos: testemunha (sem calcário e sem N), calcário (12 t ha⁻¹), N (180 kg ha⁻¹ na aveia) e calcário + N (12 t ha⁻¹ de calcário + 180 kg ha⁻¹ de N na aveia). Para dispersão do solo e separação das raízes, as amostras foram lavadas com água em peneira de malha de 0,5 mm. O comprimento de raízes foi avaliado

pelo método proposto por Tennant (1975) e o raio médio e a superfície radicular de acordo com Schenk & Barber (1979).

3.8.6 Produtividade de milho: O rendimento de grãos de milho foi avaliado por meio de colheita manual e posterior trilhagem em máquina debulhadora estacionária. Foram colhidos 12 m² centrais de cada subparcela desprezando-se as bordaduras. Após a debulha, os grãos foram pesados determinando-se, então, o rendimento de grãos a 13% de umidade.

3.8.7 Concentração de óleo, proteína e nutrientes nos grãos de milho: Após a avaliação da produtividade, os grãos de milho foram moídos para a determinação dos teores de proteína, óleo e nutrientes. Para estimativa do teor de proteína bruta, multiplicou-se o valor de N total, obtido pelo método Kjeldahl, por 6,25. O teor de óleo foi determinado, gravimetricamente, após extração das amostras com hexano, a quente, em extrator Soxhlet, segundo o método da Association of Official Agricultural Chemists (1955). Os teores de S foram determinados por digestão nítrico-perclórica e leitura por turbidimetria em fotocolorímetro. Para a determinação dos demais nutrientes, pesou-se 1,5 g do material em cápsula de porcelana e, em seguida, as amostras foram incineradas em chapa elétrica até carbonização. Posteriormente, as amostras foram transferidas para mufla a 450 °C por oito horas. As cinzas foram dissolvidas com ácido nítrico concentrado e transferidas quantitativamente para balão volumétrico de 50 mL. As determinações de P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn e Mn foram feitas mediante leitura em espectrômetro de emissão de plasma (ICP-AES).

3.9 Análises estatísticas

As análises de variância foram realizadas seguindo o modelo em parcelas subdivididas. Na ausência de interação significativa entre as doses de calcário e de N, ajustaram-se equações de regressão por polinômios ortogonais aos dados obtidos em função dos tratamentos, utilizando-se as médias das observações. Na presença de interação significativa

entre os tratamentos de calagem e de N realizou-se o desdobramento da interação, ajustando-se equações de regressão por polinômios ortogonais aos dados de calagem dentro de cada tratamento de N e aos dados de N dentro de cada tratamento calagem. Consideraram-se apenas as regressões com coeficientes de determinação significativos ao nível de 5%. Para os atributos de crescimento de raízes foram realizadas análises de variância para cada profundidade de amostragem, comparando-se as médias pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram executadas por meio de programa de computador ESTAT, conforme método descrito por Banzatto & Kronka (1989).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produção de matéria seca e concentração de nutrientes na aveia preta

As doses de calcário e N não influenciaram a produção de matéria seca e a concentração de P e S na parte aérea da aveia (Tabela 4). A calagem também não teve efeito sobre a concentração de K, mas reduziu linearmente a concentração de N na matéria seca da aveia. As doses de N aumentaram de maneira linear e quadrática os teores de N e K nas plantas de aveia, respectivamente.

A adubação nitrogenada frequentemente eleva a quantidade de resíduos produzidos pela aveia, podendo atingir níveis superiores a 7 t ha^{-1} (Nakagawa et al., 2000; Santi et al., 2003; Mai et al., 2003). No entanto, o severo déficit hídrico registrado durante o ciclo de desenvolvimento da cultura no campo (Figura 1) limitou a produção de massa seca de aveia e a resposta da cultura à adubação nitrogenada. Embora as condições climáticas para o estabelecimento inicial da cultura tenham sido adequadas, no início do perfilhamento da cultura iniciou-se um “veranico” que se estendeu durante todo o mês de agosto e primeira quinzena de setembro. O nitrato de amônio foi aplicado em período de seca não havendo condições adequadas para a absorção de N pelas plantas.

A pequena produção de matéria seca pela aveia também pode ter sido consequência do elevado teor de Al^{3+} no solo ($12 \text{ mmol}_e \text{ dm}^{-3}$). Em condições de boa disponibilidade hídrica no SPD, elevados teores de Al^{3+} não têm limitado o crescimento radicular e a produção da cultura do trigo (Caires et al., 2001) e do milho (Caires et al., 2002a). Ressalta-se, no entanto,

TABELA 4. Produção de matéria seca da parte aérea e concentração de nutrientes nas plantas de aveia de acordo com os tratamentos de calagem na superfície e nitrogênio em cobertura.

Tratamento	N	P	K	S	Matéria seca
	g kg ⁻¹				t ha ⁻¹
Calcário, t ha ⁻¹					
0	27,5	1,7	31,3	1,7	1,2
4	26,4	1,7	29,7	1,6	1,1
8	26,5	1,6	31,2	1,7	1,1
12	25,6	1,6	32,5	1,7	1,2
Efeito	L*	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	6,9	11,1	27,2	25,6	23,7
Nitrogênio, kg ha ⁻¹					
0	24,6	1,7	28,1	1,7	1,2
60	25,9	1,6	31,6	1,6	1,1
120	27,3	1,6	33,0	1,7	1,1
180	28,2	1,6	32,1	1,7	1,2
Efeito	L**	ns	Q**	ns	ns
C.V. (%)	6,2	9,5	24,9	21,0	22,6

L = efeito linear por regressão polinomial; Q = efeito quadrático por regressão polinomial. *, ** e ns: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$ e não significativo, respectivamente.

que na presença de déficit hídrico, os efeitos do Al^{3+} sobre as raízes das plantas podem ser mais acentuados. Corrêa et al. (2004) verificaram, em condições de seca, que a concentração de $10 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} reduziu significativamente o crescimento das raízes, a produção de matéria seca e o rendimento de grãos de trigo. Efeito semelhante pode ter ocorrido com a aveia que produziu baixa quantidade de matéria seca no presente trabalho. Embora tenha sido realizada a calagem, o curto período de tempo entre a aplicação do calcário e o cultivo da aveia não deve ter sido suficiente para que a calagem tivesse promovido efeitos pronunciados na correção da acidez do solo e que pudessem refletir no desenvolvimento dessa cultura.

A correção da acidez mediante a prática da calagem favorece a mineralização da matéria orgânica que pode refletir em maior absorção de N pelas plantas, conforme observado por Ogata & Caldwell (1960) na cultura da aveia e por Caires et al. (2001) na cultura da cevada. No presente trabalho, observou-se redução linear nos teores de $N-NH_4^+$, na camada superficial do solo (0-5 cm), após 110 dias da aplicação de calcário (Tabela 5). Parte do $N-NH_4^+$ dessa

camada possivelmente foi nitrificado e o NO_3^- formado, lixiviado para profundidades maiores que 20 cm, considerando que houve intensa precipitação pluvial após a calagem. Esse efeito deve ter prejudicado a absorção de N pelas plantas de aveia, pois houve correlação significativa ($P < 0,05$) entre os teores de N-NH_4^+ no solo e a concentração de N nas plantas ($r = 0,52$).

Apesar da escassez de água após a aplicação do N houve aumento na concentração desse nutriente nas plantas de aveia com a adubação nitrogenada (Tabela 4). Os maiores teores de N nas plantas refletem a maior disponibilidade de N mineral no solo por meio da aplicação de nitrogênio. Santi et al. (2003) também observaram que a adubação nitrogenada aumentou a concentração de N na matéria seca da aveia, obtendo-se com a maior dose de N aplicada (240 kg ha^{-1}), concentração de N na matéria seca de $16,2 \text{ g kg}^{-1}$. Essa concentração é inferior às observadas no presente trabalho, mesmo na ausência de adubação nitrogenada ($24,6 \text{ g kg}^{-1}$). O mesmo aconteceu com as concentrações de K, sendo maiores neste trabalho em comparação aos resultados de Santi et al. (2003). Esses resultados sugerem que o N e o K concentraram-se nas plantas devido ao crescimento limitado da aveia, pela falta de água.

O K está envolvido nos processos de transporte de NO_3^- para a parte aérea das plantas. Havendo maior absorção de NO_3^- ocorre redução da concentração de K nas raízes (Silveira & Crocomo, 1989) estimulando sua absorção, o que justifica a maior absorção de K pelas plantas nos tratamentos com N.

Aumentos na concentração de K na aveia por meio da adição de N não são comuns na literatura. Santi et al. (2003) observaram maior ciclagem de K pela aveia com a adubação nitrogenada, mas não verificaram aumento na concentração de K nas plantas com a aplicação de N. Esse resultado deve ter sido consequência do efeito de diluição do nutriente nos tecidos. Como no presente trabalho não houve maior produção de matéria seca com a adubação nitrogenada, a maior absorção de K proporcionada pela aplicação de N refletiu-se em maior teor do nutriente na matéria seca.

4.2 Atributos químicos do solo

4.2.1 Nitrogênio

Os resultados da análise química da primeira amostragem de solo, realizada logo após o manejo da aveia, mostraram ausência de efeito da calagem superficial nos teores de N-NO_3^- e N-Total até a profundidade de 20 cm (Tabela 5). Os teores de N-NH_4^+ foram reduzidos linearmente na profundidade de 0-5 cm pelas doses de calcário aplicadas na superfície e aumentados, de maneira quadrática, na profundidade de 10-20 cm. A calagem superficial não influenciou os teores de N-NH_4^+ na profundidade de 5-10 cm.

TABELA 5. Teores de N-NH_4^+ , N-NO_3^- e N-Total ($\hat{y}$, em mg dm^{-3}), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície (x , em t ha^{-1}), 110 dias após a aplicação.

Calcário	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-Total
t ha ⁻¹	----- mg dm ⁻³ -----		
0-5 cm			
0	33,9	40,2	2370
4	31,2	41,7	2418
8	27,6	43,7	2272
12	23,7	42,5	2407
Equação	$\hat{y} = -0,86x + 34,2$	$\hat{y} = \bar{Y} = 42,0$	$\hat{y} = \bar{Y} = 2357$
R ²	0,99**	-	-
CV (%)	30,2	19,6	8,2
5-10 cm			
0	12,8	32,9	1731
4	16,2	37,2	1770
8	13,6	31,4	1758
12	17,3	34,2	1772
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 14,9$	$\hat{y} = \bar{Y} = 33,9$	$\hat{y} = \bar{Y} = 1758$
R ²	-	-	-
CV (%)	53,4	20,1	6,5
10-20 cm			
0	11,4	17,3	1321
4	17,2	20,1	1416
8	10,5	21,1	1421
12	7,5	17,9	1366
Equação	$\hat{y} = -0,13710x^2 + 1,20x + 12,2$	$\hat{y} = \bar{Y} = 19,0$	$\hat{y} = \bar{Y} = 1381$
R ²	0,74*	-	-
CV (%)	52,3	32,1	5,3

* e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

A redução dos teores de N-NH_4^+ , na profundidade de 0-5 cm, pela calagem deve-se à elevação do pH dessa camada e, conseqüente favorecimento das reações de nitrificação. Esses resultados são comuns na literatura, pois as reações de nitrificação são altamente dependentes do pH do solo e praticamente não ocorrem em valores de pH menores do que 4 (Silva & Vale, 2000; Rosolem et al., 2003).

Apesar da maior nitrificação pela calagem, não foi verificado aumento nos teores de N-NO_3^- até a profundidade de 20 cm. Ressalta-se que logo após a realização da calagem houve intensa precipitação pluvial, o que deve ter favorecido a lixiviação do N-NO_3^- , formado a partir da nitrificação do N-NH_4^+ , para profundidades maiores que 20 cm. Resultados semelhantes foram observados por Rosolem et al. (1991, 2003). Nos Estados Unidos da América foi observado maior teor de N-NO_3^- no solo com a realização da calagem, mas os autores ressaltaram tratar-se de um solo mal drenado o que dificultava a lixiviação de ânions (Ogata & Caldwell, 1960). No Brasil, a boa estruturação dos solos cultivados no SPD favorece a infiltração de água no perfil e, conseqüentemente, a lixiviação do NO_3^- .

De acordo com o coeficiente angular da equação obtida para os teores de N-NH_4^+ ($\hat{y}$, em mg dm^{-3}) em função das doses de calcário (x , em t ha^{-1}) na camada de 0-5 cm ($\hat{y} = -0,86x + 34,2$), verifica-se que na maior dose (12 t ha^{-1}), o calcário promoveu perda de aproximadamente 5 kg ha^{-1} de N amoniacal, o que corresponde a aproximadamente 13% do N mineral da camada superficial do solo, o que pode explicar a menor absorção de N pela aveia observada nos tratamentos de calagem (Tabela 4).

Por ocasião da segunda amostragem, realizada após a colheita do milho, não foram verificados efeitos da calagem nos teores de N mineral no solo (N-NH_4^+ e NO_3^-) (Tabela 6). Nessa ocasião, a calagem reduziu os teores de N-Total de forma quadrática, na profundidade de 0-5 cm, e de forma linear, nas profundidades de 5-10 e 10-20 cm. Não foram observados efeitos da calagem sobre os teores de N-Total nas profundidades de 20-40 e 40-60 cm.

TABELA 6. Teores de N-NH_4^+ , N-NO_3^- e N-Total ($\hat{y}$, em mg dm^{-3}), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície (x , em t ha^{-1}), 330 dias após a aplicação.

Calcário	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-Total
t ha ⁻¹	mg dm ⁻³		
	0-5 cm		
0	18,6	12,5	3732
4	18,7	7,7	3623
8	18,0	15,3	3689
12	22,7	11,9	2996
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 19,5$	$\hat{y} = \bar{Y} = 11,8$	$\hat{y} = -9,120x^2 + 55,90x + 3685$
R ²	-	-	0,88*
CV (%)	38,4	56,0	14,0
	5-10 cm		
0	12,2	13,0	2838
4	13,7	9,1	2662
8	13,4	16,1	2833
12	14,8	9,9	2498
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 13,5$	$\hat{y} = \bar{Y} = 12,0$	$\hat{y} = -21,23x + 2835$
R ²	-	-	0,46*
CV (%)	38,7	45,2	11,6
	10-20 cm		
0	11,3	13,1	2333
4	11,8	9,9	2245
8	12,5	14,3	2312
12	18,8	10,3	2009
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 13,6$	$\hat{y} = \bar{Y} = 11,9$	$\hat{y} = -22,63x + 2361$
R ²	-	-	0,62*
CV (%)	47,0	41,5	13,7
	20-40 cm		
0	14,3	13,9	1757
4	12,0	8,8	1947
8	11,9	16,4	1855
12	12,7	13,0	1924
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 12,7$	$\hat{y} = \bar{Y} = 13,0$	$\hat{y} = \bar{Y} = 1871$
R ²	-	-	-
CV (%)	52,5	49,0	22,3
	40-60cm		
0	10,3	11,0	1587
4	7,3	7,3	1531
8	11,2	11,4	1691
12	9,7	9,7	1497
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 9,6$	$\hat{y} = \bar{Y} = 9,8$	$\hat{y} = \bar{Y} = 1576$
R ²	-	-	-
CV (%)	71,0	68,6	14,2

* e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

As perdas de N-NH_4^+ observadas nos tratamentos de calagem na primeira amostragem não se repetiram na segunda amostragem (Tabelas 5 e 6). Essa recuperação nos teores N-NH_4^+ nos tratamentos de calagem, num maior período de tempo, deve estar associado com a maior mineralização da matéria orgânica, freqüentemente verificada com a realização da calagem (Silva et al., 1999; Rosolem et al., 2003) e também observada neste trabalho pela redução dos teores de N-Total.

Embora não tenha sido objetivo desse estudo verificar o efeito do tempo e do sistema de rotação sobre os estoques de N solo solo, observa-se que houve, independentemente dos tratamentos utilizados, aumento nos estoques de N-total do solo a partir do manejo da aveia até a colheita do milho (setembro/2005 a abril/2006), provavelmente devido a decomposição da serapilheira composta principalmente por resíduos de plantas de soja e aveia mantidos na superfície do solo.

Enquanto que os teores médios de N-total foram maiores na segunda amostragem os teores de N-mineral, nessa ocasião, foram menores, provavelmente devido à incorporação de parte do N-mineral aos compostos orgânicos do solo. Imobilização de N em área cultivada há vários anos no SPD também foi relatada por Howard & Essington (1998), sendo mais acentuada após a adição de resíduos com alta relação C/N (gramíneas).

Cabe ressaltar que todos os tratamentos receberam, durante o cultivo do milho, 120 kg ha^{-1} de N na forma de uréia, o que corresponde a uma adição de 60 mg dm^{-3} de N na forma mineral. Cabezas et al. (2005) afirmam que a aplicação de N, na forma de uréia, na cultura do milho, resulta em imobilização de N com baixa taxa de remineralização e posterior aproveitamento do nutriente pela cultura.

