

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

CALAGEM SUPERFICIAL, UMIDADE DO SOLO E COMPORTAMENTO DO MILHO
CULTIVADO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

HELIO ANTONIO WOOD JORIS

PONTA GROSSA – PR
2011

HELIO ANTONIO WOOD JORIS

CALAGEM SUPERFICIAL, UMIDADE DO SOLO E COMPORTAMENTO DO
MILHO CULTIVADO 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
2011

Ficha Catalográfica Elaborada pelo Setor de Processos Técnicos BICEN/UEPG

J85c Joris, Hélio Antonio Wood
Calagem superficial, umidade do solo e comportamento do milho cultivado em sistema plantio direto / Hélio Antonio Wood Joris. Ponta Grossa, 2011.
87 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de Concentração : Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador : Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

1. *Zea mays*, L. 2. Calcário dolomítico. 3. Acidez subsuperficial. 4. Déficit hídrico. I. Caires, Eduardo Fávero. II. T.

CDD: 631.82



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: "CALAGEM SUPERFICIAL, UMIDADE DO SOLO E COMPORTAMENTO DO MILHO CULTIVADO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO".

Nome: Hélio Antonio Wood Joris

Orientador: Eduardo Fávero Caires

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Dr. Antonio Costa

Prof. Dr. Fernando José Garbuio

Data da Realização: 11 de fevereiro de 2011.

AGRADECIMENTOS

O autor expressa os sinceros agradecimentos às pessoas e instituições sem as quais esse trabalho não seria realizado.

Aos meus pais e meu irmão, pelo enorme apoio e compreensão em todos os momentos, pelo amor incondicional e por sempre mostrar que as conquistas só fazem sentido quando vêm acompanhadas de muito trabalho e dedicação.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, em especial ao curso de pós-graduação em Agronomia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao professor Eduardo F. Caires, pela ideia da realização do presente estudo, com excelente orientação durante a realização do trabalho e sábios conselhos. Não é exagero dizer que suas lições de persistência, ética e bom senso, fundamentais para qualquer pesquisador, servirão de suporte e exemplo, por toda a minha vida.

Aos professores do curso de pós-graduação em Agronomia, pela dedicação exemplar, em especial aos professores David de S. Jaccoud Filho e Adriel F. da Fonseca, pelo trabalho extraordinário na coordenação do curso.

Aos amigos e colegas de trabalho dos Laboratórios de Fertilidade do Solo e de Nutrição de Plantas: Renato Zardo Filho, Adriano Haliski, Angelo R. Bini, Danilo Augusto Scharr, Valter Yassuo Asami, Hendrik Reifur, Jéssica Alves dos Santos e Rodrigo Martins de Oliveira, pela participação fundamental na concretização desse trabalho, além da enorme

amizade e companheirismo. Aos amigos Susana Churka e Fernando J. Garbuió, pela grande amizade e ajuda.

Aos funcionários da UEPG, em especial, Dirce Vaz, Verônica Carneiro, Luciane Henneberg, Zima Richter e Nilcéia Alves de Lara.

A Deus, por toda a inspiração divina que nos proporciona e pela inteligência superior que governa nossas ações, muito além do que conseguimos compreender na nossa ignorância humana ou em qualquer tipo de manifestação religiosa.

A todos que de uma forma ou de outra, contribuíram com a realização do trabalho e formação do autor. Meus sinceros agradecimentos.

“O espírito científico, fortemente armado com o seu método, se distingue da crença das multidões ingênuas que consideram Deus um ser de quem esperam benignidade e do qual temem o castigo. A religiosidade de um cientista consiste em espantar-se diante da harmonia das leis da natureza, revelando uma inteligência tão superior que todos os pensamentos humanos e todo o seu engenho não podem desvendar, diante dela, a não ser seu nada irrisório. Este sentimento desenvolve a regra dominante de sua vida, de sua coragem, na medida em que supera a servidão dos desejos egoístas. Sem dúvida, este sentimento se compara àquele que animou os espíritos criadores divinos em todos os tempos.”

Albert Einstein, em “Como vejo o mundo.”

JORIS, Helio Antonio Wood. **Calagem superficial, umidade do solo e comportamento do milho cultivado em sistema plantio direto**. 2011. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

RESUMO

Os efeitos da acidez do solo em sistema plantio direto precisam ser mais investigados em situações de seca. O comportamento da cultura do milho em resposta à aplicação superficial de calcário, considerando a tolerância genotípica ao alumínio e a umidade do solo foi avaliado em um estudo realizado em Latossolo Vermelho distrófico textura média, em Ponta Grossa (PR). O trabalho foi realizado em área experimental no campo e em colunas indeformadas de solo, coletadas na mesma área experimental. No campo, após a aplicação superficial de calcário em 2004, nas doses 0, 4, 8 e 12 t ha⁻¹, em um delineamento de blocos completos ao acaso com 3 repetições, avaliaram-se as alterações nos atributos químicos do solo nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, o crescimento radicular, a nutrição e extração de nutrientes, a massa seca da parte aérea e a produção de grãos de milho, cultivado em 2008-2009. Nas parcelas que receberam as doses de calcário, foram retiradas colunas indeformadas de solo para a realização de outro experimento, o qual envolveu a utilização de dois híbridos, um sensível e outro moderadamente sensível ao alumínio, e dois níveis de umidade do solo, simulando ausência e presença de deficiência hídrica. A calagem superficial corrigiu a acidez do solo em todas as camadas estudadas e proporcionou melhoria no ambiente radicular em todo o perfil. O crescimento radicular do milho foi favorecido pela aplicação de calcário, principalmente na camada de 0-10 cm. A calagem exerceu efeito positivo sobre a nutrição e extração de nutrientes, refletindo em aumento da produção de grãos de milho. Nas colunas indeformadas de solo, a correção do solo pela calagem na superfície beneficiou o crescimento radicular, a extração de nutrientes e a produção de massa seca das plantas de milho, principalmente em situação de deficiência hídrica. Em geral, não houve diferença na resposta à calagem dos híbridos sensível e moderadamente sensível ao alumínio. Concluiu-se que a cultura do milho é beneficiada pela correção da acidez por meio da calagem na superfície em plantio direto, porém a acidez não exerce grande limitação no desenvolvimento da cultura quando há adequada disponibilidade hídrica. Em situação de restrição hídrica, entretanto, a acidez do solo prejudica severamente o desenvolvimento do sistema radicular e a produção da cultura do milho em sistema plantio direto.

Palavras-chave: *Zea mays*, L.; calcário dolomítico; absorção de nutrientes; cálcio; alumínio; acidez subsuperficial, déficit hídrico.

ABSTRACT

The effects of soil acidity in a no-till system need to be further investigated under drought. The corn performance in response to surface application of lime, as affected by aluminum genotypic tolerance and soil moisture was evaluated in a sandy clay loam Typic Hapludox, in Ponta Grossa, Parana State, Brazil. The study was carried out in a field experiment and in undisturbed soil columns. In a field experiment, the changes in soil chemical attributes at 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 and 40-60 cm depths, and the nutrition, export and nutrient uptake, above ground biomass and grain yield of corn in 2008-2009 were evaluated after surface application of lime at rates of 0, 4, 8 and 12 t ha⁻¹ in 2004, in a randomized complete block with three replications. Undisturbed soil columns were removed from plots that received lime rates, and another experiment was carried out on them, testing two hybrids, one aluminum-sensitive and another moderately sensitive to aluminum, and two moisture levels, simulating the presence and absence of water stress. Surface liming ameliorated soil acidity in all depths studied, and improved root environment throughout profile. Corn root growth was influenced by lime application, mainly at 0-10 cm depth. Liming had a positive effect on nutrition, export and nutrient uptake, resulting in a significant increase in corn grain yield. In the undisturbed columns, soil amendment by surface liming benefited root growth, nutrient uptake and dry matter production of corn plants, mainly in a water stress condition. In general, there was no difference in the response of both sensitive hybrid and moderately sensitive hybrid to aluminum toxicity with liming. It is concluded that the corn crop performance is ameliorated by the reduction in soil acidity through surface liming under no-till, but the corn crop development is little influenced by soil acidity when water availability is adequate. However, in a water stress condition, the soil acidity severely compromises the corn crop development under no-till system.

Key words: *Zea mays*, L., dolomitic lime; nutrient uptake; calcium; aluminum; subsurface acidity; water deficit.