Após 60 dias da aplicação das doses de N no perfilhamento da aveia, observaram-se aumentos nos teores de N-Mineral, nas três profundidades estudadas (Tabela 7). De acordo com o coeficiente angular das regressões ajustadas entre as doses de N e os teores de N-NO_3^- e N-NH_4^+ no solo, estimou-se efeito residual equivalente a 64,5% do N aplicado na camada de 0-20

cm na forma mineral (Figura 2). Portanto, 60 dias após a aplicação, 35,5% do N aplicado via nitrato de amônio já não estava mais disponível na forma mineral para a próxima cultura. Nessa ocasião, parte do N aplicado havia sido absorvido pela cultura da aveia (Tabela 4), outra parte havia sido imobilizado em formas orgânicas, o que foi verificado através do aumento nos teores de N-Total na camada superficial (Tabela 7) e um pequeno percentual pode ter sido lixiviado para profundidades maiores que 20 cm.

Na segunda amostragem, 280 dias após a aplicação do N e imediatamente após a colheita do milho, observou-se efeito das doses de N sobre os teores de N-NH_4^+ somente na

TABELA 7. Teores de N-NH_4^+ , N-NO_3^- e N-Total ($\hat{y}$, em mg dm^{-3}), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio em cobertura na aveia (x , em kg ha^{-1}), 60 dias após a aplicação.

Nitrogênio	N-NH_4^+	N-NO_3^-	N-Total
kg ha^{-1}	----- mg dm^{-3} -----		
	0-5 cm		
0	9,7	12,0	2195
60	16,6	32,3	2299
120	35,5	55,8	2469
180	54,6	68,3	2505
Equação	$\hat{y} = 0,26x + 6,1$	$\hat{y} = 0,32x + 13,2$	$\hat{y} = 1,83x + 2201,8$
R^2	0,99*	0,99**	0,95**
CV (%)	28,5	20,9	9,5
	5-10 cm		
0	7,3	12,6	1754
60	12,1	26,6	1710
120	17,7	41,6	1778
180	22,9	55,9	1788
Equação	$\hat{y} = 0,09x + 7,1$	$\hat{y} = 0,24x + 12,6$	$\hat{y} = \bar{Y} = 1758$
R^2	0,99**	0,99**	-
CV (%)	51,3	21,1	7,3
	10-20 cm		
0	6,5	8,0	1381
60	10,4	16,1	1357
120	11,4	20,2	1384
180	18,3	32,2	1402
Equação	$\hat{y} = 0,06x + 6,2$	$\hat{y} = 0,13x + 7,6$	$\hat{y} = \bar{Y} = 1381$
R^2	0,92**	0,96**	-
CV (%)	56,9	26,9	5,1

* e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

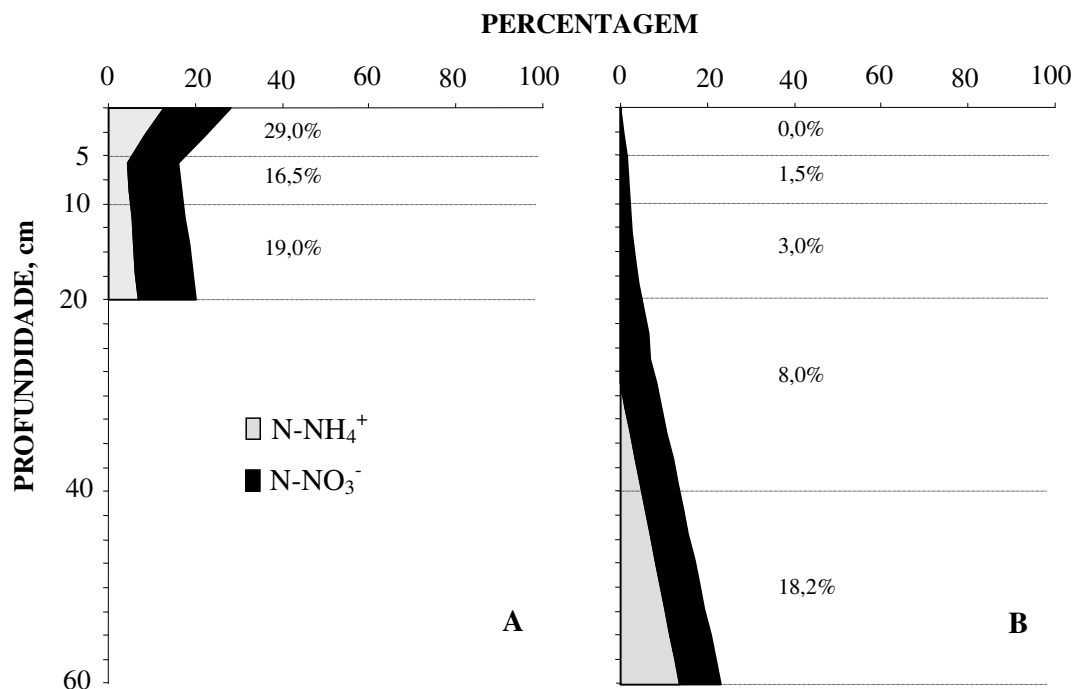


FIGURA 2. Distribuição percentual do nitrogênio aplicado, nas diferentes profundidades. Valores calculados em função do coeficiente angular das regressões ajustadas entre as doses de N e os teores de N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ no solo. (A) e (B): 60 e 280 dias após a aplicação do N, respectivamente.

profundidade de 40-60 cm (Tabela 8), demonstrando movimentação do íon no solo conforme relatado por Deare et al. (1995). Nessa ocasião, observou-se ainda efeito residual dos tratamentos de N sobre os teores de NO₃⁻ nas profundidades de 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm e sobre os teores de N-Total na camada de 0-5 cm.

A ausência de efeito da aplicação de nitrato de amônio sobre os teores de N-NH₄⁺ até a profundidade de 40 cm, após 280 dias da aplicação, sugere que o N aplicado na forma de amônio sofreu nitrificação, imobilização, ou foi absorvido pela cultura do milho. Levando em consideração que o pH das camadas abaixo de 5 cm, nesse solo, situava-se ao redor de 4,4 e que a nitrificação é limitada em condições acidez (Silva & Vale, 2000; Young et al., 2002; Rosolem et al., 2003), é possível que parte do N-NH₄⁺ disponível no solo, na semeadura da cultura do milho, tenha sido extraída pelas plantas. Vale et al. (1984) observaram, em baixas concentrações de N no solo, menor absorção de NO₃⁻ e maior absorção de NH₄⁺, sugerindo maior eficiência da cultura do milho na absorção do N amoniacal, pelo menos quando a disponibilidade do nutriente

TABELA 8. Teores de N-NH_4^+ , N-NO_3^- e N-Total ($\hat{y}$, em mg dm^{-3}), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de nitrogênio em cobertura na aveia (x , em kg ha^{-1}), 280 dias após a aplicação.

Nitrogênio	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-Total
kg ha ⁻¹	mg dm ⁻³		
0-5 cm			
0	17,2	10,1	3422
60	19,5	11,3	3701
120	20,3	12,1	3666
180	20,8	13,9	3503
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 19,5$	$\hat{y} = \bar{Y} = 11,8$	$\hat{y} = -0,031x^2 + 5,90x + 3431$
R ²	-	-	0,97*
CV (%)	41,7	51,9	9,9
5-10 cm			
0	13,4	9,2	2763
60	12,7	12,4	2718
120	13,2	11,9	2761
180	15,0	14,8	2588
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 13,6$	$\hat{y} = 0,03x + 9,6$	$\hat{y} = \bar{Y} = 2708$
R ²	-	0,83*	-
CV (%)	38,2	43,7	10,2
10-20 cm			
0	11,8	9,1	2209
60	13,5	12,5	2281
120	13,3	11,1	2203
180	15,8	14,9	2207
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 13,6$	$\hat{y} = 0,03x + 9,5$	$\hat{y} = \bar{Y} = 2225$
R ²	-	0,72**	-
CV (%)	51,0	38,0	11,5
20-40 cm			
0	13,7	9,8	1993
60	14,8	12,3	1912
120	10,3	11,6	1867
180	12,2	18,3	1845
Equação	$\hat{y} = \bar{Y} = 12,8$	$\hat{y} = 0,04x + 9,3$	$\hat{y} = \bar{Y} = 1904$
R ²	-	0,75**	-
CV (%)	49,8	48,4	12,5
40-60cm			
0	6,2	6,2	1570
60	9,3	9,3	1584
120	7,1	7,8	1572
180	15,9	15,9	1579
Equação	$\hat{y} = 0,045x + 5,6$	$\hat{y} = 0,046x + 5,7$	$\hat{y} = \bar{Y} = 1576$
R ²	0,62**	0,70**	-
CV (%)	68,0	67,5	12,8

* e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

no solo é baixa. O aumento do N-total no solo com a adubação nitrogenada (Tabela 8) é um indicativo de que parte do N-NH_4^+ aplicado tenha sido imobilizado pelos microorganismos.

Os resultados mostraram também a grande mobilidade do NO_3^- no solo. Após 280 dias foram recuperados, pela análise de solo, aproximadamente 30% do N aplicado, até a profundidade de 60 cm, estando o maior percentual (18,2%) na camada de 40-60 cm (Figura 2). Embora parte do N aplicado tenha sido imobilizado e, ou absorvido pelas plantas, é possível que tenha ocorrido movimentação de NO_3^- para profundidades maiores que 60 cm. Cabe salientar que no período compreendido entre a aplicação do N e a segunda amostragem foram registrados 1114 mm de precipitação pluvial, favorecendo a movimentação de ânions no perfil do solo.

4.2.2 Componentes da acidez e cátions básicos trocáveis

A aplicação de calcário na superfície promoveu elevação do pH na camada 0-5 cm, após 110 dias, e até a profundidade de 20 cm, aos 330 dias após a aplicação (Figura 3). Não foram observadas alterações nos valores de pH do solo após 60 dias da aplicação de nitrato de amônio, mas aos 280 dias verificou-se pequena acidificação do solo nas camadas de 10-20 cm e de 40-60 cm com a sua utilização (Figura 3).

Na primeira amostragem, a calagem reduziu os teores de Al^{3+} nas camadas de solo de 0-5 cm e de 10-20 cm, enquanto que as doses de N não apresentaram efeito sobre esse atributo, nessa ocasião (Figura 4). Na segunda amostragem, a calagem reduziu os teores de Al^{3+} nas camadas de solo de 5-10 cm e de 20-40 cm, independentemente dos tratamentos de N. Nas camadas de 0-5 e 10-20 cm, a análise de variância para os teores de Al^{3+} mostrou interação significativa entre os tratamentos de calagem e de N. Na camada mais superficial (0-5 cm), a calagem reduziu os teores de Al^{3+} em todos os níveis de N, enquanto que na camada de 10-20 cm a calagem reduziu os teores de Al^{3+} apenas quando se realizou adubação nitrogenada na aveia, independentemente da dose. Na ausência de calagem, as doses de N elevaram os teores Al^{3+} nas

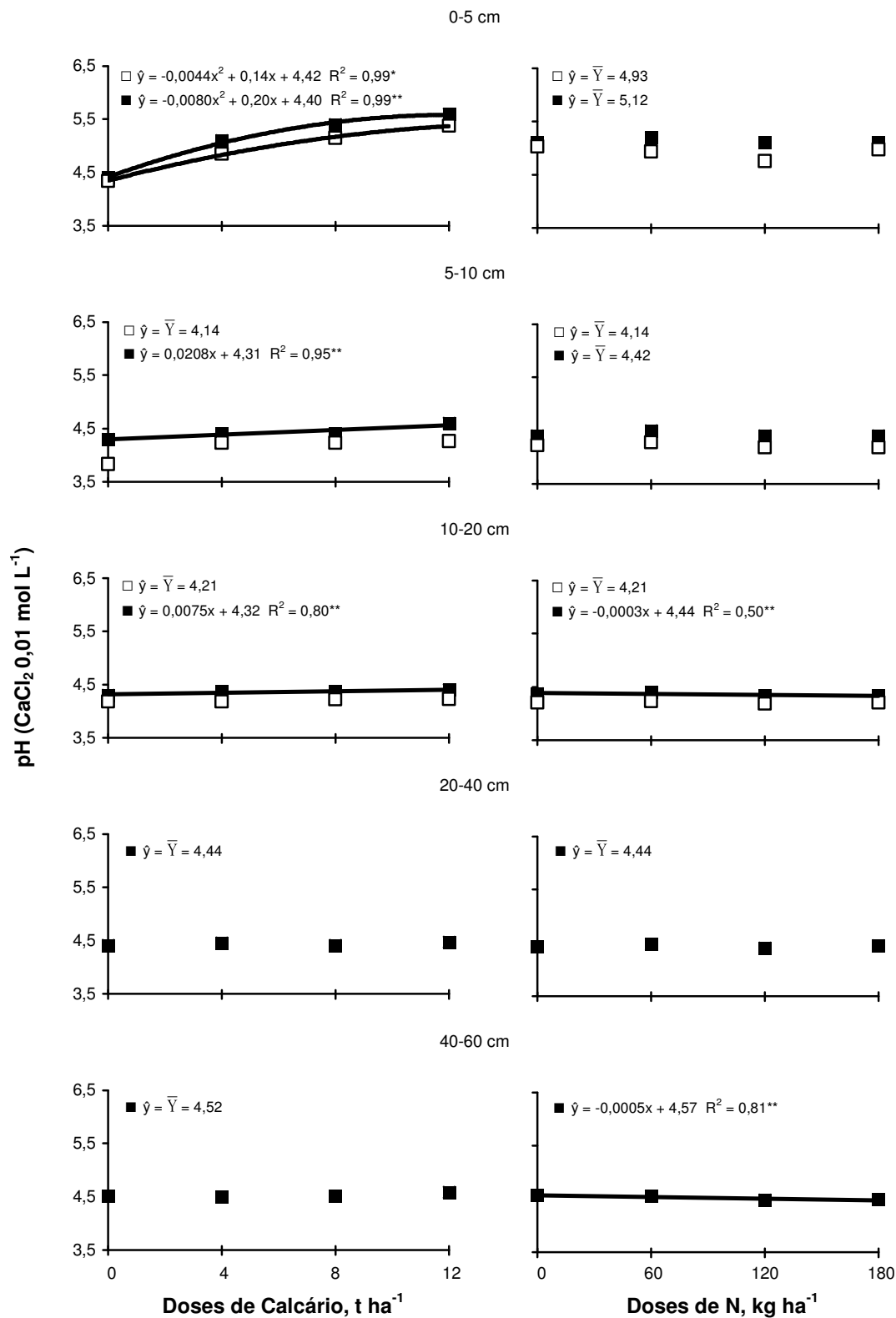


FIGURA 3. Valores de pH em CaCl_2 , para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem, (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

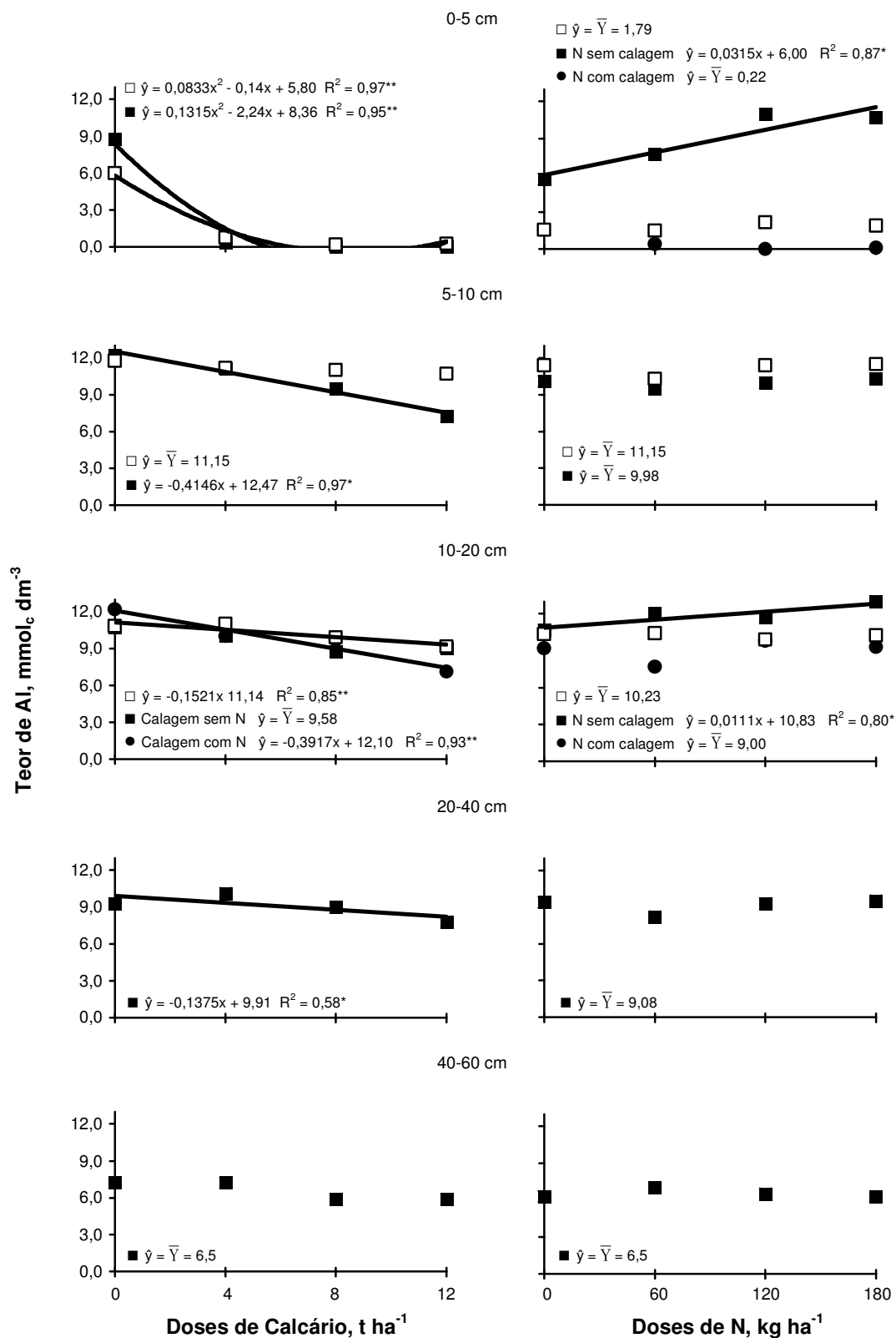


FIGURA 4. Teores de Al trocável, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de N em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) e (●) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

camadas de 0-5 cm e de 10-20 cm. Todavia, quando se realizou a calagem, independentemente da dose, este efeito desapareceu (Figura 4).

A acidez potencial ($H + Al$) foi reduzida significativamente pela calagem nas camadas de solo de 0-5 cm e de 10-20 cm, na primeira amostragem, e nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 40-60 cm, na segunda amostragem (Figura 5). As doses de N aumentaram a acidez potencial apenas na profundidade de 10-20 cm, na segunda amostragem, refletindo a acidificação dessa camada observada também pela redução do pH (Figura 3) e elevação dos teores de Al^{3+} trocável, principalmente na ausência de calagem (Figura 4).

O conteúdo de cátions básicos trocáveis no solo também foi fortemente influenciado pelos tratamentos de calagem (Figuras 6, 7 e 8). Na primeira amostragem observou-se que a calagem ocasionou elevação nos teores de Ca^{2+} (Figura 6) e de K^+ (Figura 8), nas três profundidades amostradas, e nos teores de Mg^{2+} (Figura 7) na profundidade de 0-5 cm. Na segunda amostragem, os efeitos da calagem acentuaram-se ainda mais no perfil do solo, observando-se elevação nos teores de Ca^{2+} e de K^+ até 40 cm de profundidade, e nos teores de Mg^{2+} até 10 cm. As doses de N não tiveram efeito sobre os teores de Mg^{2+} (Figura 7) e de K^+ (Figura 8) no solo. Houve, no entanto, redução linear nos teores de Ca^{2+} nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm com as doses de N aplicadas em cobertura na aveia (Figura 6).

Os efeitos benéficos da calagem sobre as condições de acidez do solo refletiram-se em elevação na saturação por bases do solo em todas as profundidades estudadas, nas duas épocas de amostragem (Figura 9). As doses de N apenas promoveram redução na saturação por bases na camada superficial do solo (0-5 cm) (Figura 9), devido principalmente às perdas de Ca^{2+} por lixiviação, sem aumentos significativos no subsolo (Figura 6).

As alterações nos atributos químicos do solo obtidas com a realização da calagem na superfície em SPD consolidado mostraram claramente que houve melhoria nas condições de acidez de camadas superficiais e do subsolo, inclusive em curto prazo. Efeitos rápidos na

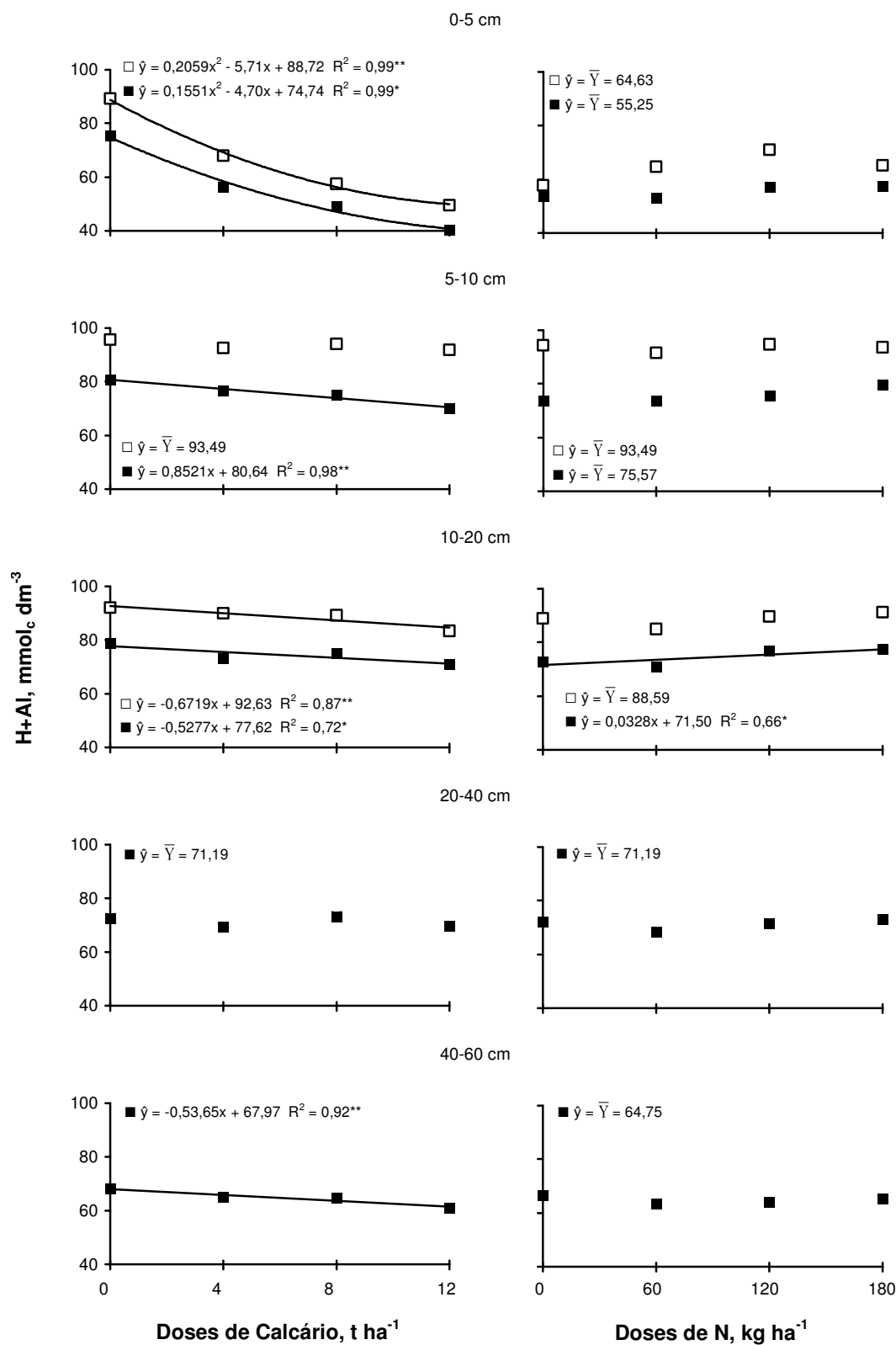


FIGURA 5. Acidez potencial (H+Al), para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

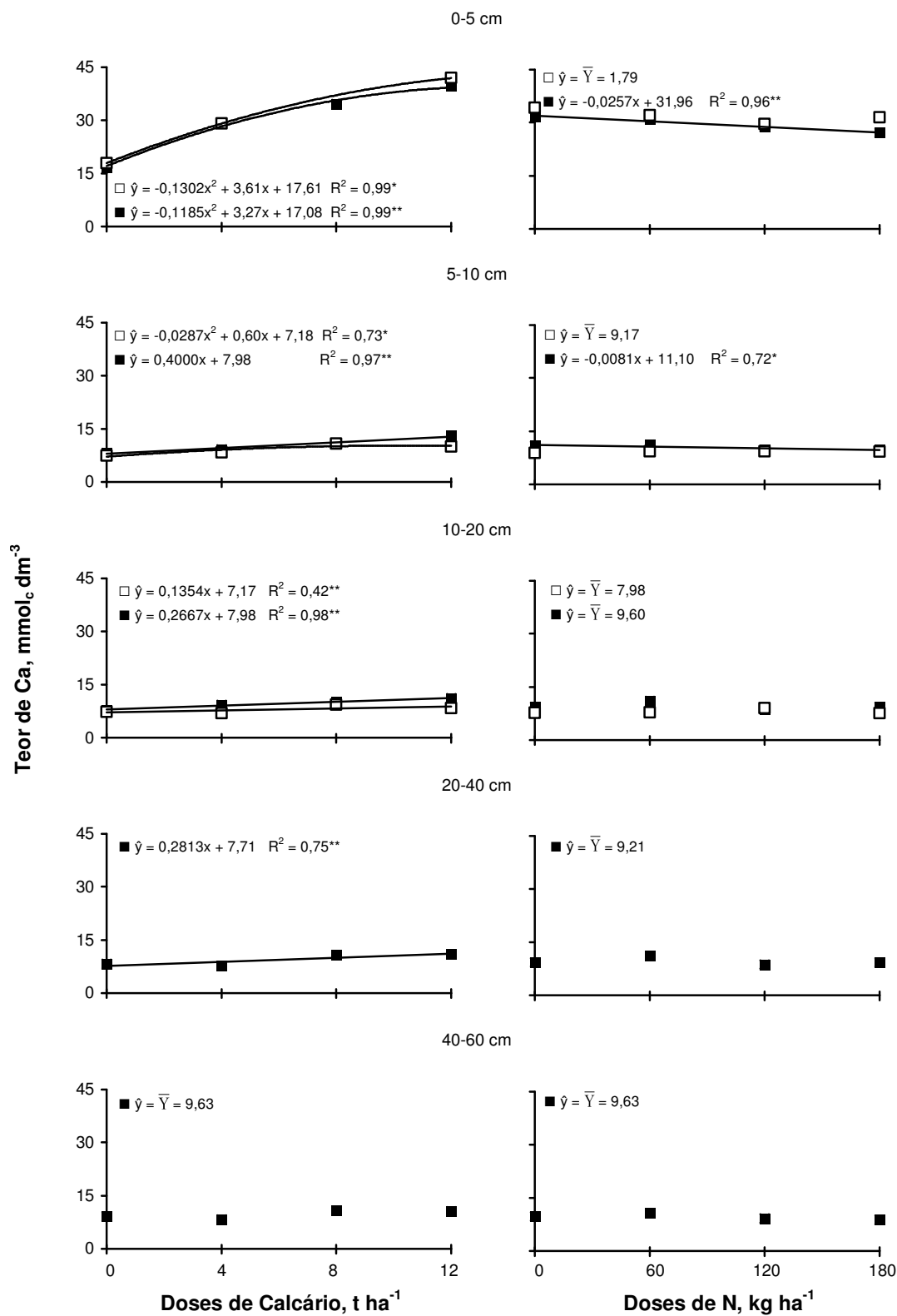


FIGURA 6. Teores de Ca trocável, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

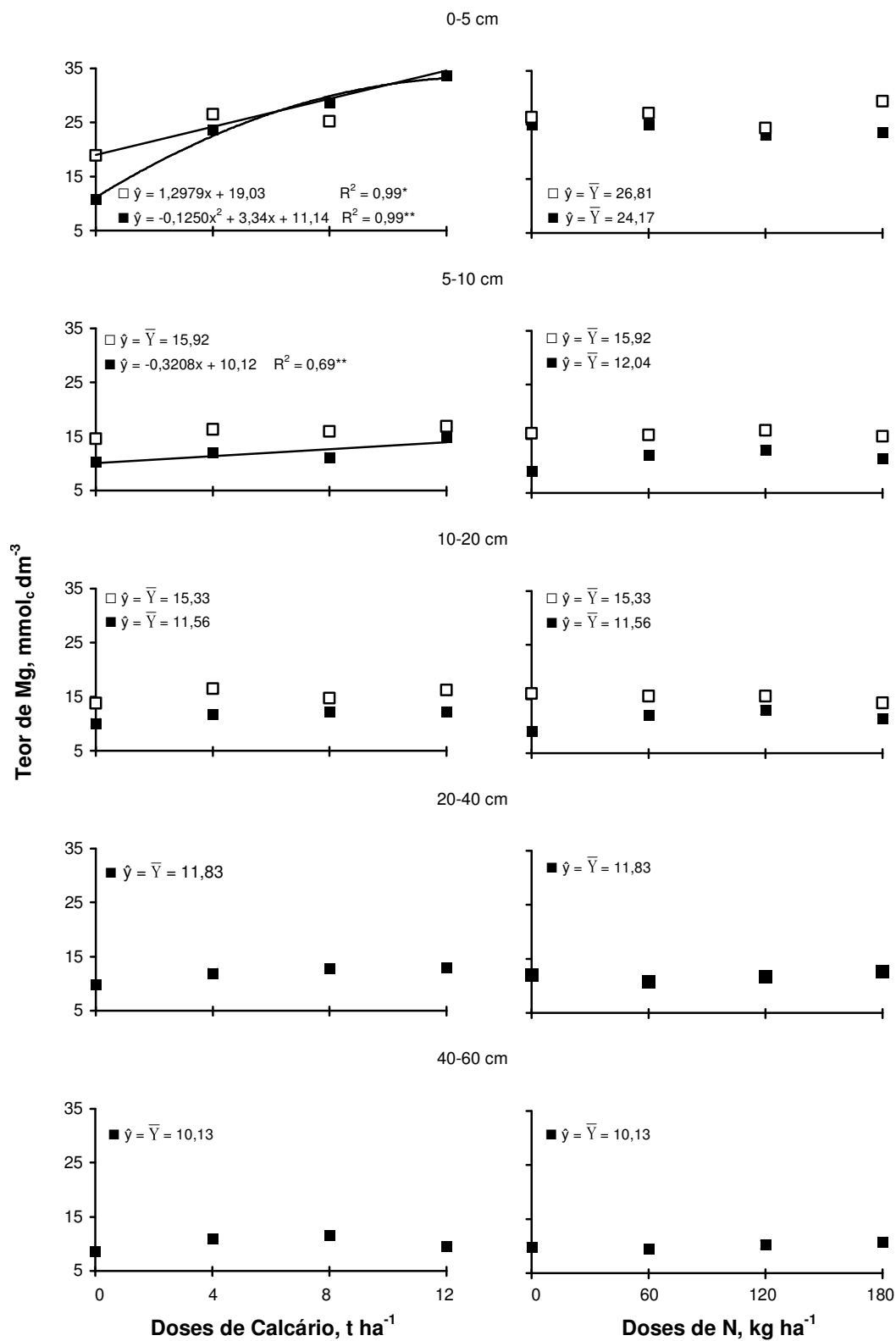


FIGURA 7. Teores de Mg trocável, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