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 (setembro/2008 a março/2009) e temperaturas médias máximas e mínimas ocorridas no mesmo período (SEAB, 2009)	20
Figura 2. Coleta de amostras indeformadas realizadas na área experimental, por meio do uso de caçamba hidráulica	24
Figura 3. Alterações nos valores de pH em CaCl_2 0,01 mol L ⁻¹ e nos teores de Al^{3+} trocável do solo nas diferentes profundidades estudadas, 59 meses após a aplicação de doses de calcário na superfície, em 2004. *: P<0,05 e **:P<0,01	28
Figura 4. Alterações nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis do solo em diferentes profundidades, 59 meses após a aplicação de doses de calcário na superfície, em 2004. *: P<0,05 e **: P<0,01	31
Figura 5. Alterações nos valores de saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) em diferentes profundidades, 59 meses após a aplicação de doses de calcário na superfície, em 2004. *: P<0,05 e **: P<0,01 ...	33
Figura 6. Alterações no raio médio e densidade de comprimento de raízes de milho em função da aplicação de calcário em sistema plantio direto. *: P<0.05 e **: P<0.01	36
Figura 7. Massa seca da parte aérea e produção de grãos de milho em função de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto. **: P<0.01	44
Figura 8. Relações entre atributos de acidez do solo (pH e Al^{3+}), em diferentes profundidades, e produção de grãos de milho após a aplicação de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto. *: P<0.05 e **: P<0.01.....	46
Figura 9. Relações entre teores de bases trocáveis (Ca^{2+} e Mg^{2+}) no solo, em diferentes profundidades, e produção de grãos de milho após a aplicação de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto. *: P<0.05 e **: P<0.01	48
Figura 10. Relações entre saturação por alumínio e saturação por bases no solo, em diferentes profundidades, e produção de grãos de milho após a aplicação de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto. *: P<0.05 e **: P<0.01	50
Figura 11. Raio médio de raízes dos híbridos de milho P32R22 (■) e P30F53 (□), em função de doses de calcário, com e sem deficiência hídrica. *: P<0.05 e **: P<0.01	52

Figura 12.	Densidade de comprimento de raízes dos híbridos de milho P32R22 (■) e P30F53 (□), em função de doses de calcário, com e sem deficiência hídrica. *: P<0.05 e **: P<0.01	54
Figura 13.	Comprimento total de raízes dos híbridos de milho P32R22 (■) e P30F53 (□), em função de doses de calcário, com e sem deficiência hídrica. *: P<0.05 e **: P<0.01	56
Figura 14.	Superfície radicular de raízes dos híbridos de milho P32R22 (■) e P30F53 (□), em função de doses de calcário, com e sem deficiência hídrica. *: P<0.05 e **: P<0.01	57
Figura 15.	Extração de nutrientes pelas plantas de milho, em função de doses de calcário, em dois níveis de volume total de poros (VTP) ocupados com água, com diferentes híbridos: 80% - P32R22 (●), 80% - P30F53 (○), 50% - P32R22 (■) e 50% - P30F53 (□). *: P<0.05 e **: P<0.01	61
Figura 16.	Massa seca da parte aérea de plantas de milho, em função de doses de calcário, em dois níveis de volume total de poros (VTP) ocupados com água, com diferentes híbridos: 80% - P32R22 (●), 80% - P30F53 (○), 50% - P32R22 (■) e 50% - P30F53 (□). *: P<0.05 e **: P<0.01	64

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Resultados de análises químicas do solo, em diferentes profundidades, antes da instalação do experimento, em 2004.....	18
Tabela 2. Precipitação pluvial ocorrida e necessidade hídrica em diferentes fases de desenvolvimento da cultura do milho, safra 2008-2009. Modelo adaptado de ANDRADE et al. (2006)	21
Tabela 3. Atributos químicos do solo da área experimental, após a aplicação superficial de calcário, realizada em 2004.....	24
Tabela 4. Coeficientes de correlação entre atributos de raízes de milho e atributos químicos do solo em diferentes profundidades.....	37
Tabela 5. Teor de nutrientes nas folhas e grãos de milho de acordo com os tratamentos de calcário na superfície no sistema plantio direto	39
Tabela 6. Acúmulo de nutrientes em diferentes partes da planta e extração total pela parte aérea do milho em função de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto	42
Tabela 7. Coeficientes de correlação entre atributos de raízes de milho e atributos químicos do solo, em função da profundidade.....	58
Tabela 8. Coeficientes de correlação entre a produção de massa seca de milho e atributos químicos da acidez do solo em diferentes profundidades	65

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Acidez do solo e calagem	3
2.1.1. Origem da acidez	3
2.1.2. Fatores de manejo causadores da acidez do solo	3
2.1.3. Consequências negativas do cultivo em solos ácidos	4
2.1.4. Correção da acidez do solo	4
2.2. Sistema plantio direto	5
2.2.1. Acidez do solo em sistema plantio direto	5
2.2.2. Aplicação de calcário para correção da acidez do solo em sistema plantio direto	6
2.2.3. Recomendação de calagem superficial em sistema plantio direto	8
2.2.4. Correção da acidez no subsolo pela aplicação de calcário na superfície em sistema plantio direto	9
2.3. Comportamento da cultura do milho em solos ácidos sob sistema plantio direto	11
2.4. Influência do conteúdo de água do solo no desenvolvimento da cultura do milho em solos ácidos	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1. Experimento realizado no campo	17
3.1.1. Localização e caracterização da área experimental	17
3.1.2. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos	18
3.1.3. Sucessão de culturas	18
3.1.4. Cultura do milho	19
3.1.5. Precipitação pluvial e temperatura	19
3.1.6. Avaliações	21
3.1.6.1. Análises de Solo	21
3.1.6.2. Diagnose foliar	21
3.1.6.3. Acúmulo, extração de nutrientes e massa seca da parte aérea	22
3.1.6.4. Sistema radicular	22
3.1.6.5. Produtividade e concentração de nutrientes nos grãos	22
3.1.7. Análises estatísticas	23
3.2. Experimento realizado em colunas de solo	23

3.2.1.	Retirada das colunas indeformadas de solo	23
3.2.2.	Localização do experimento	25
3.2.3.	Delineamento experimental	25
3.2.4.	Instalação e condução do experimento	25
3.2.5.	Avaliações	26
3.2.6.	Análises estatísticas	26
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1.	Experimento conduzido no campo	27
4.1.1.	Alterações nos atributos químicos de acidez do solo	27
4.1.2.	Atributos de crescimento radicular do milho	34
4.1.3.	Concentração de nutrientes nas folhas e nos grãos de milho	38
4.1.4.	Extração de nutrientes pela cultura do milho.....	41
4.1.5.	Produção de massa seca da parte aérea e rendimento de grãos	43
4.2.	Experimento conduzido em colunas indeformadas de solo	51
4.2.1.	Atributos de crescimento radicular do milho	51
4.2.2.	Extração de nutrientes pelas plantas de milho.....	59
4.2.3.	Massa seca da parte aérea	63
5.	CONCLUSÕES	66
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

A acidez do solo limita a produção agrícola em muitas áreas do mundo, principalmente em solos tropicais e subtropicais. O baixo conteúdo de cátions básicos e a toxidez do alumínio afetam o crescimento radicular e a absorção de água e nutrientes pelas plantas (TANG et al., 2003), usualmente causando redução na produtividade em solos ácidos.

O sistema plantio direto (SPD) se consolidou em áreas tropicais e subtropicais por ser um sistema de cultivo sem revolvimento do solo que minimiza perdas de solo e nutrientes por erosão. O SPD teve um rápido crescimento da área cultivada no Brasil – atualmente estimada em mais de 25 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2010).

No SPD ocorre acúmulo no conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS) e aumento na capacidade de troca de cátions (CTC). Com isso, os solos sob SPD podem conter concentrações suficientes de cátions trocáveis nas camadas superficiais para a maioria das culturas, principalmente Ca^{2+} , mesmo em condições de alta acidez (CAIRES et al., 1998). As concentrações mais altas de Ca^{2+} no solo podem diminuir a absorção de Al^{3+} pelas raízes, devido à competição nos sítios de adsorção, reduzindo o efeito tóxico do Al^{3+} sobre o crescimento das raízes (BRADY, 1993). Além disso, nesse sistema, há diminuição na perda de água por evaporação, devido à cobertura vegetal do solo, resultando em maior conteúdo de água disponível nas camadas superficiais, o que auxilia a absorção de nutrientes em condições de solo ácido (CAIRES e DA FONSECA, 2000). Tais fatores podem explicar a ocorrência de altas produtividades em condições de elevada acidez no SPD sem restrição hídrica (TISSI et al., 2004; CAIRES et al., 2005). No entanto, estudos de longo prazo para avaliar os efeitos da

calagem em SPD na correção da acidez em camadas superficiais e do subsolo, no crescimento radicular e na produção de grãos das culturas são ainda limitados nas condições brasileiras.

Em condições de déficit hídrico, há poucas informações sobre a calagem em SPD. Nessas condições, é necessário adequado desenvolvimento das raízes para que elas possam atingir camadas mais profundas, onde o conteúdo de água é mais elevado. Em adição, há indicativos de que o efeito tóxico do alumínio torna-se mais severo em condições de seca (CAIRES et al., 2008), em decorrência de aumento na sua atividade. No estado do Paraná foram estimadas perdas de 20% na produção de grãos, na safra 2008-2009, constituindo-se na maior queda em volume de produção da história, devido à estiagem ocorrida no estado em novembro e início de dezembro de 2008 (FAEP, 2009). A amenização do efeito de déficit hídrico na cultura do milho por meio da aplicação de calcário é conhecida na literatura (GONZALES-ERICO et al., 1976; FREIRE, 1984), mas há poucos trabalhos focando a resposta do milho à correção da acidez do solo por meio da calagem superficial em diferentes níveis de umidade do solo. Nesse aspecto, existem dúvidas se os solos sob SPD encontram-se adequadamente corrigidos para amenizar possíveis efeitos negativos causados por condições de seca.

Nesse estudo, considera-se a hipótese de que a cultura do milho apresenta melhor desenvolvimento e maior produção com a correção da acidez do solo proporcionada pela calagem superficial no SPD, mas que os efeitos negativos da acidez do solo se tornam mais evidentes em situações de seca. Assim, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a correção da acidez do solo após cinco anos da aplicação de calcário na superfície em plantio direto e a resposta da cultura do milho em diferentes níveis de acidez do solo, na presença e ausência de deficiência hídrica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Acidez do solo e calagem

2.1.1. Origem da acidez

Os solos ácidos compõem cerca de 40% dos solos cultiváveis do planeta (KOCHIAN, HOEKENGA e PIÑEROS, 2004), localizados predominantemente em regiões tropicais e subtropicais, e apresentam altos teores de Al trocáveis (CIOTTA et al., 2004), pela pobreza dos materiais de origem desprovidos de bases, ou por condições de pedogênese e formação do solo que favorecem a remoção de cátions básicos (VAN RAIJ, 1991).

Além da origem ácida, os solos podem ainda sofrer acidificação contínua por meio da dissociação do gás carbônico, por meio da reação: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$. Em condições de pH maior que 5,0, essa reação libera H^+ , promovendo aumento na acidez do solo, e HCO_3^- , que favorece a lixiviação de bases em profundidade (QUAGGIO, 1986).

2.1.2. Fatores de manejo causadores da acidez do solo

Em situações de cultivo em que há adição de fertilizantes nitrogenados contendo amônio ou uréia, assume grande importância a acidificação causada pela reação de nitrificação do íon 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 passando a ocupar posições de troca em forma não dissociada, liberando um cátion correspondente passível de ser lixiviado pelo ânion NO_3^- (VAN RAIJ, 1991). A adição de fertilizantes nitrogenados amoniacais é apontada em alguns trabalhos como o principal fator que promove acidificação do solo em sistemas de cultivo intensivo, sem rotação de culturas adequada. Debreczeni e Kismánioky (2005), avaliando a acidificação do solo em

experimentos de longo prazo, verificaram que, mesmo após 20 anos de cultivo intensivo, sem a adição de adubação NPK após esse período, não ocorreu acidificação do solo, durante mais 12 anos de avaliação.

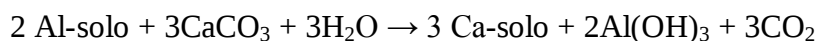
A extração de cátions básicos pelas culturas (principalmente Ca e Mg) também é um fator causador da acidez do solo. A reação básica para absorção de cátions é a troca de um cátion básico pelo íon H^+ na interface solo-raiz. Além disso, a remoção de Ca^{2+} e Mg^{2+} do complexo de troca requer a liberação de íons H^+ para manter o balanço de cargas da solução no solo (SOUSA, MIRANDA e OLIVEIRA 2007).

2.1.3. Consequências negativas do cultivo em solos ácidos

De maneira geral, a deficiência de Ca e a toxidez por Al são as principais limitações químicas causadas pela acidez do solo, afetando principalmente o sistema radicular, cujas consequências se manifestam pelo estresse nutricional e hídrico das plantas (RITCHEY et al., 1980). O efeito fitotóxico do Al^{3+} causa grandes prejuízos na agricultura, principalmente ao cultivo de cereais. A principal ação tóxica do Al^{3+} em vegetais é a inibição do crescimento longitudinal da raiz (DELHAIZE e RYAN, 1995; ROUT, SAMANTARAY e DAS, 2001). A paralisação no crescimento radicular pode ocorrer pela inibição do crescimento da parede celular, por meio da morte das células do meristema radicular, pela redução do metabolismo celular ou ainda como consequência da ação de todos esses mecanismos (SCHILDKNECHT, 2004).

2.1.4. Correção da acidez do solo

A calagem é a prática mais utilizada para o controle da acidez do solo por ocasionar aumento no pH e nos teores de Ca e Mg além da precipitação do Al trocável. O calcário reage com a água, liberando íons HCO_3^- e OH^- para a solução: $CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^-$. Os íons HCO_3^- e OH^- reagem com íons H^+ presentes no solo, ou formados a partir da hidrólise do Al^{3+} . A reação do calcário em solos ácidos, considerando a precipitação do Al, pode ser expressa da seguinte forma (SPARKS, 2003):



Após a aplicação de calcário, os sítios de troca catiônica, antes ocupados por Al^{3+} e H^+ , passam a ser preenchidos por bases trocáveis, promovendo aumento na saturação por bases (V%), que é expressa pela proporção de bases trocáveis no complexo de troca. Dessa forma, o critério da elevação da saturação por bases do solo foi proposto como um método adequado para recomendação de calagem, principalmente pela sua flexibilidade, permitindo calcular doses de calcário em níveis variáveis para diversas culturas, e por se tratar de um critério de uso simples, direto e analiticamente seguro (VAN RAIJ et al., 1983).

2.2. Sistema Plantio Direto

O sistema plantio direto (SPD) foi implantado no estado do Paraná no início da década de 1970 e, desde então, expandiu rapidamente, ocupando atualmente mais de 25 milhões de hectares de área cultivada no Brasil (FEBRAPDP, 2010). O SPD consiste no mínimo revolvimento do solo, restrito apenas ao sulco de semeadura, de maneira que a palha e os resíduos vegetais são deixados na superfície do solo, minimizando assim problemas de erosão, que aliada a uma adequada rotação de culturas, torna esse sistema altamente sustentável. Esse sistema tem revolucionado os sistemas agrícolas, pois permite o manejo das áreas agrícolas com uma considerável redução de energia, trabalho, máquinas e insumos. Ao mesmo tempo, o SPD é uma eficiente prática de controle da erosão e de melhora do uso de água e fertilizantes, de modo que muitas culturas apresentam maior rendimento em SPD que em sistema de preparo convencional (TRIPLETT e DICK, 2008). Trata-se, portanto, de um sistema altamente sustentável, porém ainda existem muitos desafios que precisam ser mais bem investigados.

2.2.1. Acidez do solo em sistema plantio direto

No plantio direto, foram propostas as seguintes hipóteses como causas da acidez do solo: liberação de grupos carboxílicos e fenólicos oriundos da mineralização de resíduos orgânicos depositados na superfície; exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes das culturas;

remoção de bases pelas culturas; adubação nitrogenada com fertilizantes amoniacais e sequência das culturas em rotação (SÁ, 1999). A adição de fertilizantes nitrogenados amoniacais tem sido apontada como a principal causa de acidificação do solo em curto prazo no SPD (TARKALSON, HERGERT e CASSMAN, 2006), de maneira que, quanto maior o montante de N adicionado, maior a quantidade de calcário necessária para obtenção de altas produtividades das culturas (GASHO e PARKER, 2001).

Avaliando a fertilidade dos solos em 40 áreas sob plantio direto na região dos Campos Gerais do Paraná, Sá (1993) constatou elevada acidez em 70% destas, com valores de pH(CaCl₂) entre 4,0 a 4,7 na profundidade de 30 a 40 cm, e saturação por bases de 40% na camada de 0-20 cm. Observou também que diminuições significativas no rendimento de milho e soja só ocorreram quando a saturação por bases situava-se entre 20 e 30%.

2.2.2. Aplicação de calcário para correção da acidez do solo em plantio direto

No sistema convencional de preparo do solo, a acidez é facilmente controlada pela incorporação mecânica do calcário, sendo a reação favorecida pela mistura do corretivo com o solo. Em SPD, o calcário não pode ser misturado com o solo e sua aplicação é feita na superfície sem incorporação (CAIRES, 2007). A ausência de um ânion estável na reação de hidrólise do calcário aliada à lenta taxa de dissolução e formação de cargas negativas dependentes de pH, caracterizam a ação do calcário apenas nas proximidades da sua aplicação (PAVAN, BIGHAM e PRATT, 1984). Dessa forma, a reação do calcário é geralmente limitada às camadas superficiais, não ocorrendo correção da acidez do solo abaixo de seu local de aplicação (GONZALES-ERICO et al., 1979; VAN RAIJ et al., 1998). Isso pode comprometer a penetração de raízes e a nutrição das plantas, principalmente na presença de níveis tóxicos de Al e/ou deficiência de Ca. Esses fatores adquirem grande importância nas condições brasileiras pela ocorrência generalizada de Al³⁺ trocável nos solos (OLMOS e CAMARGO, 1976).

Em alguns estudos realizados na região Sul do Brasil observou-se pouca movimentação do calcário no perfil do solo. Pöttker e Ben (1998), em Latossolos com teor de argila de 380 e 580 g kg⁻¹, observaram efeito significativo nos atributos do solo promovidos pela calagem superficial em SPD apenas na camada de 0-5 cm, após três anos da aplicação do calcário. Resultados semelhantes foram encontrados por Amaral e Anghinoni (2001) em um Argissolo textura franco-argilosa, sendo que após um ano da aplicação superficial de calcário, a correção da acidez do solo não ultrapassou 5 cm de profundidade. Entretanto, em outros trabalhos realizados em SPD na região Centro-Sul do Paraná observou-se expressivo efeito da movimentação do calcário aplicado na superfície e, conseqüentemente, correção da acidez do solo em profundidade. Oliveira e Pavan (1996) verificaram correção da acidez do solo com a calagem superficial até 40 cm de profundidade e não encontraram diferenças entre a aplicação superficial ou incorporada de calcário na produção de grãos de soja. Caires et al. (1998), Caires, Banzatto e da Fonseca (2000) e Tissi, Caires e Pauletti (2004) observaram correção da acidez até 60 cm de profundidade em Latossolos de textura média e argilosa.

A movimentação dos produtos da dissolução do calcário depende dos fatores tempo e dose (RHEINHEIMER et al., 2000), e enquanto existirem cátions ácidos (H⁺, Al³⁺, Fe²⁺ e Mn²⁺), a reação de neutralização da acidez ficará limitada à camada superficial, retardando o efeito em subsuperfície. Os íons OH⁻ e HCO³⁻, provenientes da dissolução do calcário, são rapidamente consumidos pelos cátions ácidos e somente migram para porções inferiores do solo em pH>5,0. Em sistema convencional de preparo do solo com incorporação do calcário, Quaggio et al., (1985) observaram movimentação significativa de Ca e Mg além da camada incorporada em um Cambissolo álico, após 24 meses da calagem. O efeito foi diretamente proporcional à dose aplicada e mais intenso para a maior dose (12 t ha⁻¹).