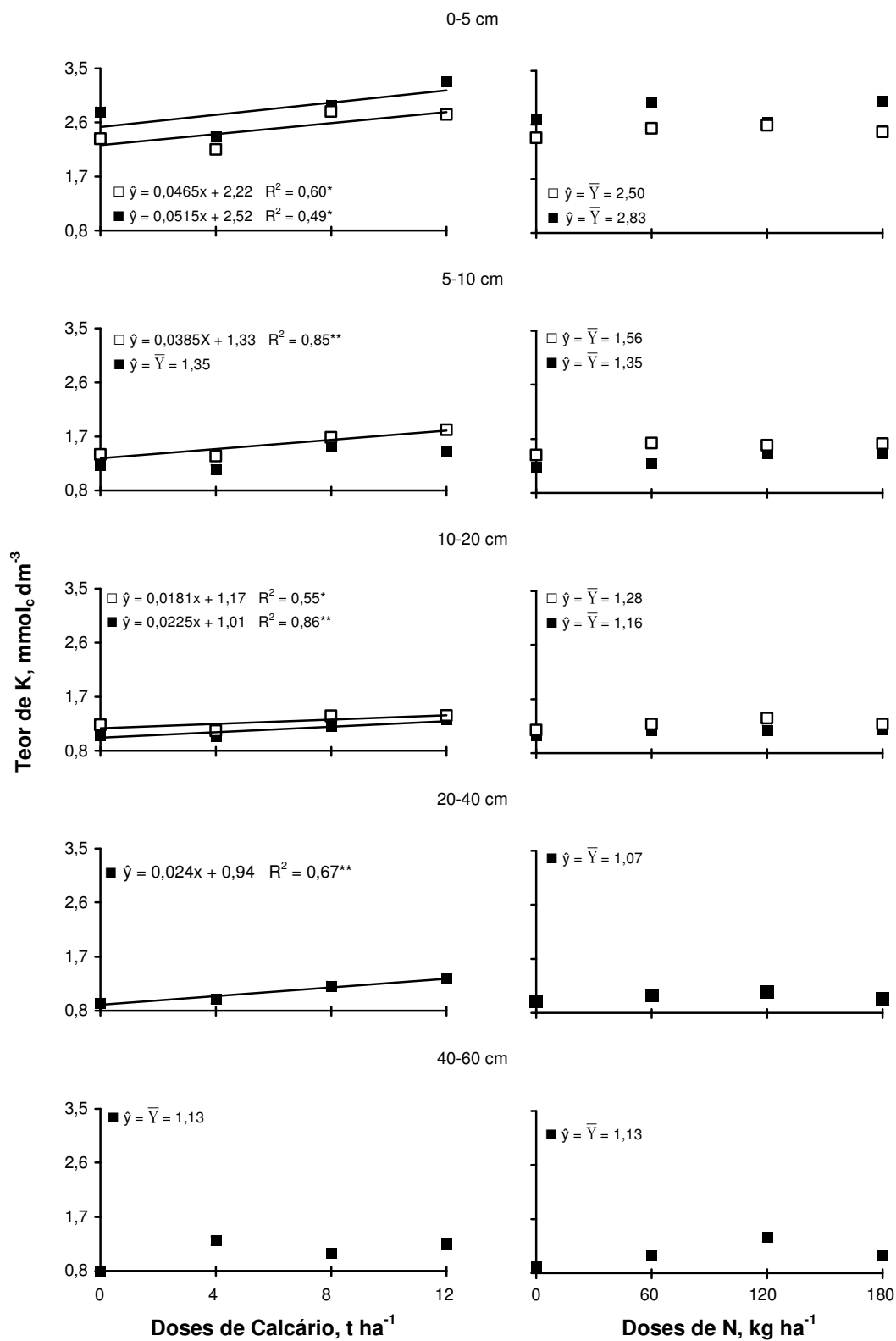


FIGURA 8. Teores de K trocável, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

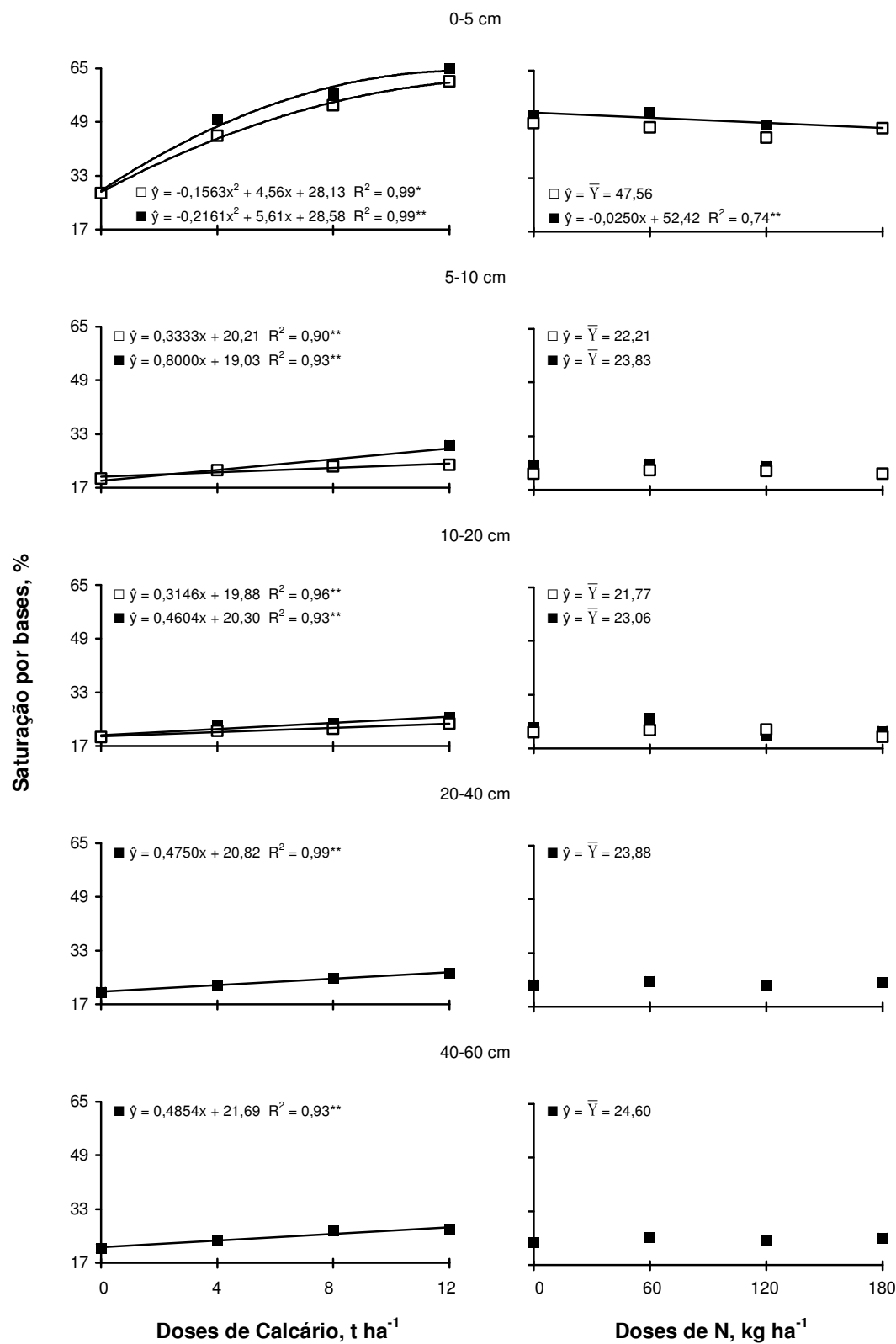


FIGURA 9. Saturação por bases, para diferentes profundidades do solo, considerando as doses de calcário na superfície e as doses de nitrogênio em cobertura na aveia. (□) primeira amostragem; (■) segunda amostragem. * e **: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$, respectivamente.

melhoria das condições de acidez, por meio da calagem na superfície em SPD, também foram observados em outros trabalhos realizados na região dos Campos Gerais no Paraná.

Em condições semelhantes às do presente trabalho, Oliveira & Pavan (1996) observaram elevação no pH e nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , e redução nos teores de Al^{3+} , até a profundidade de 20 cm, após oito meses da realização da calagem na superfície. Caires et al. (2002a) relataram que a reaplicação de 3 t ha^{-1} de calcário na superfície aumentou significativamente o pH e a saturação por bases até 20 cm de profundidade, após nove meses. Embora os resultados de Oliveira & Pavan (1996) e de Caires et al. (2002a) tenham sido satisfatórios, considerando que a calagem foi realizada na superfície, os resultados deste trabalho mostraram efeitos ainda mais rápidos, pois aos 110 dias após a aplicação superficial de calcário já haviam ocorridos efeitos significativos sobre o Ca trocável (Figura 6) e a saturação por bases até a profundidade de 20 cm (Figura 9). Após 11 meses da calagem na superfície, os efeitos sobre esses atributos foram significativos em profundidades do solo ainda maiores.

Considerando a baixa solubilidade do calcário, a magnitude dos efeitos da calagem superficial nos atributos químicos do solo pode variar de acordo com a acidez da camada superficial (Caires et al., 2002a), a dose utilizada, o tempo de reação e a disponibilidade de água (Caires et al., 2005). Na região dos Campos Gerais no Paraná, em SPD consolidado, tem-se verificado que a máxima reação do calcário aplicado na superfície ocorre entre 28 e 30 meses de sua aplicação (Caires et al., 2000), podendo persistir os seus efeitos por períodos superiores a 10 anos (Caires et al., 2005).

Diversos trabalhos têm mostrado influência da dose de calcário na velocidade e na magnitude dos efeitos da calagem no solo (Oliveira & Pavan, 1996; Pöttker & Ben, 1998; Gatiboni et al., 2003; Melo et al., 2003, Caires et al., 2005). Em virtude da elevada acidez e da baixa saturação por bases do solo estudado no presente trabalho (Tabela 1) foram utilizadas doses de calcário de até 12 t ha^{-1} , o que pode ter favorecido a obtenção de efeitos em camadas mais profundas do solo em prazo de tempo relativamente curto.

De acordo com a hipótese levantada na literatura de que a lixiviação de NO_3^- pode ser um importante mecanismo para a obtenção de efeitos no subsolo mediante a calagem na superfície no SPD (Pearson et al., 1962; Weir, 1974; Adams, 1981; Cahn et al., 1993; Sumner, 1995), esperava-se que as doses de N acelerassem a movimentação das bases no perfil do solo acentuando os efeitos da calagem. Todavia, apesar da redução dos teores de Ca^{2+} (Figura 6) e da saturação por bases (Figura 9) na camada superficial do solo, mostrando que o N favoreceu a lixiviação de Ca^{2+} , não houve contribuição da adubação nitrogenada para a melhoria das condições de acidez do subsolo, pois não foi observada nenhuma correlação significativa entre as melhorias obtidas nos atributos químicos do solo e as doses N ou seus teores no solo.

Salienta-se que não houve condição climática favorável para o adequado desenvolvimento da cultura da aveia. Conforme destaca Sumner (1995), para a obtenção de melhorias no subsolo mediante a lixiviação de bases ligadas ao NO_3^- , a absorção do ânion no subsolo é uma condição indispensável. Devido ao severo déficit hídrico ocorrido durante o ciclo da aveia, o crescimento do sistema radicular das plantas, assim como observado para a parte aérea, possivelmente foi prejudicado, principalmente porque em condições de seca a toxicidade do Al^{3+} no SPD é mais acentuada (Corrêa et al. 2004). Portanto, é bem provável que não tenha ocorrido absorção significativa de NO_3^- no subsolo pela cultura da aveia.

Contudo, os efeitos da calagem foram significativos no subsolo, independentemente da lixiviação do ânion NO_3^- . Esses resultados sugerem que a eficiência da aplicação superficial de calcário em SPD, particularmente na correção da acidez do subsolo, não estaria relacionada com a lixiviação do NO_3^- , conforme tem sido pressuposto na literatura.

A eficiência do N em movimentar bases no solo foi comprovada por Weir (1974). Trabalhando num solo cultivado com citros observou-se aumento nos teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ e elevação no pH até 30 cm de profundidade com a utilização de uréia após a calagem superficial. Entretanto, o autor destaca que existe diferença entre fontes nitrogenadas quanto à sua eficiência em movimentar bases e melhorar o subsolo. Nesse caso foi observada maior eficiência da uréia

comparada com o sulfato de amônio e o nitrato de cálcio. Os resultados de Weir (1974) contrastam com os resultados de Pearson et al. (1962), os quais observaram menor lixiviação de bases com a uréia comparada com outras fontes. Intensa lixiviação de Ca^{2+} e Mg^{2+} pela uréia também foi demonstrada por Cahn et al. (1993), com perdas de Ca^{2+} e Mg^{2+} , na camada de 0-30 cm, equivalentes a 2500 kg ha^{-1} de CaCO_3 , 16 meses após a aplicação de calcário e nitrogênio. A maior parte desse efeito foi atribuída à lixiviação de NO_3^- . Salienta-se que a média anual de precipitação pluvial da região onde foi realizado esse estudo era de 2461 mm.

De acordo com a figura 6, foram lixiviados com a maior dose de N (180 kg ha^{-1}), 4,63 e $1,45 \text{ mmol dm}^{-3}$ de Ca^{+2} nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente. Essa lixiviação de Ca^{2+} equivale a uma perda da ordem de 121 kg ha^{-1} de Ca^{2+} ou 302 kg ha^{-1} CaCO_3 até a profundidade de 10 cm.

A redução nos teores de Ca^{2+} está possivelmente relacionada ao NO_3^- lixiviado para profundidades maiores que 60 cm. Após a colheita do milho verificou-se que, a partir do N aplicado, considerando a maior dose (180 kg ha^{-1} de N), 30,7% permanecia no solo na forma mineral até 60 cm (Figura 2), 2,3% havia sido absorvido pela aveia ($\hat{y} = 0,023x + 24,72$), 12,9% havia sido absorvido pela cultura do milho ($\hat{y} = -0,0017x^2 + 0,4347x + 181,73$) e 8,9% havia sido imobilizado na camada de 0-5 cm pela biomassa microbiana ($\hat{y} = -0,031x^2 + 5,90x + 3431$), totalizando 54,8%. Portanto, 45,2% do N aplicado, na maior dose, havia sido perdido, o que corresponde a $81,4 \text{ kg ha}^{-1}$. Formando par iônico somente com o Ca^{2+} , $81,4 \text{ kg}$ de N-NO_3^- consumiriam o equivalente a 116 kg de Ca^{2+} , muito próximo das perdas observadas neste trabalho (121 kg). Esses resultados indicam que houve lixiviação significativa de NO_3^- para o subsolo e que esta lixiviação ocorreu basicamente pela formação de pares iônicos entre o NO_3^- e o Ca^{2+} .

Conforme já demonstrado na literatura (Weir, 1974; Cahn et al., 1993; Ridley et al., 2001) sob condições de boa precipitação pluvial, em solos bem drenados, a lixiviação do NO_3^- é rápida e arrasta equivalentes quantidades de cátions, preferencialmente Ca^{2+} . Na ausência de

rápida absorção do NO_3^- no subsolo pelas raízes das plantas, o par iônico é perdido para maiores profundidades.

Na maior dose de calagem houve aumento de 5,8% na saturação por bases da camada de 40-60 cm (Figura 9), o que corresponde a $5,15 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de bases. Para promover esta elevação a partir de bases carregadas pelo NO_3^- , seriam necessários que aproximadamente 144 kg ha^{-1} de N fossem lixiviados para essa camada. É provável, portanto, que outros mecanismos tenham contribuído para esses efeitos.

A liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (oxálico, cítrico, tartárico, málico, transaconítico, fumárico, etc.) a partir dos resíduos vegetais deixados sobre a superfície do solo favorece a formação de complexos hidrossolúveis com carga nula ou negativa passíveis de serem lixiviados para o subsolo. No entanto, esses efeitos são altamente dependentes da espécie vegetal cultivada, sendo o resíduo de aveia um dos mais eficientes, enquanto que o resíduo do trigo não apresenta efeito sobre a mobilidade de cátions no perfil do solo (Miyazawa et al., 2002).

A movimentação de bases no perfil do solo pela ação de ácidos orgânicos depende também da constante de estabilidade (pK) do complexo formado. No caso do Ca^{2+} , quando o pK é baixo, este lixivia na forma catiônica movimentando-se muito pouco. Por outro lado, quando o pK é muito alto, o Ca^{2+} do complexo é substituído por Al^{3+} , passando o Ca^{2+} a ocupar as cargas do solo antes ocupadas pelo Al^{3+} . Portanto, o transporte de Ca^{2+} na forma de complexo orgânico (CaL) só ocorre quando o pK do complexo (CaL) é maior do que o pK do Ca-solo e menor do que o pK do AIL (Miyazawa et al., 2000).

Esses efeitos têm sido comprovados em estudos de laboratório mediante a adição de elevadas quantidades de extratos vegetais em amostras de solo deformadas (Miyazawa et al., 1993; Franchini et al., 1999). Entretanto, Amaral et al. (2004a) demonstraram, em amostras de solo indeformadas, que a adição de até 10 t ha^{-1} de resíduos de aveia preta, ervilhaca comum e nabo forrageiro não alterou a acidez do subsolo, ficando seus efeitos restritos à camada

superficial (0-2,5 cm). Além da ausência de efeitos na química do solo, não foram identificados ácidos orgânicos nos solos que receberam os resíduos vegetais. Na solução de solos cultivados no estado do Paraná, Myazawa et al. (1992) encontraram concentração total de ácidos succínico, aconítico, iso-butílico e butílico inferior a $500 \mu\text{mol L}^{-1}$. Uma explicação para a pequena quantidade de ácidos orgânicos encontrada no SPD é que as frações hidrossolúveis dos resíduos vegetais no solo são drasticamente afetadas pelos processos de decomposição microbiana (Franchini et al., 1999).

Contudo, considerando a pequena produção de matéria seca da aveia ($1,15 \text{ t ha}^{-1}$) obtida neste trabalho, é provável que a contribuição dos ácidos orgânicos para a movimentação das bases no perfil do solo tenha sido praticamente desprezível.

A presença de uma contínua rede de canais no SPD, pela ação de microorganismos, da meso e macrofauna e pela decomposição de raízes pode contribuir para o aparecimento de efeitos da calagem superficial no subsolo (Pavan, 1994). Esse efeito foi verificado por Amaral et al. (2004b) em período de tempo relativamente curto. Com a aplicação de calcário na superfície do solo, esses autores obtiveram aumento no pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- e condutividade elétrica da solução percolada através de uma coluna de solo de 20 cm, sendo os maiores efeitos obtidos após a primeira adição de água (35 mm). Após 28 dias os autores observaram que aproximadamente 10% das partículas aplicadas na superfície estavam presentes na solução percolada. O deslocamento vertical de partículas do calcário ocorreu pelo movimento descendente da água por meio de canais e espaços existentes no solo. Embora tenham sido utilizadas apenas as partículas mais finas do calcário (0,105-0,053 mm), pode-se concluir que há transporte rápido de partículas finas do corretivo, da superfície para o subsolo, pela água que percola no solo.