Em SPD, Caires et al. (2005) observaram aumento no pH e nos teores de cátions básicos, e redução no teor de Al³⁺, até a camada de 10-20 cm, após 2,5 anos da aplicação superficial de calcário, cujo efeito permaneceu consistente mesmo após 10 anos da calagem.

Esses resultados foram atribuídos à dose e ao tempo de aplicação do calcário, ao tipo de solo, no caso um Latossolo Vermelho textura média, à alta precipitação pluvial e ao predomínio da soja na rotação de culturas, com emprego de baixas quantidades de fertilizantes nitrogenados. Em estudo de longo prazo realizado na Austrália, em solo com 290 g kg^{-1} de argila, Conyers et al. (2003) verificaram que a aplicação de $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário de alta qualidade na superfície levou de 2 a 4 anos para atingir a profundidade de 10 cm e não foi efetiva na correção do pH abaixo dessa camada, mesmo após 8 anos. Essa maior resistência ao movimento alcalino pode ser explicada pela baixa dose de calcário utilizada, associada a uma precipitação pluvial média de apenas 570 mm por ano.

2.2.3. Recomendação de calagem superficial em plantio direto

A determinação da necessidade de calagem, com base na análise química do solo, e a frequência de aplicação de calcário na superfície, em SPD, são assuntos polêmicos (CAIRES, 2007). Muitos questionamentos têm sido realizados para a definição da necessidade de calagem nesse sistema, em decorrência do acúmulo de resíduos vegetais e formação de gradientes de matéria orgânica e de nutrientes a partir da superfície do solo, alterando a dinâmica do Al e diminuindo a sua toxidez às plantas, devido sua complexação com compostos orgânicos provenientes da matéria orgânica do solo. Porém, a deposição de resíduos orgânicos e a reação de adubos nitrogenados nas camadas superficiais em SPD também podem favorecer a acidificação do solo. Trata-se, portanto, de assunto complexo, havendo informações discordantes a respeito de critérios de recomendação de calagem na superfície para tal sistema de cultivo. É necessário o uso de critérios adequados para estimar a dose de calcário a ser aplicada (CAIRES et al., 1999) porque a aplicação superficial de calcário pode ocasionar redução na absorção de micronutrientes catiônicos, principalmente de Zn e Mn, em decorrência do aumento do pH nas camadas superficiais do solo (CAIRES e DA FONSECA, 2000).

A influência de doses de calcário na superfície de um Latossolo Vermelho textura média, na região Centro-Sul do Paraná, sobre a produção de grãos de culturas no SPD, foi avaliada em um período de 5 anos (CAIRES, BANZATTO e DA FONSECA, 2000) e de 10 anos (CAIRES et al., 2005). Estimou-se que a máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) ocorreriam, respectivamente, com as doses de 3,8 e 3,3 t ha⁻¹ de calcário em 5 anos, e de 4,2 e 4,0 t ha⁻¹ de calcário, em 10 anos. A dose de calcário para a MEE foi a recomendada pelo método da elevação da saturação por bases para 65%, no período de 5 anos, e para 70%, no período de 10 anos, em amostra de solo coletada na profundidade de 0-20 cm. Todavia, somente houve vantagem econômica da aplicação superficial de calcário para solo com pH(CaCl₂) inferior a 5,6 ou saturação por bases inferior a 65%, na profundidade de 0-5 cm. Resultados semelhantes foram obtidos em experimentos realizados no estado do Rio Grande do Sul (NOLLA e ANGHINONI, 2006; NICOLODI, ANGHINONI e GIANELLO, 2008).

Com base nesses estudos, a calagem na superfície em plantio direto deve ser recomendada somente para solo com pH(CaCl₂) inferior a 5,6 ou saturação por bases inferior a 65%, na camada de 0-5 cm (CAIRES, BANZATTO e DA FONSECA, 2000). O método da elevação da saturação por bases para 70% em amostra de solo coletada na profundidade de 0-20 cm apresenta estimativa adequada para a recomendação de calcário na superfície nesse sistema (CAIRES et al., 2005). A dose de calcário, calculada por esse método, deve ser distribuída sobre a superfície do solo em uma única aplicação, com resultados similares quando parcelada em três anos (CAIRES, BARTH e GARBUIO, 2006).

2.2.4. Correção da acidez no subsolo pela aplicação de calcário na superfície

O aprofundamento do sistema radicular confere às plantas maior resistência a períodos de baixa precipitação pluvial e possibilita maior absorção de nutrientes, pela exploração de maior volume de solo (ERNANI, 1993). Dessa maneira, torna-se imprescindível a correção da acidez do solo e a melhoria do ambiente radicular em camadas mais profundas. A movimentação vertical de calcário no perfil do solo em plantio direto é um assunto ainda

muito discutido, existindo fatores de ordem física, química e biológica que podem favorecer essa movimentação.

Com o decorrer do tempo, em geral, no solo sob SPD, ocorre aumento de poros gerados pela ação contínua de raízes e alta atividade da meso e macrofauna (WUEST, 2001), permitindo a formação de canais, que são mantidos intactos e contínuos no perfil do solo. O acúmulo de matéria orgânica em SPD promove também maior estabilidade de agregados (JIAO, WHALEN e HENDERSHOT, 2006). Quando esses atributos físicos são preservados, as taxas de infiltração instantânea de água no SPD são maiores que no sistema convencional de preparo do solo (SCHICK et al., 2000). Com base nisso, Amaral et al. (2004), pelo uso de colunas indeformadas de solo manejado há 5 anos em SPD, num Cambissolo húmico argiloso, verificaram rápido transporte de partículas finas do calcário da superfície até a profundidade de 20 cm pela água percolada no solo, recuperando, na base da coluna (22 cm), 10,86% da quantidade total de calcário adicionada na superfície do solo. No entanto, nesse estudo utilizou-se apenas as partículas mais finas do calcário (0,105 – 0,053 mm), que representavam 31% da massa do calcário comercial, sendo o movimento das partículas de calcário feito por meio de canais e espaços existentes no solo, que foram mantidos intactos no estudo, o que nem sempre é possível em condições de campo.

Em teoria, a calagem na superfície também pode ter efeito na correção da acidez de camadas do subsolo por meio da adição de fertilizantes amoniacais. A reação de oxidação que converte NH_4^+ em NO_3^- , gera acidez no solo, que pode auxiliar na dissolução do calcário, resultando na lixiviação de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ e outros sais formados para o subsolo. Para que isso ocorra, é fundamental que a cultura apresente bom crescimento radicular nas camadas mais profundas. Entretanto, em trabalho realizado com a aplicação de calcário e nitrogênio no SPD, Feldhaus (2006) verificou melhoria na acidez subsuperficial pela calagem na superfície, porém esse efeito não teve relação com a aplicação de fertilizante nitrogenado amoniacal. A correção de subsolos ácidos pela lixiviação de NO_3^- é uma estratégia que precisa de maior

investigação, com culturas que apresentem crescimento radicular vigoroso, favorecendo o processo de mobilização química do calcário aplicado na superfície.

Outro mecanismo responsável pela eficiência na correção da acidez do perfil do solo com a aplicação superficial de calcário em SPD é a liberação de compostos orgânicos hidrossolúveis pelos materiais vegetais presentes na superfície do solo, antes do início da decomposição microbiana (FRANCHINI et al., 2003). Segundo esses autores, a presença de certos materiais vegetais é capaz de potencializar o efeito da calagem, mobilizando a chamada frente alcalina; os ligantes orgânicos complexam o Ca^{2+} trocável do solo na camada superficial, formando complexos CaL^0 ou CaL^- , reação que também pode ocorrer com Mg, facilitando a mobilidade desses íons no solo. Como o Al^{3+} forma complexos orgânicos mais estáveis que Ca^{2+} ou Mg^{2+} , na presença de Al^{3+} no subsolo, ocorre deslocamento do cálcio dos complexos Ca-orgânicos pelo Al. Portanto, os compostos orgânicos hidrossolúveis liberados pelas plantas de cobertura apresentam, teoricamente, capacidade de complexar e mobilizar Ca e Mg, elevar o pH e neutralizar o Al, atingindo camadas de solo de 20 cm de profundidade em poucos dias (MORAES et al., 2007).

Ainda existem muitas dúvidas relativas à eficiência dessa estratégia, considerando-se que esses resultados positivos foram demonstrados em condições de laboratório, com a utilização de quantidades de resíduos vegetais muito superiores às introduzidas anualmente no SPD. Algumas tentativas de reprodução desses resultados não foram bem sucedidas, sem efeito ou com efeito pouco persistente dos compostos orgânicos na correção da acidez em camadas do subsolo (FRANCHINI et al., 1999; AMARAL, ANGHINONI e DESCHAMPS, 2004). Em condições de campo, em um Latossolo Vermelho argilo-arenoso manejado há 5 anos em SPD, Caires et al. (2006a) não verificaram benefícios dos resíduos de aveia-preta à ação da calagem superficial ($7,5 \text{ t ha}^{-1}$) na correção da acidez de camadas do subsolo.

2.3. Comportamento da cultura do milho em solos ácidos sob SPD

A correção da acidez do solo é muito importante para o adequado desenvolvimento da cultura do milho. O aumento no pH do solo altera a disponibilidade de nutrientes, causando aumento na absorção de macronutrientes pela cultura. Vários trabalhos demonstram consideráveis aumentos na produção de milho com a aplicação de calcário incorporado ao solo em sistema de preparo convencional (GONZALES-ERICO et al., 1979; CAMARGO et al., 1982; VAN RAIJ et al., 1983; ERNANI, NASCIMENTO e OLIVEIRA, 1998), ou pela incorporação do calcário antes da implantação do plantio direto (CAIRES et al., 2004).