Cabe destacar que o solo onde foi realizado o presente estudo é manejado no SPD há 26 anos. Este longo período de cultivo em sistema sem preparo provavelmente contribuiu para melhor agregação do solo e formação de uma intensa rede de canais (Hendrix et al., 1986), favorecendo a movimentação de partículas do corretivo da superfície para o subsolo.

Outra hipótese que pode explicar a rápida movimentação de bases para a subsolo após a calagem superficial tem relação com a presença do ânion HCO_3^- . Originado a partir da dissolução do calcário, em condições de acidez o HCO_3^- é muito instável decompondo-se em CO_2 e H_2O . Todavia, com a calagem na superfície o pH dessa camada eleva-se rapidamente (Figura 3), favorecendo a migração do HCO_3^- acompanhado por Ca^{2+} e Mg^{2+} , conforme proposto por Oliveira & Pavan (1996). Este mecanismo também pode ter contribuído significativamente para os efeitos observados no presente trabalho.

Além de não contribuir para a melhoria do subsolo, o nitrato de amônio promoveu acidificação do solo (Figura 5), resultado esperado em função da liberação de íons de H^+ nos processos de nitrificação ($\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$) (Pavan, 1995). A absorção de N na forma amoniacal também pode favorecer a acidificação do solo pelo acionamento de uma bomba iônica de extrusão de H^+ pelas plantas para manter o equilíbrio eletroquímico nas células (Raven & Smith 1973 citados por Fernandes & Rossiello, 1979).

Embora a aplicação de nitrato de amônio não tenha ocasionado alteração significativa na acidez potencial nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, a análise média até a profundidade de 20 cm, realizada após a colheita do milho, mostrou elevação desse atributo ($\hat{y}$, em $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) com a adubação nitrogenada (x , em kg ha^{-1}), da ordem de $0,031 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para cada kg de N aplicado ($\hat{y} = 0,031x + 73,63$; $P < 0,05$; $R^2 = 0,76$). Considerando a reação ocorrida na camada de solo de 0-20 cm com a aplicação superficial de calcário, redução equivalente a $0,031 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ na acidez potencial ($\hat{y}$, em $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) seria obtida com a dose de calcário (x , em t ha^{-1}) de $0,026 \text{ t ha}^{-1}$ ($\hat{y} = -1,186x + 77,05$; $P < 0,01$; $R^2 = 0,93$). Portanto, a neutralização da acidez gerada, na camada de 0-20 cm, com a maior dose de N aplicada (180 kg ha^{-1}), seria obtida com a aplicação de $4,68 \text{ t ha}^{-1}$ calcário. Ressalta-se que nessa amostragem, realizada 11 meses após a aplicação, o calcário na superfície não havia reagido completamente (Caires et al., 2000), devendo apresentar maior eficiência com maior tempo de reação. De qualquer forma, é bastante clara a importância da aplicação de calcário para combater a acidez originada pela adubação nitrogenada no SPD.

Chama atenção a acentuada elevação da acidez potencial até 20 cm pelo nitrato de amônio. Na dose de 180 kg ha^{-1} de N, houve elevação da acidez potencial, nessa camada, da ordem de $5,58 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Raij et al. (1988), trabalhando em vasos, observaram que o nitrato de amônio provocou apenas leve acidificação no solo. Utilizando dose equivalente a 200 kg ha^{-1} de N, os autores observaram que os nitratos de cálcio e de magnésio reduziram a acidez potencial em 6,3 e 6,6 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, enquanto que o sulfato e o nitrato de amônio promoveram elevação da acidez potencial em 7,1 e 0,8 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente. Verificaram também que o N foi absorvido pelas plantas de sorgo na forma nítrica nos tratamentos com nitrato de cálcio e de magnésio, na forma amoniacal no tratamento com sulfato de amônio e metade na forma nítrica e metade na forma amoniacal no tratamento com nitrato de amônio, considerando a nitrificação desprezível. Nesse caso, os efeitos sobre a acidez do solo foram atribuídos aos processos de absorção alcalina (maior absorção de ânions) e absorção acídica (maior absorção de cátions). Esses autores concluíram que 40% dos efeitos sobre a acidez potencial estavam relacionados ao Al^{3+} , o que concorda com os resultados obtidos no presente estudo, pois na camada de 0-20 cm, um kg de N (x) elevou a acidez potencial ($\hat{y}$) em $0,031 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($\hat{y} = 0,031x + 73,63$; $P < 0,05$; $R = 0,76$) e a concentração de Al^{3+} trocável ($\hat{y}$) em $0,013 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($\hat{y} = 0,013x + 10,00$; $P < 0,01$; $R^2 = 0,95$), o que equivale a 42% dos efeitos ocorridos sobre a acidez potencial.

4.3 Atributos de crescimento radicular do milho

Os atributos de crescimento de raízes de milho não foram influenciados significativamente pelos tratamentos de calagem e de N, nas quatro profundidades estudadas (Tabela 9). Também não houve correlação entre as melhorias nos atributos químicos da fertilidade do solo relacionados com a acidez e a densidade de comprimento e a superfície radicular. Contudo, observou-se correlação significativa ($P < 0,05$) entre os teores de Al^{3+} no solo e o raio médio das raízes de milho ($r = 0,53$). Esses resultados mostram que teores da ordem

de 12 mmol_c dm⁻³ de Al³⁺ provocaram engrossamento das raízes, mas, sem limitar o seu crescimento. Esse efeito concorda com os resultados de Tissi et al. (2004) que obtiveram raízes mais finas com a realização da calagem na superfície em SPD.

TABELA 9. Atributos de crescimento de raízes de milho, nas diferentes profundidades do solo, em função da calagem na superfície e da adubação nitrogenada em cobertura na aveia.

Tratamento	Densidade de raízes	Superfície radicular	Raio médio	Comprimento relativo
	cm cm ⁻³	cm ² cm ⁻³	mm	%
0-10 cm				
Testemunha	4,42	0,87	0,28	59,3
Calcário ⁽¹⁾	5,49	1,12	0,29	56,3
Nitrogênio ⁽²⁾	6,02	1,16	0,27	57,3
Calcário ⁽¹⁾ + Nitrogênio ⁽²⁾	5,42	0,74	0,28	57,5
DMS (P = 0,05)	3,66	0,78	0,07	19,8
C.V. (%)	24,2	28,3	8,2	12,2
10-20 cm				
Testemunha	1,13	0,28	0,32	15,3
Calcário ⁽¹⁾	1,79	0,43	0,34	17,6
Nitrogênio ⁽²⁾	2,43	0,63	0,37	23,2
Calcário ⁽¹⁾ + Nitrogênio ⁽²⁾	1,89	0,45	0,34	20,6
DMS (P = 0,05)	1,57	0,39	0,17	17,5
C.V. (%)	30,6	30,9	17,0	32,2
20-40 cm				
Testemunha	0,69	0,15	0,31	17,4
Calcário ⁽¹⁾	0,77	0,14	0,26	15,2
Nitrogênio ⁽²⁾	0,69	0,15	0,31	13,1
Calcário ⁽¹⁾ + Nitrogênio ⁽²⁾	0,48	0,13	0,27	12,4
DMS (P = 0,05)	0,73	0,15	0,15	12,6
C.V. (%)	39,5	37,6	18,4	30,7
40-60 cm				
Testemunha	0,31	0,04	0,21	8,0
Calcário ⁽¹⁾	0,54	0,08	0,24	10,9
Nitrogênio ⁽²⁾	0,33	0,04	0,20	6,4
Calcário ⁽¹⁾ + Nitrogênio ⁽²⁾	0,46	0,07	0,21	9,5
DMS (P = 0,05)	0,27	0,06	0,13	5,2
C.V. (%)	23,4	33,9	20,9	21,2

⁽¹⁾ 12 t ha⁻¹ de calcário aplicado na superfície; ⁽²⁾ 180 kg ha⁻¹ de N aplicado em cobertura na aveia preta.

Em média, 58% do comprimento do sistema radicular do milho concentrou-se na camada de 0-10 cm, independentemente dos tratamentos. Resultados semelhantes a esses têm sido freqüentemente relatados na literatura (Caires et al., 2002a; 2004; Tissi et al., 2004), independentemente da melhoria das condições de acidez do subsolo pela calagem. Esses resultados sugerem que a distribuição relativa do sistema radicular das plantas, no SPD, reflete o gradiente de fertilidade formado a partir da superfície (Sidiras & Pavan, 1985; Franzluebbers & Hons, 1996; Merten & Mielniczuk, 1991), pois além dos atributos relacionados com a acidez pode haver influência de outros atributos da fertilidade bem como das condições físicas do solo. Caires et al. (2002a) observaram que o crescimento das raízes do milho na camada de 10-20 cm foi prejudicado pela maior compactação dessa camada e que a calagem, por meio do aumento de Ca^{2+} , favoreceu o crescimento das raízes nessa profundidade.

O fato de haver maior concentração de raízes na superfície do solo pode trazer conseqüências para o rendimento das culturas em casos de disponibilidade limitada de água. Embora a capacidade de armazenamento de água no SPD seja maior do que no sistema convencional (Salton & Mielniczuk, 1995), em longos períodos de estiagem, a absorção de água e de nutrientes pelas plantas pode ser prejudicada. Considerando que em menores teores de umidade a toxicidade do Al^{3+} pode acentuar-se, a questão torna-se ainda mais relevante. Nesse caso, os efeitos da calagem superficial podem refletir em maior crescimento radicular com benefícios na nutrição e no rendimento de grãos, conforme observado por Corrêa et al. (2004) na cultura do trigo.

A ausência de efeito da calagem sobre os atributos de crescimento de raízes de milho mostra que teores de Al^{3+} considerados tóxicos para as plantas no sistema convencional não prejudicaram o crescimento das raízes no SPD. Salet et al. (1999) demonstraram que o alumínio livre (Al^{3+}) apresentou menor atividade na solução do solo no SPD em comparação com o sistema convencional e que o valor da atividade do Al^{3+} que conferiu redução média de 10% no crescimento radicular da planta de milho no sistema convencional não afetou o crescimento das

raízes no SPD. Esses efeitos devem-se, principalmente, ao maior teor de carbono orgânico solúvel no SPD, favorecendo a formação de complexos Al-ligantes orgânicos que reduz a atividade do Al^{3+} . Pavan (1983) observou que para uma mesma saturação por alumínio, os solos orgânicos continham um nível mais baixo de Al na solução, provavelmente pela presença de ligações específicas do Al na fração orgânica do solo, resultando em maior adsorção de Al.

Os resultados observados no SPD mostram que esse sistema de cultivo possui certa capacidade de tamponamento dos efeitos tóxicos do Al^{3+} para as plantas. Tal comportamento também é observado nos tratamentos de N, pois a acidificação do solo gerada pelo nitrato de amônio na ausência de calagem, elevou os teores de Al^{3+} de 6,0 para 11,7 e de 10,8 para 12,8 $mmol_c\ dm^{-3}$ nas camadas de 0-5 cm e de 10-20 cm, respectivamente, contudo sem reflexos no crescimento das raízes de milho. Em área de cultivo perene estabelecido, a adição de fertilizantes nitrogenados na zona localizada sob a projeção da copa das árvores promoveu acidificação do solo, prejudicando ou até mesmo impedindo o crescimento de raízes nessa região (Pavan, 1995), efeito que não se tem observado no SPD. Fica evidente que esse sistema de manejo do solo ameniza os efeitos tóxicos do Al^{3+} para as plantas, tornando-se necessárias maiores investigações que identifiquem os principais fatores responsáveis por esses efeitos.

4.4 Concentração de nutrientes nas folhas e nos grãos de milho

A calagem na superfície aumentou a concentração de Mg e reduziu a concentração de Mn nas folhas de milho, sem alterar os teores de N, P, K, Ca, S, Cu, Zn e Fe (Tabela 10). O aumento na concentração de Mg nas folhas esteve relacionado com a maior disponibilidade do nutriente na camada superficial do solo pela calagem, havendo correlação significativa ($P < 0,05$) entre a concentração foliar de Mg e o teor do nutriente na camada de 0-5 cm. Outros trabalhos também têm mostrado que o Mg é o nutriente cuja concentração foliar no milho mais é afetada pela calagem (Oliveira et al., 1997; Caires et al., 2004). A menor concentração de Mn nas folhas de milho foi decorrente da redução da disponibilidade desse nutriente no solo pela elevação do

TABELA 10. Concentração de nutrientes nas folhas e nos grãos do milho, de acordo com os tratamentos de calcário na superfície e de N aplicado em cobertura na aveia.

Calcário na superfície e de 14 aplicado em cobertura na aveia.										
Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Mn	Fe
	----- kg ha ⁻¹ -----					----- g ha ⁻¹ -----				
Folhas										
Calcário, t ha ⁻¹										
0	36,9	3,6	22,3	5,3	4,7	2,0	29,8	40,8	50,8	164,4
4	36,1	3,3	21,1	5,4	5,1	2,0	28,3	42,9	49,0	151,3
8	37,9	3,5	22,0	6,0	5,2	2,1	29,6	39,8	40,7	176,8
12	36,6	3,3	21,5	5,3	5,2	2,2	26,2	38,9	37,5	179,8
Efeito	ns	ns	ns	ns	Q*	ns	ns	ns	L**	ns
C.V. (%)	7,0	13,0	7,4	14,2	6,9	15,8	30,4	16,7	30,6	22,1
Nitrogênio, kg ha ⁻¹										
0	36,0	3,4	22,1	5,4	5,0	2,0	30,7	39,1	38,2	167,2
60	36,9	3,3	22,1	6,0	5,2	2,2	29,7	42,6	42,3	158,6
120	36,4	3,5	21,8	5,4	5,2	2,1	25,2	40,7	43,2	173,2
180	37,4	3,5	21,0	5,5	5,0	2,1	28,4	39,8	54,3	173,3
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	L**	ns
C.V. (%)	5,1	12,5	7,0	10,3	6,9	15,9	28,3	16,4	23,0	13,8
Grãos										
Calcário, t ha ⁻¹										
0	13,51	3,29	3,03	0,06	1,09	0,80	2,00	18,2	5,32	13,0
4	13,96	3,38	2,99	0,06	1,12	0,82	1,94	18,2	5,31	12,8
8	13,42	3,26	2,89	0,06	1,14	0,93	1,68	18,0	5,38	12,5
12	13,52	3,01	2,73	0,05	0,98	0,95	2,27	15,1	4,74	11,1
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L**	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	9,1	37,8	26,7	36,4	37,3	12,6	30,9	33,0	33,3	36,6
Nitrogênio, kg ha ⁻¹										
0	13,01	3,16	2,90	0,05	1,05	0,88	1,85	15,9	4,80	12,2
60	13,51	2,88	2,70	0,05	0,93	0,87	1,68	16,1	4,55	11,4
120	13,67	3,06	2,75	0,06	1,04	0,89	1,85	17,4	5,02	12,1
180	14,70	3,85	3,30	0,06	1,31	0,87	2,27	18,1	6,36	13,8
Efeito	L**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	L*	ns
C.V. (%)	9,3	41,1	29,1	39,9	41,7	12,5	30,5	38,5	37,7	42,7

L = efeito linear por regressão polinomial; Q = efeito quadrático por regressão polinomial. *, ** e ns: significativos a $P < 0,05$ e $P < 0,01$ e não significativo, respectivamente.

pH com a calagem. Apesar da redução nos teores foliares de Mn com a calagem, os teores ficaram dentro da faixa considerada adequada para a cultura do milho (Malavolta et al., 1997),

não tendo sido verificado qualquer sintoma de deficiência desse nutriente. Menor concentração foliar de Mn pela calagem na superfície em SPD também tem sido observada na cultura da soja (Caires et al., 2000; 2003) e do trigo (Corrêa et al., 2004).

A adubação nitrogenada não afetou a concentração foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu e Fe, tendo ocorrido apenas aumento na concentração de Mn nas folhas do milho com as doses de N (Tabela 10). Esse efeito pode estar relacionado com a acidificação proporcionada pela adubação nitrogenada, seja devida aos processos de nitrificação ou pela absorção do íon amônio (Ferreira et al., 2001).

Todos os nutrientes analisados apresentaram teores que ficaram dentro das faixas consideradas adequadas para a cultura do milho (Malavolta et al., 1997), independentemente dos tratamentos de calagem e de N. Esses resultados confirmam o bom estado nutricional da cultura do milho no SPD, mesmo em condições de elevada acidez e baixa saturação por bases.

A concentração de nutrientes nos grãos de milho obtida nesse trabalho ficou próxima dos valores observados por Ferreira et al. (2001), não havendo efeito da calagem na superfície sobre a concentração de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn e Fe (Tabela 10). Houve, entretanto, pequeno incremento na concentração de S nos grãos de milho com a calagem. Apesar de não ter aumentado a concentração de N nas folhas, as doses de N aumentaram a concentração desse nutriente nos grãos, mostrando efeito residual do N aplicado na aveia, para o milho. Houve também aumento na concentração de Mn nos grãos pelos tratamentos de N, resultado que reflete a maior disponibilidade desse nutriente no solo pela acidificação gerada pelo nitrato de amônio. Efeito semelhante foi observado por Feil et al. (2005).

Caires et al. (2002a) destacam os efeitos da calagem sobre o equilíbrio catiônico nas folhas do milho. Os autores observaram que a calagem promoveu desequilíbrios nutricionais de cátions, principalmente entre Mg e K, contudo sem causar consequências no rendimento de grãos. No presente trabalho, as doses de calcário reduziram de maneira quadrática a percentagem de K ($R^2 = 0,98$; $P < 0,01$) e aumentaram, também de maneira quadrática, a percentagem de Mg

($R^2 = 0,55$; $P < 0,05$) no equilíbrio catiônico nas folhas de milho. A relação catiônica nas folhas do milho foi de 47% de K, 21% de Ca e 32% de Mg na ausência de calagem e de 43% de K, 22% de Ca e 35% de Mg na maior dose de calcário. Esses resultados mostram o antagonismo entre Mg e K também observado por Caires et al. (2002a).

Considerando que a relação nutricional ótima para o milho corresponde a equilíbrios entre 60-28-12 e 68-22-10 (K-Ca-Mg, em %) no tecido foliar (Loué 1963, citado por Caires et al., 2002a), conclui-se que houve desequilíbrio catiônico, principalmente, devido à alta concentração de Mg em relação à de Ca e K.

A baixa relação Ca/Mg nas folhas pode ser reflexo da estreita relação entre esses dois nutrientes no solo. Na maior dose de calcário, a saturação por Ca e Mg na CTC a pH 7,0 foi de 34 e 28%, respectivamente, para a profundidade de 0-5 cm. Caires et al. (2004) mostraram aumento no rendimento relativo do milho com a elevação da saturação por Ca na CTC a pH 7,0 até 56%, enquanto o efeito da elevação da saturação por Mg na CTC a pH 7,0 foi positivo apenas quando esta era menor que 16%. Portanto, a baixa saturação por Ca e a elevada saturação por Mg na CTC a pH 7,0 deve ter favorecido a absorção de Mg em detrimento da absorção de Ca e K.

4.5 Produção de matéria seca, absorção e exportação de nutrientes pela cultura do milho

A produção de matéria seca pela parte aérea do milho na maturidade fisiológica da cultura não foi alterada pelos tratamentos de calagem na superfície ou de N aplicado na aveia. A massa seca produzida foi de 19545, 19626, 19651 e 19605 kg ha⁻¹, respectivamente para as doses 0, 4, 8 e 12 t ha⁻¹ de calcário, e de 18624, 20469, 19159 e 20126 kg ha⁻¹, respectivamente para as doses 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N.

Apesar dos efeitos da calagem na melhoria das condições de acidez e no aumento da saturação por bases no solo, a aplicação de calcário não influenciou na absorção de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn e Fe pelas plantas de milho (Tabela 11). O S foi o único nutriente cuja absorção pelas plantas de milho aumentou com a realização da calagem.

A maior absorção de S pelo milho com a calagem esteve relacionada com a neutralização do Al^{3+} . A correlação entre os teores de Al^{3+} no solo e a absorção de S pelas plantas foi significativa ($P < 0,01$) e negativa nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm ($r = -0,68, -0,58, -0,62$ e $-0,66$, respectivamente). O Al^{3+} pode interferir na absorção do sulfato reduzindo o suprimento de energia para o transportador, aumentando a viscosidade do protoplasma nas células das raízes (Fageria & Carvalho, 1982) e reduzindo a síntese da molécula de proteína transportadora (Jensen & Konig, 1982). Na cultura do sorgo tem se verificado que o Al^{3+} diminui a absorção de sulfato e a redução e, ou assimilação do S à forma orgânica (Bonato et al., 2000).

A maior absorção de enxofre com a calagem também pode ser reflexo da maior mineralização da matéria orgânica disponibilizando maior quantidade de sulfato para as plantas (Silva et al., 1999) ou ainda devido à liberação do sulfato adsorvido, em decorrência da elevação do pH do solo (Caires et al., 1999).

Os tratamentos de N não influenciaram a absorção de P, Ca, Mg, S, Cu, Zn e Fe, e aumentaram a absorção de N, K, Ca e Mn pelas plantas de milho (Tabela 11). Com a maior dose de N na aveia (180 kg ha^{-1}) houve incremento na absorção de N pelo milho da ordem de 18%. Esses resultados mostram que apesar da alta mobilidade do NO_3^- no solo houve efeito residual significativo do N aplicado na aveia para a cultura do milho. Salienta-se, no entanto, que houve pouca precipitação pluvial no período compreendido entre a aplicação do N e a semeadura do milho. Mai et al. (2003) também observaram, em condições regulares de distribuição e intensidade de chuvas, efeito residual do N aplicado no perfilhamento da aveia para a cultura do milho, todavia sendo inferior à aplicação da dose somente na semeadura e na cobertura do milho.

Na ausência de aplicação de N na aveia, a cultura do milho absorveu em média 177 kg ha^{-1} de N. Considerando que foram aplicados somente 120 kg ha^{-1} de N no milho percebe-se que houve aproveitamento do N mineral do solo disponibilizado a partir dos processos de mineralização da matéria orgânica. Contudo, a maior absorção de N nos tratamento de nitrato de

TABELA 11. Absorção⁽¹⁾ e exportação⁽²⁾ de nutrientes pela cultura do milho, de acordo com os tratamentos de calcário na superfície e de nitrogênio aplicado em cobertura na aveia.

Calcário na superfície e de nitrogênio aplicado em cobertura na aveia.										
Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Mn	Fe
	----- kg ha ⁻¹ -----					----- g ha ⁻¹ -----				
	Absorção ⁽¹⁾									
Calcário, t ha ⁻¹										
0	195,8	43,1	165,8	40,9	66,2	14,4	97,9	417,4	931,4	1386,7
4	205,1	47,8	159,3	38,0	67,7	14,7	100,7	407,2	833,8	1207,0
8	197,1	47,3	160,7	39,6	67,9	16,3	109,7	488,9	885,9	1317,8
12	200,6	43,1	158,6	37,6	69,7	16,1	102,1	455,2	829,3	1457,8
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L*	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	16,0	29,7	19,1	30,7	20,1	15,7	27,1	35,3	22,7	27,7
Nitrogênio, kg ha ⁻¹										
0	177,0	40,8	144,6	34,3	62,4	14,3	93,4	433,8	778,6	1183,2
60	215,9	44,5	168,2	44,1	71,5	16,2	101,0	443,8	855,3	1406,8
120	195,3	43,8	157,8	41,5	68,8	15,4	106,6	446,2	906,7	1376,8
180	209,8	52,0	173,8	36,3	68,7	15,6	109,2	444,9	939,9	1427,3
Efeito	Q*	ns	L*	Q*	ns	ns	ns	ns	L*	ns
C.V. (%)	12,7	33,0	17,9	32,3	18,7	15,2	26,4	35,3	21,3	25,4
	Exportação ⁽²⁾									
Calcário, t ha ⁻¹										
0	119,9	28,2	26,3	0,5	9,5	7,2	17,8	156,6	46,0	113,5
4	128,9	30,1	27,6	0,5	10,3	7,7	17,6	166,6	48,8	117,0
8	127,7	31,4	27,6	0,6	9,9	8,8	18,6	172,3	49,2	119,7
12	128,8	28,3	25,5	0,5	9,2	8,9	16,6	141,6	44,8	104,5
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	L**	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	15,3	38,7	28,2	34,4	42,2	14,2	29,0	33,8	33,8	39,2
Nitrogênio, kg ha ⁻¹										
0	116,3	27,8	25,7	0,5	9,3	8,0	15,3	140,1	42,9	109,3
60	135,3	28,8	27,0	0,5	9,4	8,7	16,8	160,6	45,8	114,0
120	121,7	28,1	24,9	0,5	9,5	8,2	17,0	157,4	43,5	108,5
180	132,0	34,1	29,3	0,6	11,7	7,7	20,2	178,1	56,5	122,8
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	13,4	43,2	29,8	39,8	43,3	13,9	34,9	36,8	36,6	43,0

⁽¹⁾ Quantidade total de nutrientes na parte aérea do milho, incluindo espigas e grãos; ⁽²⁾ Exportação de nutrientes pela cultura do milho, considerando apenas a remoção dos grãos. L = efeito linear por regressão polinomial; Q = efeito quadrático por regressão polinomial. *, ** e ns: significativos a P < 0,05 e P < 0,01 e não significativo, respectivamente.

amônio permitem inferir que a dose de 120 kg ha⁻¹ de N, tradicionalmente utilizada na cultura do milho, não foi suficiente para suprir a demanda da cultura.

Assim como observado na aveia, também houve maior absorção de K pelas plantas de milho com a aplicação do N, efeito que também deve estar relacionado com a maior absorção de NO₃⁻, pois o K está envolvido nos processos de transporte desse ânion da raiz para a parte aérea das plantas (Silveira & Crocomo, 1989). A maior absorção de cátions (K e Ca) nos tratamentos de adubação nitrogenada é um indicativo de que a maior parte do N absorvido pela cultura do milho ocorreu na forma nítrica. Nesse caso o aumento na absorção de cátions ocorre para manter o equilíbrio iônico nos tecidos da planta (Primavesi et al., 2005). Na cultura do trigo foi verificado por Cox & Reisenauer (1973) maior absorção de cátions quando o N foi fornecido na forma nítrica, porém, quando o N foi fornecido na forma amoniacal houve redução na absorção de Ca e Mg.

O aumento da disponibilidade de Mn no solo por causa da acidez gerada pelo nitrato de amônio refletiu-se em maior absorção desse nutriente pelas plantas de milho (Tabela 11). Contudo, mesmo na maior dose de N não houve toxidez de Mn para as plantas.

Os tratamentos de calagem e adubação nitrogenada não influenciaram a exportação de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn através dos grãos de milho (Tabela 11). As doses de calcário aumentaram somente a exportação de S em decorrência da maior absorção desse nutriente pela cultura do milho por meio da correção da acidez do solo. Ressalta-se que também houve aumento na concentração de S nos grãos de milho com a calagem (Tabela 10). Embora as doses de nitrato de amônio tenham aumentado a concentração de N e Mn nos grãos, não houve efeito significativo sobre a exportação desses nutrientes, provavelmente devido ao efeito quadrático das doses de N sobre o rendimento de grãos da cultura (Figura 10).

4.6 Rendimento de grãos da cultura do milho

A produtividade de grãos de milho não foi influenciada pelos tratamentos de calagem, obtendo-se rendimento médio de 8900, 9212, 9455 e 9420 kg ha⁻¹, respectivamente para as doses 0, 4, 8 e 12 t ha⁻¹ de calcário (Figura 10). Esses resultados estão de acordo com outros trabalhos que mostram elevado rendimento de grãos e ausência de efeito da calagem sobre a produtividade de milho cultivado no SPD, mesmo em condições de elevada acidez (Sá, 1999; Caires et al., 2002a; 2005).

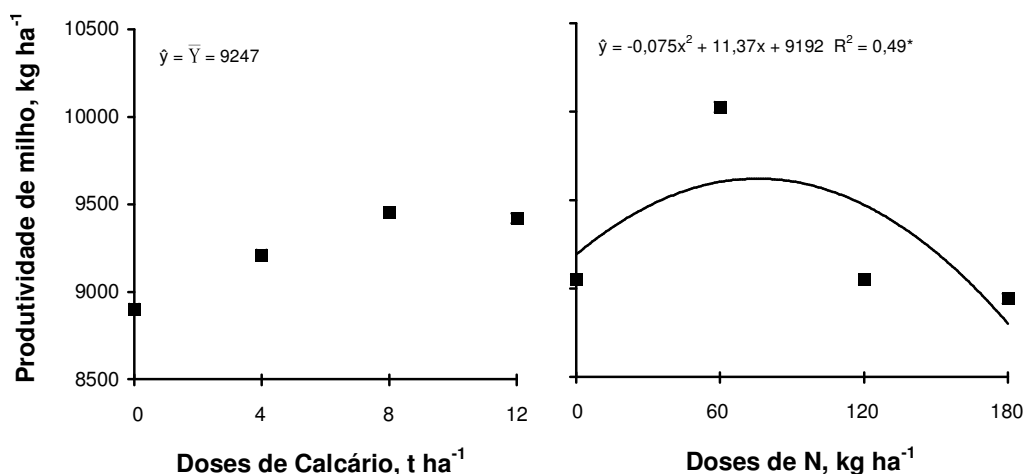


FIGURA 10. Produtividade de milho em função da aplicação de calcário na superfície e de nitrogênio em cobertura na aveia. *: significativo $P < 0,05$.

A ausência de resposta da cultura do milho à calagem confirma a menor toxidez do Al^{3+} para as raízes e o bom estado nutricional da cultura em condições de alta acidez no solo. Deve-se ressaltar, no entanto, que esses resultados foram obtidos em condições de boa disponibilidade hídrica, o que deve ter favorecido os processos de absorção de água e de nutrientes pela cultura. Ao longo dos anos, pequenos acréscimos não significativos no rendimento de grãos das culturas com a calagem na superfície em SPD, de forma semelhante à ocorrida no presente trabalho (Figura 10), tem proporcionado aumento significativo na produção acumulada de grãos com considerável retorno econômico em decorrência do efeito residual (Caires et al., 2000; 2005).

Apesar de condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas no SPD, Caires et al. (2004) mostraram resposta positiva da cultura do milho à calagem, mesmo em solo com ausência de toxidez de Al^{3+} em com teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} considerados adequados para a cultura. A explicação dada para essa resposta foi o aumento da saturação por Ca na CTC a pH 7,0, decorrente da calagem, pois a maior produção de grãos foi observada quando a saturação por Ca na CTC a pH 7,0 era de 56%, na camada de 0-5 cm.

Neste trabalho observou-se, na camada de 0-5 cm, 34% de saturação por Ca e 28% de saturação por Mg na CTC a pH 7,0. Essa estreita relação Ca/Mg no solo favoreceu a absorção de Mg em detrimento da absorção de Ca, fazendo com que a percentagem de Mg no equilíbrio catiônico nas folhas de milho fosse superior à percentagem de Ca, fato que pode ser considerado como desequilíbrio catiônico (Loué 1963, citado por Caires et al., 2002a). A análise de correlação entre a percentagem de Ca no equilíbrio catiônico nas folhas de milho e o rendimento da cultura mostra claramente que a redução no percentual de Ca afeta significativamente a produção de grãos de milho (Figura 11).

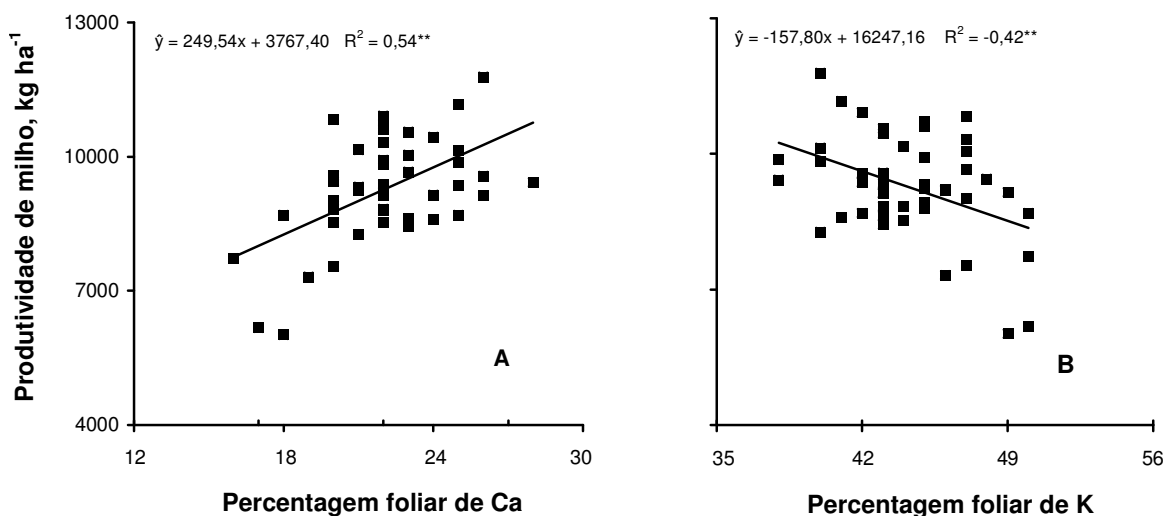


FIGURA 11. Correlações entre a produtividade de milho e o percentual de Ca (A) e K (B) na soma catiônica (Ca+Mg+K) nas folhas de milho. Valores referentes a quatro tratamentos de calagem e quatro tratamentos de N (n = 48). **: significativo $P < 0,01$.