Em SPD, mesmo em solos com elevada acidez, muitos estudos têm mostrado altas produtividades de milho e ausência de respostas da cultura à calagem superficial (PÖTTKER e BEN, 1998; CAIRES, BANZATTO e DA FONSECA, 2000; ALLEONI et al., 2003; TISSI et al., 2004; CAIRES et al., 2005). Esses resultados podem ser atribuídos aos elevados teores de matéria orgânica no plantio direto, à maior concentração de nutrientes na superfície do solo, além da adequada disponibilidade de água no solo. O aumento na capacidade de troca de cátions no solo, devido ao maior teor de matéria orgânica, pode proporcionar concentrações suficientes de cátions trocáveis, mesmo em solo com alta acidez (CAIRES et al., 1998). Além disso, há maior umidade nas camadas superficiais em SPD (SALTON e MIELNICZUK, 1995), devido à cobertura vegetal do solo, que reduz as perdas de água por evaporação. A diminuição da evaporação de água e consequente aumento na disponibilidade hídrica contribuem consideravelmente para o aumento na produção agrícola em SPD, em comparação com o sistema convencional de preparo do solo (TARKALSON, HERGERT e CASSMAN, 2006; MOUSSA-MACHRAOUI, ERRAUISSI, SAID-NOUIRA, 2010).

O crescimento radicular do milho também não tem sido muito alterado em SPD, mesmo em condições de elevada acidez e presença de Al em concentrações tóxicas, condições que são consideradas limitantes para o desenvolvimento das raízes. Caires et al. (2002) observaram, na ausência de déficit hídrico, que não houve limitação do crescimento radicular para concentração de $10 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} trocável em solo com elevado teor de matéria

orgânica, porém a calagem superficial melhorou a distribuição relativa de raízes na presença de solo compactado. De acordo com Rosolem et al. (1994), a calagem pode exercer efeito positivo sobre os parâmetros morfológicos das raízes, quando existe no solo camada compactada. Também, na ausência de déficit hídrico, Caires et al. (2008) não detectaram toxidez do Al no crescimento radicular do milho, entretanto no mesmo trabalho, para a cultura do trigo, em situação de déficit hídrico, o comprimento de raízes teve um aumento maior que 100% pela calagem na superfície, sendo determinado um nível crítico de $3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} trocável. A ausência de toxidez do Al em plantio direto tem sido atribuída à sua complexação com a matéria orgânica do solo, por meio de estudos de especiação química do Al na solução do solo sob SPD (BROWN et al., 2008; ALLEONI et al., 2010). A maior parte do Al na solução do solo em SPD encontra-se complexado com ânions orgânicos de alto peso molecular, em fração não tóxica às plantas, mesmo em diferentes condições de solo e clima (ALLEONI et al., 2010).

O melhoramento vegetal, ao selecionar cultivares tolerantes ao Al, busca criar genótipos com melhor desenvolvimento radicular em solos ácidos (VAN RAIJ et al., 1998), havendo diversos híbridos comerciais considerados tolerantes à presença de Al em teores tóxicos. No entanto, mesmo os genótipos de milho tolerantes ao Al e que conseguem aprofundar seu sistema radicular em solos ácidos apresentam, normalmente, respostas positivas à calagem em sistema convencional de preparo do solo (CANTARELLA, 1993). Prado (2001) testou diversos híbridos em plantio direto, com diferentes níveis de saturação por bases no cerrado, e concluiu que a utilização de híbridos específicos para cada nível de saturação por bases é uma importante ferramenta de manejo. Entretanto, a elevação da saturação por bases pela calagem superficial é altamente vantajosa economicamente para uma sucessão de culturas no SPD (CAIRES, BANZATTO e DA FONSECA, 2000; CAIRES et al., 2005), sendo muitas vezes desnecessária a utilização de híbridos com tolerância ao Al ao invés de corrigir adequadamente a acidez por meio da calagem. Van Raij et al. (1998),

relataram a mesma resposta positiva de híbridos de milho à calagem, independentemente se tolerante ou sensível ao Al, em experimento conduzido no sistema convencional de preparo do solo.

Mesmo híbridos que apresentam maior tolerância à presença de Al^{3+} , também apresentam problemas na absorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} em condições de alta acidez (MARIANO e KELTJENS, 2005). Conforme relatado por Ishitani et al. (2004), as características genéticas que proporcionam maior tolerância ao Al às plantas podem estar muitas vezes relacionadas à maior tolerância ao stress hídrico. Dessa forma, o uso de híbridos tolerantes ao Al pode ser uma alternativa interessante em solos corrigidos pela calagem na superfície em SPD, mas que apresentam alta acidez e Al em níveis tóxicos no subsolo, principalmente em situações de stress hídrico.

2.4. Influência do conteúdo de água do solo no desenvolvimento da cultura do milho em solos ácidos

O conteúdo de água no solo exerce grande influência na resposta da cultura do milho à calagem (GONZALES-ERICO et al., 1976; FREIRE, 1984). Em situação de adequada disponibilidade de água, é possível que a acidez do solo não comprometa tanto a produtividade das culturas, principalmente em SPD.

A química da solução do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas são diretamente influenciadas pelo conteúdo de água no solo. Em SPD, concentrações de Al^{3+} trocável consideradas tóxicas em solos ácidos (8 a 11 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) não têm causado restrição ao crescimento de raízes de milho (CAIRES et al., 2002; TISSI, CAIRES e PAULETTI, 2004), na ausência de limitação hídrica. Tais efeitos têm sido explicados pela presença de menor concentração de espécies tóxicas de Al (Al^{3+} e AlOH^{2+}), e maior concentração de Al complexado com ligantes orgânicos (SALET, ANGHINONI e KOCHHAN, 1999; ZAMBROSI et al., 2007; DIEHL, MIYAZAWA e TAKAHASHI, 2008; BROWN et al., 2008; ALLEONI et al., 2010). No entanto, há indicativos de que, em condições de seca, pode

ocorrer aumento na atividade do Al complexado com a matéria orgânica do solo (CAIRES et al., 2008; CAIRES, 2007).

A complexação de Al^{3+} com ligantes orgânicos de baixo peso molecular pode ser uma explicação para a ocorrência de altas produtividades das culturas em solos ácidos no SPD. No entanto, a complexação do Al com esses compostos orgânicos pode ter efeito de curto prazo e não ser realmente efetiva em condições de campo (MORAES et al., 2007). O conteúdo de água no solo influencia diretamente a formação e manutenção de ligantes orgânicos hidrossolúveis na solução do solo, que podem diminuir drasticamente em condições de menor umidade no solo (CHRIST e DAVID, 1996).

Alterações no conteúdo de água no solo podem influenciar a atividade do Al^{3+} em solução. À medida que se reduz o conteúdo de água na solução do solo, nota-se uma tendência de liberação de cátions de maior valência da fase sólida para a solução, aumentando a sua atividade (MISRA e TYLER, 1999; DYERS et al., 2008). Em solos com altos teores de Al^{3+} trocável, pode haver aumento na sua atividade em condições de seca, ocorrendo o inverso em condições de alta umidade no solo. No entanto, não foram encontrados estudos com especiação química do Al na solução do solo em diferentes situações de umidade.

A atividade do Al na solução do solo tem resultado em implicações importantes na definição de critérios ou índices de tomada de decisão para a recomendação de calagem em SPD. Porém, é preciso certo cuidado com esse tipo de implicação porque a complexação do Al com ligantes orgânicos e a toxicidade do Al para as plantas cultivadas em SPD precisam ser mais estudadas em condições de seca (CAIRES, 2007).

Há um grande interesse na busca de alternativas para propiciar condições adequadas para o desenvolvimento das culturas, de maneira a diminuir os prejuízos causados por períodos de seca na produtividade. Portanto, torna-se necessária uma melhor compreensão dos efeitos da correção da acidez do solo em longo prazo no SPD, e quais as principais diferenças

resultantes da presença ou ausência de stress hídrico no desenvolvimento das plantas em solos ácidos sob esse sistema.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Experimento realizado no campo

3.1.1. Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado no município de Ponta Grossa (PR), Fazenda Estância dos Pinheiros, cujas coordenadas geográficas são 25°07'50" de latitude sul e 50°15'13" de longitude oeste, e altitude de 840 m. A área experimental tem sido manejada em SPD desde o ano de 1978, totalizando 32 anos nesse sistema, sendo uma das áreas mais antigas em plantio direto do país. Informações adicionais referentes às culturas e adubações utilizadas antes da instalação do experimento podem ser verificadas em FELDHAUS (2006).

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 freqüentes no inverno, não apresentando estação seca definida (MAACK, 1981). A precipitação pluvial média histórica na região é de 1550 mm anuais. A temperatura média histórica é de 17,8 °C, com média máxima de 24,1 °C e média mínima de 13,3 °C (IAPAR, 2009).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distrófico textura média. Os resultados de análises químicas (PAVAN et al., 1992), em diferentes profundidades do solo, realizadas antes da instalação do experimento em 2004, são mostrados na Tabela 1. Nota-se que o solo apresentava baixo pH, teores tóxicos de Al^{3+} e baixos teores de Ca e Mg. Na camada de 0-20 cm, análises granulométricas (EMBRAPA, 1997) indicaram os teores de 465 g kg⁻¹ de argila, 240 g kg⁻¹ de silte e 295 g kg⁻¹ de areia. Na fração argila,

análises mineralógicas (ALLEONI et al., 2010) indicaram predomínio de caulinita (265,8 g kg⁻¹), 2,4 g kg⁻¹ de hematita e 26,8 g kg⁻¹ de goethita.

Tabela 1. Resultados de análises químicas do solo, em diferentes profundidades, antes da instalação do experimento em 2004.

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.

3.1.2. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com três repetições. Nas parcelas foram aplicados quatro tratamentos de calagem. Os tratamentos consistiram de nas seguintes doses de calcário dolomítico (31% de CaO e 23% de MgO) com 85% de poder relativo de neutralização total (PRNT): 0, 4, 8 e 12 t ha⁻¹, calculadas visando elevar a saturação por bases do solo (V), na 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.

3.1.3. Sucessão de culturas

A sucessão de culturas do experimento foi: aveia-preta (2004), milho (2004-2005), aveia-preta (2005), soja (2005-2006), aveia-preta (2006), soja (2006-2007), aveia-preta (2007), soja (2007-2008), aveia-preta (2008) e milho (2008-2009). Destaca-se o contínuo acúmulo de palha no sistema, por meio do uso da aveia-preta no inverno. No presente trabalho avaliaram-se os efeitos da calagem, realizada em 2004, no desempenho do milho cultivado em 2008-2009.

3.1.4. Cultura do milho

O híbrido de milho utilizado foi o P-30F53, que possui elevado potencial produtivo, com superprecocidade e elevada resposta ao manejo da adubação e da cultura em geral. Trata-se de híbrido simples com elevada estabilidade (PIONEER, 2009).

Como não foram encontradas informações precisas na literatura referentes à tolerância do P-30F53 ao Al, realizou-se teste desse genótipo quanto à sua de tolerância ao Al, em laboratório. O teste, baseado na metodologia proposta por Mazzocato et al. (2002), foi feito a partir da comparação do híbrido em questão com um híbrido comprovadamente sensível ao alumínio (P-32R22) e outro comprovadamente tolerante (DKB 747). As sementes dos três híbridos foram colocadas em câmara de germinação, permanecendo por 48 h. Após a retirada da câmara, as plântulas foram colocadas em solução contendo 40 mg L⁻¹ de Ca e 6 mg L⁻¹ de Al, adicionados na forma de CaCl₂ e AlCl₃. Efetuaram-se medidas do comprimento da raiz principal das plântulas, antes delas serem colocadas em solução e após 96 h em solução. A partir dessas medidas foi realizado o cálculo do índice de tolerância relativa (FURLANI e FURLANI, 1991). A partir desse cálculo, que considerou o índice 1 para o material sensível (P-32R22) e o índice 5 para o material tolerante (DKB 747), o índice médio obtido para o P-30F53 foi 3,12. O híbrido P-30F53 foi, assim, considerado de moderada sensibilidade ao Al.

A semeadura do milho foi realizada em 25 de setembro de 2008. A adubação básica utilizada na semeadura foi de 21 kg ha⁻¹ de N, 84 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 35 kg ha⁻¹ de K₂O. Aos 30 dias após a semeadura foi realizada a adubação de cobertura aplicando-se 113 kg ha⁻¹ de N, a lanço, na forma de uréia e 72 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de KCl.

3.1.5. Precipitação pluvial e temperatura

Na Figura 1 estão apresentados os dados de precipitação pluvial e temperatura ocorridos no período em que a cultura esteve no campo, entre os meses de setembro de 2008 e março de 2009 (SEAB, 2009), e também a precipitação pluvial média dos últimos 45 anos na região, obtidos da estação meteorológica do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR).

Observa-se que houve grande desuniformidade no regime de chuvas durante o período de desenvolvimento da cultura do milho. Nos meses de setembro, novembro e dezembro, a precipitação pluvial ocorrida foi inferior à média histórica.

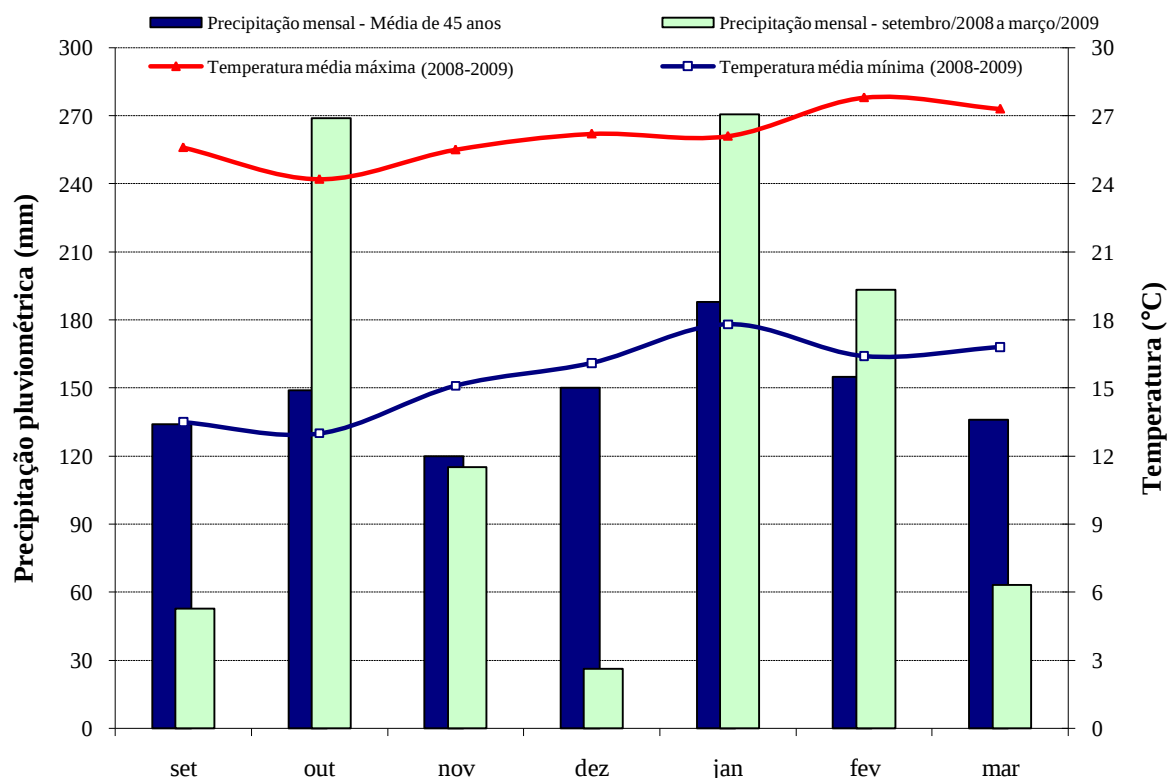


Figura 1. Dados climáticos de Ponta Grossa, PR. Precipitação pluvial média mensal da região (45 anos), precipitação pluvial mensal ocorrida durante a realização do experimento (setembro/2008 a março/2009) e temperaturas médias máximas e mínimas ocorridas no mesmo período (SEAB, 2009).

A Tabela 2 mostra os dados de precipitação pluvial, e a necessidade hídrica da cultura do milho, em quatro (4) fases de desenvolvimento, estabelecidas pela demanda hídrica média para a cultura, de acordo com a proposição de ANDRADE et al. (2006). Durante a fase 1, correspondente ao início do desenvolvimento da cultura, a precipitação pluvial ocorrida foi satisfatória. Na fase 2, que também compreende a fase de desenvolvimento vegetativo, e na fase 3, que abrange o início do florescimento, a precipitação pluvial total ocorrida no período foi similar à demanda da cultura, entretanto a disponibilidade de água não foi regularmente distribuída nesse período.

Tabela 2. Precipitação pluvial ocorrida e necessidade hídrica em diferentes fases de desenvolvimento da cultura do milho, safra 2008-2009. Modelo adaptado de ANDRADE et al. (2006)

Fase de Desenvolvimento	Nº dias	Período	Necessidade Hídrica	Precipitação pluvial no período
			mm	mm
Fase 1	29	25/09 – 23/10	65	221
Fase 2	48	24/10 – 10/12	175	174
Fase 3	54	11/12 – 02/02	280	296
Fase 4	39	03/02 – 13/03	120	247

3.1.6. Avaliações

3.1.6.1. Análises de solo

Para avaliação dos efeitos da calagem, foi realizada a coleta de solo, após a colheita do milho, em abril de 2009. Foram retiradas amostras nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm. 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 parcela para compor uma amostra composta. Nas profundidades de 20-40 e 40-60 cm, foram retiradas cinco subamostras, por meio de trado holandês, para formar uma amostra composta. As amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar à 40°C, moídas e passadas em peneira de malha 2 mm. Foi determinado o pH em CaCl_2 0,01 mol L⁻¹, e os teores de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos por KCl 1 mol L⁻¹. Para o cálculo da saturação por bases (V%), foram determinados também a acidez potencial (H+Al), pelo método tampão SMP, e o K⁺ trocável, por meio de extração com a solução de Mehlich-1 (PAVAN et al., 1992).