Houve aumento na produção de grãos de milho com a aplicação de nitrato de amônio no perfilhamento da aveia (Figura 10), obtendo-se a máxima eficiência técnica com a dose de 75,8 kg ha⁻¹ de N aplicado na aveia. Somando-se esta dose aos 120 kg ha⁻¹ de N aplicados na cultura do milho (semeadura + cobertura) observa-se que o máximo rendimento de grãos de milho foi obtido com a dose total de 195,8 kg ha⁻¹ de N.

Outros trabalhos também têm mostrado resposta do milho à aplicação de N na aveia, mas essas respostas podem estar associadas à utilização de baixas doses de N na semeadura e na cobertura do milho (Mai et al., 2003).

Bortolini et al. (2001) mostraram aumento no rendimento do milho com a antecipação do N, contudo com apenas 50% de eficiência em comparação à aplicação de parte da dose na semeadura e o restante em cobertura. O rendimento de grãos na dose de 180 kg ha⁻¹ de N em pré-semeadura foi semelhante ao obtido na dose de 90 kg ha⁻¹ aplicado parte na semeadura e o restante em cobertura.

No Canadá tem sido observado que alguns híbridos modernos e de elevado potencial produtivo apresentam maior capacidade de absorção de N durante o enchimento de grãos quando comparados com híbridos contemporâneos e menos produtivos (Ma et al., 1999). Quando há boa disponibilidade de N nessa fase, a maior parte do N dos grãos é obtida a partir do solo havendo menor translocação do N das partes vegetativas para os grãos e atrasando a senescência das plantas (Stay-green) (Weiland & Ta, 1992). Enquanto que em híbridos contemporâneos 49% do N dos grãos é obtido diretamente do solo, em híbridos modernos tem-se observado que o N originado diretamente do solo representa em torno de 64% do N dos grãos (Borrell & Hammer, 2000).

Na cultura do sorgo tem-se obtido correlações positivas entre o número de grãos por unidade de área e a quantidade de N absorvida durante o enchimento de grãos, sugerindo que a demanda de N durante o enchimento de grãos é determinada pelo número de grãos por unidade de área (Borrell & Hammer, 2000). Resultados obtidos no Brasil mostram que os aumentos no

rendimento de grãos de milho com a realização de coberturas nitrogenadas tardias devem-se principalmente ao aumento no peso dos grãos (Silva et al., 2005).

Assim, o cultivo de híbridos com habilidade de absorção de N por períodos mais longos requer estratégias de fertilização que mantenham bons níveis de N no solo, inclusive durante a fase de enchimento dos grãos da cultura. Nesse contexto, a antecipação de parte da adubação nitrogenada no perfilhamento da aveia pode ser benéfica para o milho, contudo não substitui a adubação de base e a de cobertura. Conforme demonstrado por Amado et al. (2003), a liberação do N absorvido pela aveia é muito pequena até o florescimento da cultura do milho. No entanto, a partir dessa fase ocorre mineralização significativa podendo contribuir no fornecimento de N para o milho, especialmente no caso de híbridos com elevada capacidade de absorção de N durante o enchimento de grãos.

Considerando a capacidade de absorção de N em fases adiantadas de desenvolvimento da cultura, a antecipação do N na pré-semeadura do milho, visando a manutenção do N no solo, na forma mineral, pode incorrer em baixos teores do nutriente a partir do florescimento da cultura, refletindo em redução no rendimento de grãos, principalmente em condições de alta precipitação pluvial, conforme tem sido demonstrado na literatura (Basso & Ceretta, 2000; Bortolini et al., 2001; Ceretta et al., 2002).

O aumento no rendimento de grãos com a aplicação do N na aveia (Figura 10) mostra que a dose de 120 kg ha^{-1} N (semeadura + cobertura) não foi suficiente para suprir a demanda da cultura, o que está de acordo com outros trabalhos que mostram respostas do milho a doses superiores a 150 kg ha^{-1} (Fernandes et al., 1999; Sangoi et al., 2001; Costa et al., 2002; Silva et al., 2005).

A resposta da cultura do milho à adubação nitrogenada esteve relacionada com a absorção de N e S (Figura 12). Esses resultados confirmam a importância do adequado manejo da adubação nitrogenada para o suprimento da elevada demanda da cultura por N. Destaca-se também a importância do S na nutrição mineral da cultura do milho no SPD. A maior

concentração de raízes nas camadas superficiais do solo, comumente observada no SPD, pode afetar a absorção do S, especialmente em função de sua baixa disponibilidade nessas camadas (Rheinheimer et al., 2005), o que pode viabilizar respostas das culturas às práticas de manejo que favoreçam sua absorção, conforme observado na cultura do milho (Caires et al. 1999) e do trigo (Caires et al., 2002b) com a aplicação de gesso agrícola.

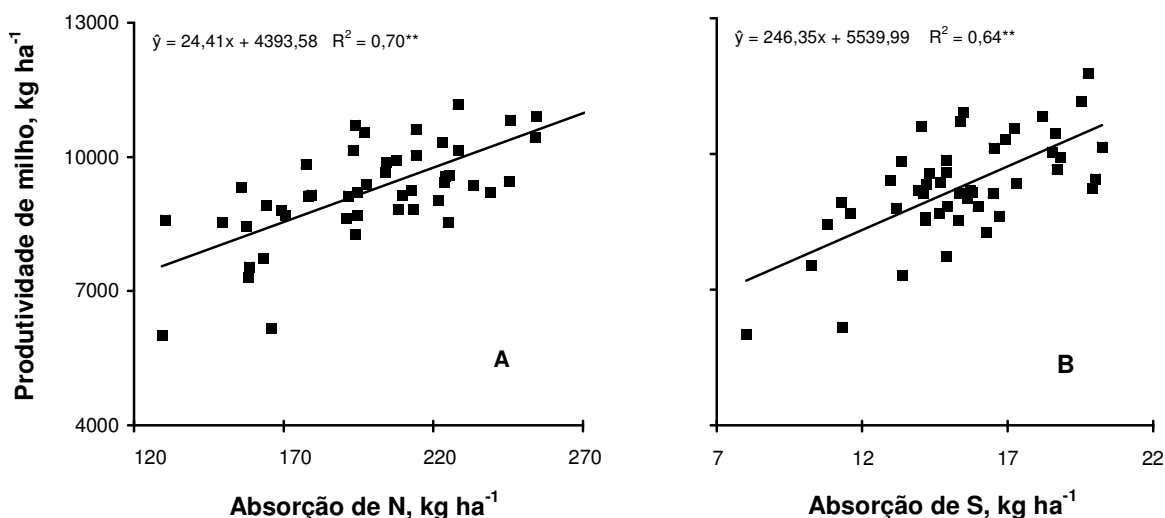


FIGURA 12. Correlações entre a produtividade de milho e a absorção de N (A) e S (B). Valores referentes a quatro tratamentos de calagem e quatro tratamentos de N (n = 48). **: significativo $P < 0,01$.

As doses de N aumentaram linearmente a absorção de K enquanto que o aumento na absorção do Ca foi quadrático (Tabela 11). Esse comportamento pode ter ocasionado a queda de rendimento observada nas maiores doses de N, possivelmente devido à substituição do Ca por K nos tecidos, pois houve correlação positiva entre o rendimento de grãos e a percentagem de Ca na soma catiônica nas folhas do milho, enquanto que a correlação entre o rendimento de grãos e a percentagem de K na soma catiônica foi negativa (Figura 11). Feil et al. (2005) relataram redução nos teores de Ca nos grãos de milho com a aplicação de doses de N.

A menor absorção de Ca nas maiores doses de N pode ter ocorrido para manter a soma de cátions no tecido foliar, que tende a permanecer constante (Viets et al. 1954, citados por

Büll, 1993). Efeito substitutivo de K por Ca e Mg nas folhas de milho foi verificado por Caires et al. (2002a).

4.7 Concentração de óleo e proteína nos grãos de milho

A calagem não teve influência sobre a concentração de óleo e proteína nos grãos de milho, sendo obtidos teores médios de 48,9 e 84,2 g de óleo e proteína, respectivamente, por kg de grãos de milho (Figura 13). Os teores de óleo foram superiores aos teores obtidos por Duarte et al. (2005) para diversos híbridos. Destaca-se, no entanto, que o teor de óleo nos grãos de milho varia de acordo com o híbrido utilizado (Uribelarrea et al., 2004; Duarte et al., 2005) devido a variações na proporção dos grãos constituída pelo embrião. Os teores de proteína também podem ser considerados normais considerando a grande variação entre híbridos observada por Uribelarrea et al. (2004) e os teores observados por Oikeh et al. (1998).

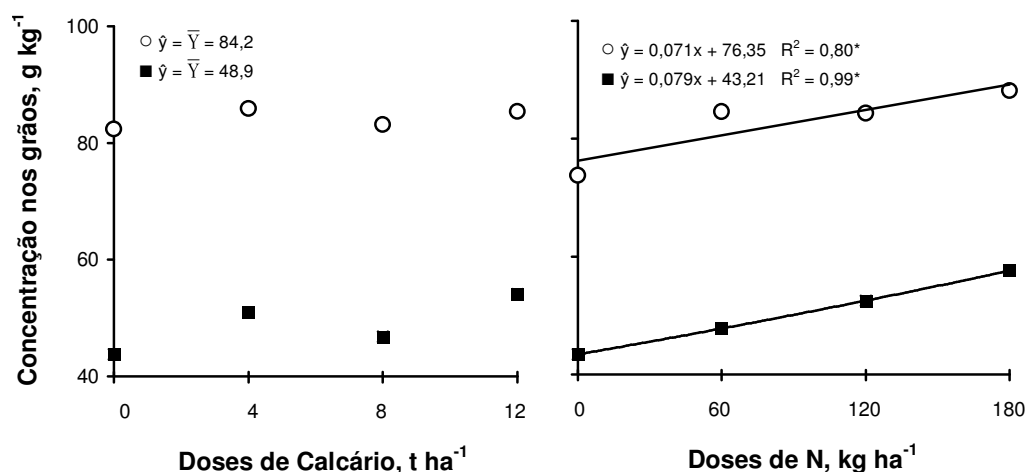


FIGURA 13. Concentração de óleo (■) e proteína (○) nos grãos de milho, em função dos tratamentos de calagem na superfície e de N na aveia. *: significativo $P < 0,05$.

Na cultura da soja, a calagem tem aumentado a concentração de óleo (Mascarenhas et al. 1996; Caires et al., 2003) e de proteína (Mascarenhas et al. 1996). Para o milho não foram encontrados trabalhos na literatura que mostrassem influência da calagem sobre a concentração de óleo e proteína nos grãos da cultura. Neste trabalho, a calagem praticamente não influenciou a

nutrição mineral do milho, o que explica a ausência de efeito sobre a qualidade dos grãos produzidos.

As doses de nitrato de amônio aplicadas na aveia aumentaram a concentração de óleo e proteína nos grãos de milho. O aumento do teor de óleo com a aplicação de N discorda dos resultados encontrados na literatura que mostram ausência de efeito da aplicação de N sobre a concentração de óleo nos grãos de milho (Uribelarrea et al., 2004; Duarte et al., 2005). Esse comportamento tem sido associado ao fato de que o óleo encontra-se no embrião, parte da semente que não é afetada pela aplicação de N (Uribelarrea et al., 2004). Ressalta-se, entretanto, que houve correlação significativa ($P < 0,05$) entre os teores de N e a concentração de óleo nos grãos ($r = 0,57$), efeito semelhante ao obtido por Duarte et al. (2005).

O aumento na concentração de proteína nos grãos reflete a maior absorção de N e os maiores teores desse nutriente nos grãos pela aplicação de N na aveia. Este é um efeito comumente observado quando se faz a adubação nitrogenada, conforme demonstrado em diversos outros trabalhos (Oikeh et al., 1998; Ferreira et al., 2001; Uribelarrea et al., 2004). Cabe destacar que a adubação nitrogenada realizada no perfilhamento da aveia preta aumentou o rendimento (Figura 10) e melhorou a qualidade (Figura 13) dos grãos de milho cultivado após a aveia no SPD.

5. CONCLUSÕES

1. A calagem na superfície em sistema plantio direto apresentou eficiência, em curto prazo, na correção da acidez de camadas superficiais e do subsolo. A adubação nitrogenada elevou os teores de N-Mineral no solo, mas a rápida movimentação de NO_3^- no perfil do solo proporcionou perdas de aproximadamente 45% do N aplicado, após 280 dias. A lixiviação de NO_3^- reduziu os teores de Ca^{2+} trocável nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, sem ocasionar melhoria nas condições químicas do subsolo.

2. A calagem reduziu a concentração de N e a adubação nitrogenada aumentou a concentração de N e K na parte aérea da aveia, mas não houve efeito dos tratamentos na produção de massa seca da parte aérea da aveia em condições de deficiência hídrica.

3. O crescimento radicular do milho não foi influenciado pela aplicação de calcário na superfície e pela adubação nitrogenada na aveia, em solo com elevada acidez e teor de Al^{3+} trocável da ordem de $12 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

4. A calagem aumentou a concentração de Mg e de S nas folhas e nos grãos de milho, respectivamente, e reduziu a concentração de Mn nas folhas. A adubação nitrogenada na aveia aumentou a concentração de N nos grãos e de Mn nas folhas e nos grãos de milho. A calagem

aumentou a absorção de S, enquanto que os tratamentos de N aumentaram a absorção de N, K, Ca e Mn pela cultura do milho.

5. A calagem não influenciou a produção de massa seca da parte aérea e o rendimento de grãos de milho. A adubação nitrogenada na aveia preta não afetou a produção de massa seca, mas aumentou o rendimento de grãos de milho. A produção de grãos de milho correlacionou-se positivamente com a absorção de N e de S e com o percentual de Ca na soma catiônica foliar.

REFERÊNCIAS

ADAMS, F. Alleviating chemical toxicities: liming acid soils. p. 269-301. In: ARKIN, G.F.; TAYLOR, H.M., eds. **Modifying the root environment to reduce crop stress**. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph. MI, 1981.

ADAMS, F.; LUND, Z.F. Effect of chemical activity of soil solution aluminum on cotton root penetration of acid subsoils. **Soil Science**, v. 101, p. 193-198. 1966.

ALLEONI, L.R.F.; ZAMBROSI, F.C.B.; MOREIRA, S.G.; PROCHNOW, L.I.; PAULETTI, V. Liming and electrochemical attributes of an oxisol under no tillage. **Scientia Agrícola**, v. 60, p. 119-123, 2003.

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B.V. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o milho em sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 179-189, 2000.

AMADO, T.J.C.; SANTI, A.; ACOSTA, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta. II – Influência na decomposição de resíduos, liberação de nitrogênio e rendimento de milho sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1085-1096, 2003.

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**, v. 24, p. 115-123, 2004a.

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

ANDRADE, D.S.; COLOZZI-FILHO, A.; PAVAN, M.A.; BALOTA, E.L.; CHAVES, J.C.D. Atividade microbiana em função da calagem em um solo cultivado com cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 191-196, 1995.

ANGHINONI, I. NICOLODI, M. Estratégias de calagem no sistema plantio direto. Reunião Brasileira de Fertilidade do solo e Nutrição de Plantas, 26, **FERTBIO 2004**, Lages, 2004. **Palestras**, CD.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. 8 ed. Washington, 1955. 30p.

BANZATTO, D.A. & KRONKA, S.N. **Experimentação Agrícola**. Jaboticabal: FUNEP, 1989. 247 p.

BASSO, C.J.; CERETTA, C.A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.905-915, 2000.

BLEVINS, R.L.; MURDOCK, L.W.; THOMAS, G.W. Effect of lime application on no-tillage and conventionally tilled corn. **Agronomy Journal**, v. 70, p. 322-326, 1978.

BONATO, C.M.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANA, R.; VENEGAS, V.H.A. Efeito do alumínio sobre a absorção, a partição e a utilização de enxofre em sorgo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.12, p.17-24, 2000.

BORRELL, A.K.; HAMMER, G.L. Nitrogen dynamics and the physiological basis of stay-green in sorghum. **Crop Science**, v. 40, p. 1295-1307, 2000.

BORTOLINI, C.G.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; FORSTHOFER, E.L. Rendimento de grãos de milho cultivado após aveia-preta em resposta a adubação nitrogenada e regime hídrico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 1101-1106, 2001.

BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H., eds. **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba, POTAFÓS, 1993. P.63-145.

CABEZAS, W.A.R.L.; ARRUDA, M.R.; CANTARELLA, H.; PAULETTI, V.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura do milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 215-226, 2005.

CAHN, M.D.; BOULIN, D.R.; CRAVO, M.S.; BOWEN, W.T. Cation and leaching in an Oxisol of the Brazilian Amazon. **Agronomy Journal**, v. 85, p. 334-340, 1993.

CAIRES, E.F. ROSOLEM, C.A. Calagem em genótipos de amendoim. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 17, p. 193-202, 1993.

CAIRES, E.F.; ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A.; BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v.97, p.791-798, 2005.