3.1.6.2. Diagnose foliar

Para a determinação dos teores de nutrientes nas folhas de milho foi coletada, no início do florescimento da cultura, a folha imediatamente abaixo e oposta à espiga em 30 plantas por parcela. As folhas foram lavadas em água deionizada e, depois de retirar as extremidades e a nervura, as amostras foram colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60 °C. Posteriormente, as amostras foram moídas e digeridas com solução sulfúrica para a determinação de N, e com solução nítrico-perclórica para a determinação de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn. Os teores de N foram determinados pelo método semi-

micro-Kjeldhal, de P por colorimetria do metavanadato, de K por fotometria de chama de emissão, de S por turbidimetria do sulfato de bário, e de Ca, Mg, Cu, Fe, Zn e Mn por espectrofotometria de absorção atômica, de acordo com os métodos descritos em Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

3.1.6.3. Extração de nutrientes e massa seca da parte aérea

No estágio vegetativo R6 (maturação fisiológica) da cultura do milho, retirou-se 1 m de plantas, por parcela, as quais foram separadas em folhas, colmos e espigas, lavadas com água deionizada, secas em estufa a 60 °C e pesadas. Após, foram moídas para determinação de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn, utilizando os métodos descritos no item 3.1.6.2. Os dados de produção de matéria seca e de concentração de nutrientes na parte aérea foram utilizados para estimar a extração de nutrientes pela parte aérea da cultura do milho.

3.1.6.4. Sistema radicular

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. Para dispersão do solo e separação das raízes, as amostras foram lavadas com água em peneira com malha de 0,5 mm. A densidade de comprimento das raízes foi avaliada pelo método proposto por Tennant (1975) e o raio médio e a superfície radicular de acordo com Schenk e Barber (1979).

3.1.6.5. Produtividade e concentração de nutrientes nos grãos

A produtividade do milho foi avaliada por meio de colheita manual e posterior trilhagem em máquina debulhadora estacionária. Foram colhidos 10 m² centrais de cada parcela desprezando-se as bordaduras. Após a debulha, os grãos foram pesados determinando-se, então, o rendimento de grãos a 130 g kg⁻¹ de umidade. Para a determinação dos teores de nutrientes, os grãos foram moídos em liquidificador industrial e, posteriormente, foram

utilizados os mesmos procedimentos já descritos para a diagnose foliar para determinação da concentração de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn nos grãos.

3.1.7. Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas seguindo o modelo em blocos ao acaso. Para as doses de calcário, ajustaram-se equações de regressão por polinômios ortogonais aos dados obtidos em função dos tratamentos, utilizando-se as médias das observações. Consideraram-se apenas os ajustes com significância ao nível de 5%. Correlações foram feitas entre os atributos de químicos do solo e os atributos avaliados na cultura do milho, testando-se 14 modelos matemáticos. Os modelos foram escolhidos de acordo com a magnitude do coeficiente de determinação. Foram utilizados os pacotes estatísticos SISVAR, versão 5.1 para análise de variância e regressão, e SAEG, versão 9.0 para as análises de correlação.

3.2. Experimento realizado em colunas de solo

Com o objetivo de isolar os efeitos da água e de diferentes híbridos de milho em função das doses de calcário aplicadas no campo, foram coletadas colunas indeformadas de solo da área experimental e conduzidas para ambiente protegido.

3.2.1. Retirada das colunas indeformadas de solo

No início da emergência do milho em 2008 retiraram-se quatro amostras indeformadas de solo de cada parcela, dos tratamentos testemunha sem calcário e com 4, 8 e 12 t ha⁻¹ de calcário na superfície em 2004, nas três repetições do experimento de campo. Análises de solo foram realizadas antes da retirada das colunas nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (Tabela 3). Nota-se que o solo estava com alta acidez, com teores tóxicos de Al³⁺ e baixo conteúdo de Ca²⁺ e Mg²⁺ no tratamento sem calcário. Por outro lado, com a aplicação de calcário, o solo encontrava-se adequadamente corrigido nas profundidades avaliadas.

Tabela 3. Atributos químicos do solo da área experimental, coletado antes da semeadura do milho em 2008, após a aplicação superficial de calcário realizada em 2004.

Calcário	Prof.	pH (CaCl ₂)	H+Al	Al	Ca	Mg	K	P	C	V	m
t ha ⁻¹	cm		-----mmol _c dm ⁻³ -----					mg dm ⁻³	g dm ⁻³	----- % -----	
0	0-5	4,2	95,9	11,3	10,7	6,3	2,2	6,8	21,8	11,2	37
	5-10	4,1	105,8	15,0	4,0	3,5	1,2	13,3	15,3	4,4	47,8
	10-20	4,1	99,5	15,3	4,3	3,0	0,8	4,3	15,7	4,6	65,4
4	0-5	5,4	48,6	0,7	34,7	19,7	2,0	7,8	18,9	44,1	1,2
	5-10	4,9	69,7	2,0	23,3	12,1	1,0	12,0	17,7	25,9	5,2
	10-20	4,5	90,1	9,0	7,0	8,2	0,7	4,1	16,4	8,1	36,1
8	0-5	5,9	33,5	0,0	41,0	19,5	2,5	6,6	20,7	57,6	0,0
	5-10	5,3	57,0	1,3	27,7	17,7	1,0	11,8	19,6	34,3	2,7
	10-20	4,7	79,6	6,7	13,0	8,0	0,7	4,0	17,2	14,3	23,6
12	0-5	6,2	26,1	0,0	45,0	26,0	2,2	10,3	21,7	65,0	0,0
	5-10	5,7	44,2	0,0	29,3	18,5	1,2	20,2	16,0	42,1	0,0
	10-20	4,9	65,5	3,7	19,0	14,3	0,7	7,5	15,7	23,1	9,8

Para a coleta das colunas, foram utilizados tubos de poli-cloreto de vinila (PVC), medindo 0,20 m de altura e 0,15 m de diâmetro. A retirada das colunas foi realizada com o auxílio de uma caçamba basculante com acionamento hidráulico, de maneira que a força aplicada para a elevação da caçamba foi utilizada para enterrar os tubos de PVC no solo (Figura 2). Após, as amostras foram retiradas escavando-se as laterais e transportadas para a condução do experimento.



Figura 2. Coleta de amostras indeformadas realizadas na área experimental, com o uso de caçamba hidráulica.

3.2.2. Localização do experimento

O experimento foi conduzido no Campus da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), cujas coordenadas geográficas são 25°05'25" de latitude sul e 50°06'12" de longitude oeste, e altitude de 905 m. As colunas foram acondicionadas em estufa plástica protegida da ocorrência de chuvas.

3.2.3. Delineamento experimental

O experimento foi instalado no delineamento em blocos totalmente aleatorizados, em esquema fatorial $4 \times 2 \times 2$, com três repetições. Nas quatro colunas coletadas dentro de cada parcela da área experimental, foram feitas subdivisões em dois níveis de água (50 e 80% do volume total de poros, metodologia adaptada de Freire (1984)) e dois híbridos (P-30F53 e P-32R22). Utilizou-se o mesmo híbrido semeado no campo experimental (P-30F53), com sensibilidade moderada ao Al (item 3.1.4.), e mais um híbrido reconhecidamente sensível ao Al (P-32R22). Dessa maneira, os fatores testados no experimento foram: doses de calcário (4), nível de água (2) e híbrido de milho (2).

3.2.4. Instalação e condução do experimento

A semeadura do milho nas colunas de solo foi realizada colocando-se seis sementes em cada coluna. No momento da semeadura, foi realizada a adubação com N-P₂O₅-K₂O por meio de sulcos realizados manualmente, nas mesmas quantidades aplicadas no campo, descrito no item 3.1.4., pela transformação da quantidade em kg ha⁻¹ da área experimental para a área superficial em cada coluna (176,7 cm²). Após a semeadura, as amostras foram irrigadas diariamente, visando manter os níveis de água previamente estabelecidos. Após a emergência efetuou-se desbaste, mantendo duas plantas por coluna de solo. Aos 30 dias após a emergência, foi feita adubação com N e K nas colunas, também de acordo com a adubação realizada na área experimental.

3.2.5. Avaliações

Aos 40 dias após a emergência, as plantas foram cortadas na base, lavadas em água deionizada, colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C e, posteriormente, determinou-se a massa seca. Depois, as amostras de plantas foram moídas para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn, utilizando-se os mesmos métodos descritos no item 3.1.6.2. (MALAVOLTA, VITTI e OLIVEIRA, 1997).

Logo após a retirada das plantas, os tubos foram seccionados nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Essas amostras foram lavadas para dispersão do solo, e separadas as raízes, sendo determinados os atributos radiculares, conforme a metodologia descrita no item 3.1.6.4.

3.2.6. Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas considerando o delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial $4 \times 2 \times 2$. Na ausência de interação significativa, ajustaram-se equações de regressão por polinômios ortogonais aos dados obtidos em função das doses de calcário, utilizando-se as médias das observações, considerando o nível de 5% para significância. Para os fatores níveis de água e híbridos, foi aplicado o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Na presença de interação significativa, realizou-se o desdobramento da interação, ajustando-se equações de regressão por polinômios ortogonais aos dados de doses de calcário para cada nível de água e para cada híbrido. Nesse caso, os níveis de água para cada dose de calcário ou para cada híbrido, e também os diferentes híbridos em cada dose de calcário e nível de água, foram comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5%. Análises de correlação linear foram realizadas entre os atributos químicos do solo antes da instalação do experimento e os atributos avaliados na planta. Foram utilizados os pacotes estatísticos SISVAR, versão 5.1 para análise de variância, regressão e comparação de médias (Tukey) e SAEG, versão 9.0 para as análises de correlação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento conduzido no campo

4.1.1. Alterações nos atributos químicos de acidez do solo

O calcário aplicado na superfície do solo em maio de 2004 aumentou o pH(CaCl_2) do solo em todas as camadas estudadas (Figura 3), sendo de maior magnitude nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Houve resposta quadrática na camada de 0-5 cm, sendo que a partir da equação obtida, o máximo valor de pH estimado foi 6,02, correspondente à dose de $9,5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário. Isso indica que uma parte do calcário ainda não foi totalmente solubilizada após 59 meses, na maior dose aplicada (12 t ha^{-1}). Caires et al.(2005) observaram que o máximo incremento no pH do solo na camada 0-5 cm com a aplicação de calcário ocorreu 2,5 anos após a calagem. No entanto, a máxima dose utilizada nesse trabalho foi 6 t ha^{-1} , metade da dose máxima aplicada no presente estudo, o que pode explicar tal diferença, apesar das doses máximas calculadas em ambas as situações terem sido com o objetivo de elevar a saturação por bases a 90% no mesmo tipo de solo.