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

CAIRES, E.F.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1011-1022, 2002a.

CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 275-286, 2003.

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, v. 59, p. 357-364, 2002b.

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v. 60, p. 213-223, 2001.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. **Bragantia**, v. 59, p. 213-220, 2000.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 315-327, 1999.

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**, v. 28, p. 125-136, 2004.

CAMBRI, M.A. **Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto**. 2004, 83 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CANTARELLA, H.; TREVELIN, P.C.O. Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método de destilação a vapor. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, E.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001a. 285p

CANTARELLA, H.; TREVELIN, P.C.O. Determinação de nitrogênio total em solo. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, E.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001b. 285p

CASSIOLATO, M.E.; MEDA, A.R.; PAVAN, M.A.; MIYZAWA, M.; OLIVEIRA, J.C. de. Evaluation of oat extracts on the efficiency of lime in soils. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 43, p. 533-536, 2000.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; DIEKOW, J.; AITA, C.; PAVINATO, P.S.; VIEIRA, F.C.B.; VENDRUSCULO, E.R.O. Nitrogen fertilizer split-application for corn in no-till succession to black oats. **Scientia Agricola**, v. 59, p.549-554, 2002.

CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A.; IGUE, K. Resposta do cafeeiro à calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, p. 573-582, 1984.

CORRÊA, J.C.L.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; CRUZ, F.; CHURKA, S.; CAIRES, E.F. Calagem na superfície para trigo cultivado em sistema plantio direto. Reunião Brasileira de Fertilidade do solo e Nutrição de Plantas, 26, **FERTBIO 2004**, Lages, 2004. **Resumos**, CD.

COSTA, C.; DYWER, L.M.; STEWART, D.W.; SMITH, D.L. Nitrogen effect on kernel yield and yield components of Leafy and non-Leafy maize genotypes. **Crop Science**, v. 42, p. 1556–1563, 2002.

COX, W.J.; REISENAUER, H.M. Growth and ion uptake by wheat supplied nitrogen as nitrate or ammonium, or both. **Plant and Soil**, v.38, p.363-380, 1973.

DEARE, F.M.; AHMAD, N.; FERGUSON, T.U. Downward movement of nitrate and ammonium nitrogen in a flatland ultisol. **Fertilizer Research**, v. 42, p. 175-184, 1995.

DERPSCH, R. The extent of conservation agriculture adoption worldwide: Implications and impact. World Congress on Conservation Agriculture, III, Nairobi, Kenya, 2005. **Proceedings**, 2005.

DUARTE, A.P.; MASON, S.C.; JACKSON, D.S.; KIEHL, J.C. Grain quality of Brazilian maize genotypes as influenced by nitrogen level. **Crop Science**, v. 45, p. 1958-1964, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. 2. ed. Brasília, 1996. 204p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FAGERIA, N.K.; CARVALHO, J.R.P. Influence of aluminum in nutrient solutions on chemical composition in upland rice cultivars. **Plant and Soil**, v. 69, p. 31-44, 1982.

FEIL, B.; MOSER, S.B.; JAMPATONG, S.; STAMP, P. Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization. **Crop Science**, v. 45, p. 516-523, 2005.

FERNANDES, L.A.; NASCENTE, C.M.; SILVA, M.L.N.; FURTINI NETO, A.E.; VASCONCELOS, C.A. Sistemas de preparo do solo e adubação nitrogenada na produtividade do milho em Latossolo Vermelho escuro fase cerrado. **Revista Plantio Direto**, v.51, p.15-16, 1999.

FERNANDES, M.S.; ROSSIELLO, R.O.P. Uso de NH_4^+ e de um inibidor de nitrificação na adubação nitrogenada do milho (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 77-82, 1979.

FERREIRA, A.C.B.; ARAÚJO, G.A.A.; PEREIRA, P.R.G; CARDOSO, A.A. Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 131-138, 2001.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. Dynamics of surface liming in a typic haplorthox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 235-247, 2005.

FLOSS, E.L. Benefícios da biomassa de aveia ao sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, n. 3, p. 25-29, 2000.

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. II. Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species. **Plant and Soil**, v.132, p.261-272, 1991.

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**, v. 23, p. 533-542, 1999.

FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M. Soil-profile distribution of primary and secondary plant-available nutrients under conventional and no tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 39, p. 229-239, 1996.

FREIRE, J.C. Resposta do milho a níveis de água e formas de aplicação de calcário em dois solos originalmente sob cerrado em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.305-308, 1984.

GASCHO, G.J.; PARKER, M.B. Long-term liming effects on coastal plain soils and crops. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 1305-1315, 2001.

GATIBONI, L.C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J.P.C.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, v. 33, p. 283-290, 2003.

GONZALEZ-ERICO, E.; KAMPRATH, E.J.; NADERMAN, G.C.; SOARES, W.V. Effect of Depth of lime incorporation on the growth of corn on na Oxisol of Central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, p. 1155-1158, 1979.

HENDRIX, P.F.; PARMELEE, R.W.; CROSSLEY, D.A.; COLEMAN, D.C.; ODUM, E.P.; GROFFMAN, P.M. Detritus food webs in conventional and no-tillage agroecosystems. **BioScience**, v. 36, p. 374-380, 1986.

HOWARD, D.D.; ESSINGTON, M.E. Effects of surface-applied limestone on the efficiency of urea-containing nitrogen sources for no-till corn. **Agronomy Journal**, v. 90, p. 523-528, 1998.

IAPAR, Médias históricas das estações do IAPAR. http://200.201.27.14/Site/Sma/Estações_IAPAR/Estações_Paraná.htm. Acesso em 21/12/2005.

JENSEN, M.B. KONIG, T. Development of regulation mechanisms of SO_4^{2-} influx in spring wheat roots. **Physiologia Plantarum**, v. 55, p. 459-464, 1982.

JONES, D.L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. **Plant Soil**, v. 205, p. 25-44, 1998.

JONES, D.L.; PRABOWO, A.M.; KOCHIAN, L.V. Aluminum organic acid interactions in acid soils: II. Influence of solid phase sorption on organic acid-Al complexation and Al-rhizotoxicity. **Plant Soil**, v. 182, p. 229-237, 1996.

KIRKBY, E.A.; ARMSTRONG, M.J. Nitrate uptake by root as regulated by nitrate assimilation in the shoot of castor oil plants. **Plant Physiology**, v.65, p.286-290, 1980.

LOUÉ, A. Contribuição para o estudo da nutrição catiônica do milho, principalmente a do potássio. **Fertilité**, v. 20, p. 1-57, 1963.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 175-187, 2004.

MA, B.L.; LIANNE, M.D.; GREGORICH, E.G. Soil nitrogen amendment effects on nitrogen uptake and grain yield of maize. **Agronomy Journal**, v. 91, p. 650-656, 1999.

MAACK, V. **Geografia física do estado do Paraná**. Rio de Janeiro, Livraria José Olympio Ed., 1981, 442p.

MAI, M.E.M.; CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; SILVEIRA, M.J.; PAVINATO, A.; PAVIANTO, S. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia-preta/milho no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 125-131, 2003.

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

MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.; GALLO, P.B.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; AMBROSANO, G.M.B.; CARMELLO, Q.A.C. Efeito da calagem sobre a produtividade de grãos, óleo e proteína em cultivares precoces de soja. **Scientia Agrícola**, v. 53, p. 164-172, 1996.

MELO, J.C.A.; VILLAS BÔAS, R.L.; LIMA, E.V.; CRUSCIOL, C.A.C.; BÜLL, L.T. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 553-561, 2003.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 4.ed. Bern: International Potash Institute, 1987. 655p.

MERTEN, G.H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 369-374, 1991.

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**, v. 45 p.251-256, 2002.

MIYAZAWA, M. PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Resíduos vegetais: influência na química de solos ácidos. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, Ponta Grossa, 2000. **Anais**. Ponta Grossa, Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2000. p. 82-94.

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

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CHIARICE, G.D. Determinação de alumínio em soluções puras contendo ácidos orgânicos e em solo com eletrodo seletivo de fluoreto. **Química Nova**, v. 15, p. 286-290, 1992.

MOSCHLER, W.W.; MARTENS, D.C.; RICH, C.I.; SHEAR, G.H. Comparative lime effects on continuous no-tillage and conventionally tilled corn. **Agronomy Journal**, v. 65, p. 781-783, 1973.

NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C.; MACHADO, J.R. Adubação nitrogenada no perfilhamento da aveia-preta, em duas condições de fertilidade do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1071-1080, 2000.

OGATA, G.; CALDWELL, A.C. Nitrate content of soils and nitrogen content of oat plants as affected by rates of liming. **Agronomy Journal**, v. 52, p. 65-68, 1960.

OIKEH, S.O.; KLING, J.G.; OKORUWA, A.E. Nitrogen Fertilizer management effects on maize grain quality in the West African Moist Savana, **Crop Science**, v. 38, p. 1056-1061, 1998.

OLIVEIRA, E.L.; PARRA, M.S.; COSTA, A. Resposta da cultura do milho, em um Latossolo vermelho-escuro álico, à calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 65-70, 1997.

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

OLSON, R.A. & KURTZ, L.T. Crop nitrogen requirements, utilization, and fertilization. In: STEVENSON, F.J., ed. **Nitrogen in agricultural soils**. Madison, Soil Science of American, 1982. p.567-604.

PAVAN, M.A. Alumínio em solo ácidos do Paraná: relação entre o alumínio não-trocável, trocável e solúvel, com o pH, CTC, porcentagem de saturação de Al e matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 39-46, 1983.

PAVAN, M.A. Efeito da adubação mineral na distribuição do sistema radicular da macieira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 477-480, 1995.

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

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 33-38, 1984.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKY, H.C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D.C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, 1992. 38p. (Circular, 76)

PEARSON, R.W.; ABRUNA, F.; VICENTE-CHANDLER, J. Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico. **Soil Science**, v. 93, p. 77-82, 1962.

PETRERE, C.; ANGHINONI, I. Alterações de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 25, p. 885-895, 2001.

PÖTTKER, D.; BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 675-684, 1998.

PRIMAVESI, A.C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L.A.; CANTARELLA, H.; SILVA, A.G. Absorção de cátions e ânions pelo capim-coastcross adubado com uréia e nitrato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 247-253, 2005.

QIN, R.; STAMP, P.; RICHNER, W. Impact of tillage and banded starter fertilizer on maize root growth in the top 25 centimeters of the soil. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 674-683, 2005.

QUAGGIO, J.A. Reação do solo e seu controle. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, Campinas, 1986. **Anais**. Campinas, Fundação Cargill, 1986. p. 53-89.

QUAGGIO, J.A.; RAMOS, V.J.; BATAGLIA, O.C.; RAIJ, B. van.; SAKAI, M. Calagem para a sucessão batata-tritcale-milho usando calcários com diferentes teores de magnésio. **Bragantia**, v. 44, p. 391-406, 1985.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1991, 343p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; FURLANI, P.R. Efeito, na reação do solo, da absorção de amônio e nitrato pelo sorgo, na presença e na ausência de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 12, p. 131-136, 1988.

RAVEN, J.A.; SMITH, F.A. The regulation of intracellular pH as a fundamental biological process. In: ANDERSON, W.P. **Ion transport in plants**, Academic Press, 1973, p. 271-278.

REEVE N.G., SUMNER M.E. Amelioration of subsoil acidity in a Natal Oxisol by leaching of surface-applied amendments. **Agrochemophysica**, v. 4, p. 1-6, 1972.

RHEINHEIMER, D.S.; ALVAREZ, J.W.R.; OSORIO FILHO, B.D.; SILVA, L.S.; BORTOLUZZI, E.C. Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.35, p. 562-569, 2005.

RHOTON, F.E. Influence of time on soil response to no-till practices. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 700-709, 2000.

RIDLEY, A.M.; WHITE, R.E.; HELYAR, K.R.; MORRISON, G.R.; HENG, L.K.; FISHER, R. Nitrate leaching loss under annual and perennial pastures with and without lime on a duplex (texture contrast) soil in humid southeastern Australia. **European Journal of Soil Science**, v. 52, p. 237-252, 2001.

RIOS, M.A.; PEARSON, R.W. The effect of some chemical environmental factors on cotton root behavior. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 28, p. 232-235, 1964.

RITCHEY, K.D.; SILVA, S.E.; COSTA, V.F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. **Soil Science**, v. 133, p. 378-382, 1982.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; OLIVEIRA, R.H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 301-309, 2003.

ROSOLEM, C.A.; PEREIRA, H.F.M.; BESSA, M.A.; AMARAL, P.G. Nitrogen in soil and cotton growth as affected by liming and nitrogen fertilizer. In: WRIGHT, R. J. Ed. **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer, 1991. p. 321-325.

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

SÁ, J.C.M. Manejo de nitrogênio na cultura do milho no sistema plantio direto. In: **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba, Escola Superior Luiz de Queiroz, 1997.

SÁ, J.C.M. **Manejo do nitrogênio na cultura do milho no sistema plantio direto**. Passo Fundo, Aldeia Norte, 1996. 23p.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1486-1499, 2001.

SALET, R.L. **Dinâmica de íons na solução de um solo submetido a diferentes sistemas de manejo**. 1994, 110 f. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SALET, R.L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R.A. Atividade do alumínio na solução de solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, v. 1, p. 9-13, 1999.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 19, p. 313-319, 1995.

SANGOI, L.; ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; MINETTO, T.J.; BISOTTO, V. Níveis de manejo na cultura do milho em dois ambientes contrastantes: análise técnico-econômica. **Ciência Rural**, v. 33, p. 1021-1029, 2003.

SANGOI, L.; ENDER, M.; GUIDOLIN, A.F.; ALMEIDA, M.L.; KONFLANZ, V.A. Nitrogen fertilization impact on agronomic traits of maize hybrids released at different decades. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.757-764, 2001.

SANTI, A.; AMADO, T.J.C.; ACOSTA, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1075-1083, 2003.

SHENK, M.K.; BARBER, S.A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agronomy Journal**, v.71, p. 921-924, 1979.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, p. 249-254, 1985.

SILVA, C.A.; VALE, F.R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 2461-2471, 2000.

SILVA, C.A.; VALE, F.R.; ANDERSON, S.J.; KOBAL, A.R. Mineralização de nitrogênio e enxofre em solos brasileiros sob influência da calagem e fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 1679-1689, 1999.

SILVA, P.R.F.; STRIEDEN, M.L.; COSEN, R.P.S.; RAMBO, L.; SANGOI, L.; ARGENTA, G.; FORSTHOFER, E.L.; SILVA, A.A. Grain yield and kernel crude protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dressing. **Scientia Agricola**, v. 62, p. 487-492, 2005.

SILVEIRA, J.A.G.; CROCOMO, O.J. Sintomas de deficiência de potássio induzidos pelo acúmulo de aminoácidos e amônia em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.329-334, 1989.

SUMNER, M.E. Amelioration of subsoil acidity with mininum disturbance. In: JAYAWARDANE, N.S.; STEWART, B.A., eds. **Subsoil management techniques**. Athens, GA, Lewis Publishers, p. 147-185, 1995.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 3.rd edition. Sinauer Associates, 2002. 690p.

TARKALSON, D.D.; HERGERT, G.W.; CASSMAN, K.G. Long-term effects of tillage on soil chemical properties and grain yields of a dry land winter wheat-sorghum/corn-fallow rotation in the Great Plains. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 26-33, 2006.

TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, p. 995- 1001, 1975.

TISSI, J.A.; CAIRES, E.F.; PAULETTI, V. Efeitos da calagem em semeadura direta de milho. **Bragantia**, v. 63, p. 405-413, 2004.

URIBELARREA, M.; BELOW, F.E.; MOOSE, S.P. Grain composition and productivity of maize hybrids derived from the Illinois protein strains in response to variable nitrogen supply. **Crop Science**, v. 44, p. 1593-1600, 2004.

VALE , F.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; MILHAGRES, B.G. Absorção de nitrato e amônio por raízes intactas de milho pré-tratadas com alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 215-218, 1984.

WEILAND, R.T.; TA, T.C. Allocation and retranslocation of ^{15}N by maize (*Zea mays* L.) hybrids under field conditions of low and high N fertility. **Australia Journal of Plant Physiology**, v. 19, p.77-88, 1992.

WEIR, C.C. Effect of lime and nitrogen application on citrus yields and on the downward movement of calcium and magnesium in a soil. **Tropical Agriculture**, v. 51, p. 230-234, 1974.

WOLT, J.D. **Soil solution chemistry**. New York, John Wiley & Sons, 1994. 345p.

YANAI, J.; LINEHAN, D.J.; ROBINSON, D.; YOUNG, I.M.; HACKETT, C.A.; KYUMA, K.; KOSAKI, T. Effects of inorganic nitrogen application on the dynamics of the soil solution composition in the root zone of maize. **Plant Soil**, v. 180, p. 1-9, 1996.

YOUNG, S.R.; BLACK, A.S.; CONYERS, M.K. Distribution of nitrification within surface soils under pasture. **Communication in Soil Science Plant Analysis**, v. 33, p. 1507-1518, 2002.