A ação neutralizante do calcário no solo normalmente não ultrapassa o pH em CaCl_2 de 6,5, devido à redução de sua solubilidade nesse nível de pH (ALCARDE e RODELLA, 2003). Na camada de 5-10 cm, o aumento foi linear, da ordem de 0,12 unidades de pH, para cada tonelada de calcário aplicado. Nas camadas de 10-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm,

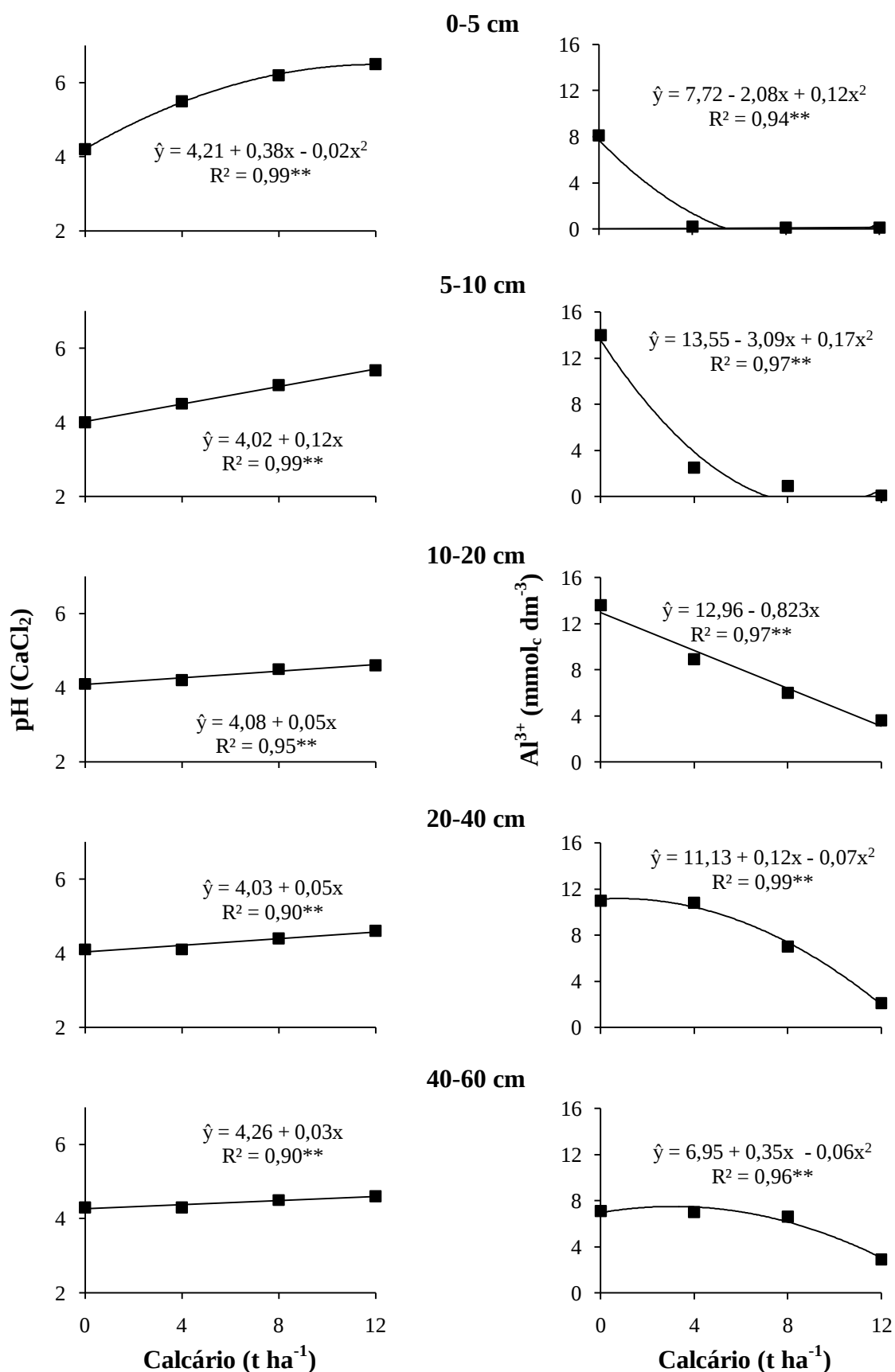


Figura 3. Alterações nos valores de pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e nos teores de Al³⁺ trocável do solo nas diferentes profundidades estudadas, 59 meses após a aplicação de doses de calcário na superfície, em 2004. *: P<0,05 e **:P<0,01

o calcário também proporcionou aumento no pH, porém de menor magnitude, principalmente no subsolo. Na ausência de calcário, o pH manteve-se em torno de 4,0 em todas as profundidades, sendo, portanto, uma situação de alta acidez.

Os teores de Al^{3+} trocável foram diminuídos significativamente em todas as camadas estudadas (Figura 3). Nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, houve neutralização total do Al^{3+} nas doses estimadas de 6,08 e 8,11 t ha⁻¹, respectivamente. O teor de Al^{3+} trocável encontrado na ausência de calcário na camada 0-5 cm foi consideravelmente menor que na camada 5-10 cm. A camada superficial é a mais afetada pelos resíduos deixados sobre a superfície no plantio direto, havendo maior acúmulo de matéria orgânica nessa camada. A menor concentração de Al^{3+} na fração trocável encontrada nessa profundidade, principalmente na ausência de calcário, pode ser explicada pela ocorrência de Al complexado com ligantes orgânicos no SPD (BROWN et al., 2008; ALLEONI et al., 2010). Em adição, pode ocorrer maior acidificação na camada 5-10 cm, devido à deposição de fertilizantes no sulco de semeadura, localizando-se principalmente nessa profundidade. Nas camadas superficiais do solo, se observa também que a diminuição no teor de Al^{3+} trocável foi reflexo do aumento no pH, sendo que a partir do valor estimado de pH 6,08 na camada 0-5 cm, e 4,99 na camada 5-10 cm, não houve a presença de Al^{3+} trocável. A influência do pH no teor de Al^{3+} é amplamente conhecida em solos com cargas variáveis (VAN RAIJ, 1991), de maneira que nesses solos, com cargas dependentes de pH, é quimicamente pouco provável a ocorrência de Al^{3+} em pH(CaCl₂) maior que 5,0. Isso foi comprovado por Abreu Jr., Muraoka e Lavorante (2003), que estudaram as relações entre a acidez do solo e os atributos químicos em 26 solos brasileiros e constataram que o teor de Al^{3+} trocável diminuiu drasticamente com o aumento do pH em CaCl₂ até 5,5.

Nas camadas mais profundas, de 20-40 e 40-60 cm, pode-se verificar grandes reduções no teor de Al^{3+} trocável com a aplicação de calcário, principalmente nas doses mais elevadas,

que também foi um reflexo do aumento no pH dessas camadas com a aplicação de calcário (Figura 3).

Apesar de o pH do solo ter aumentado em pequena magnitude com as doses de calcário nessas camadas, houve importantes incrementos nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis (Figura 4). Pela maior similaridade no tamanho do raio iônico com Al^{3+} e maiores teores no solo, o Ca^{2+} exerce maior influência nos teores de Al^{3+} que o Mg^{2+} . Por serem positivamente carregados, Al^{3+} e Ca^{2+} competem pelos mesmos sítios de adsorção na fase sólida do solo e também pelos mesmos locais de absorção nos tecidos vegetais. Dessa maneira, o aumento nos teores de Ca^{2+} no solo pode promover diminuição na atividade do Al em solução, como foi observado no teor de Al^{3+} , e principalmente, na saturação por alumínio (Figura 5).

Na profundidade de 40-60 cm, o teor médio do Al^{3+} trocável foi menor que na camada de 20-40 cm (Figura 3). Uma explicação para esse comportamento é a possível retenção de ânions em camadas mais profundas em solos tropicais e subtropicais com cargas variáveis, decorrente do balanço de cargas positivas em maiores profundidades. Dessa forma, nessas camadas pode haver ânions que formam complexos estáveis com Al^{3+} , diminuindo a sua atividade, deixando assim o Al na forma não trocável. Além disso, há a ação dos minerais da fração argila, que podem complexar o Al em determinadas faixas de pH (BROWN et al., 2008; ALLEONI et al., 2010). Menores teores de Al^{3+} trocável nas camadas mais profundas também foram observados por Caires et al. (2008), no mesmo tipo de solo do presente estudo. Porém, na ausência de calcário, em todas as camadas estudadas, os teores de Al^{3+} trocável encontrados são considerados tóxicos para a maioria das culturas.

De maneira geral, os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis foram incrementados com a aplicação de calcário em praticamente todas as camadas estudadas, proporcionando, na presença da calagem, boa disponibilidade desses nutrientes em superfície e subsuperfície (Figura 4). As respostas quadráticas observadas nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm confirmando que, na dose mais elevada de calcário, não houve total liberação de Ca^{2+} e Mg^{2+}

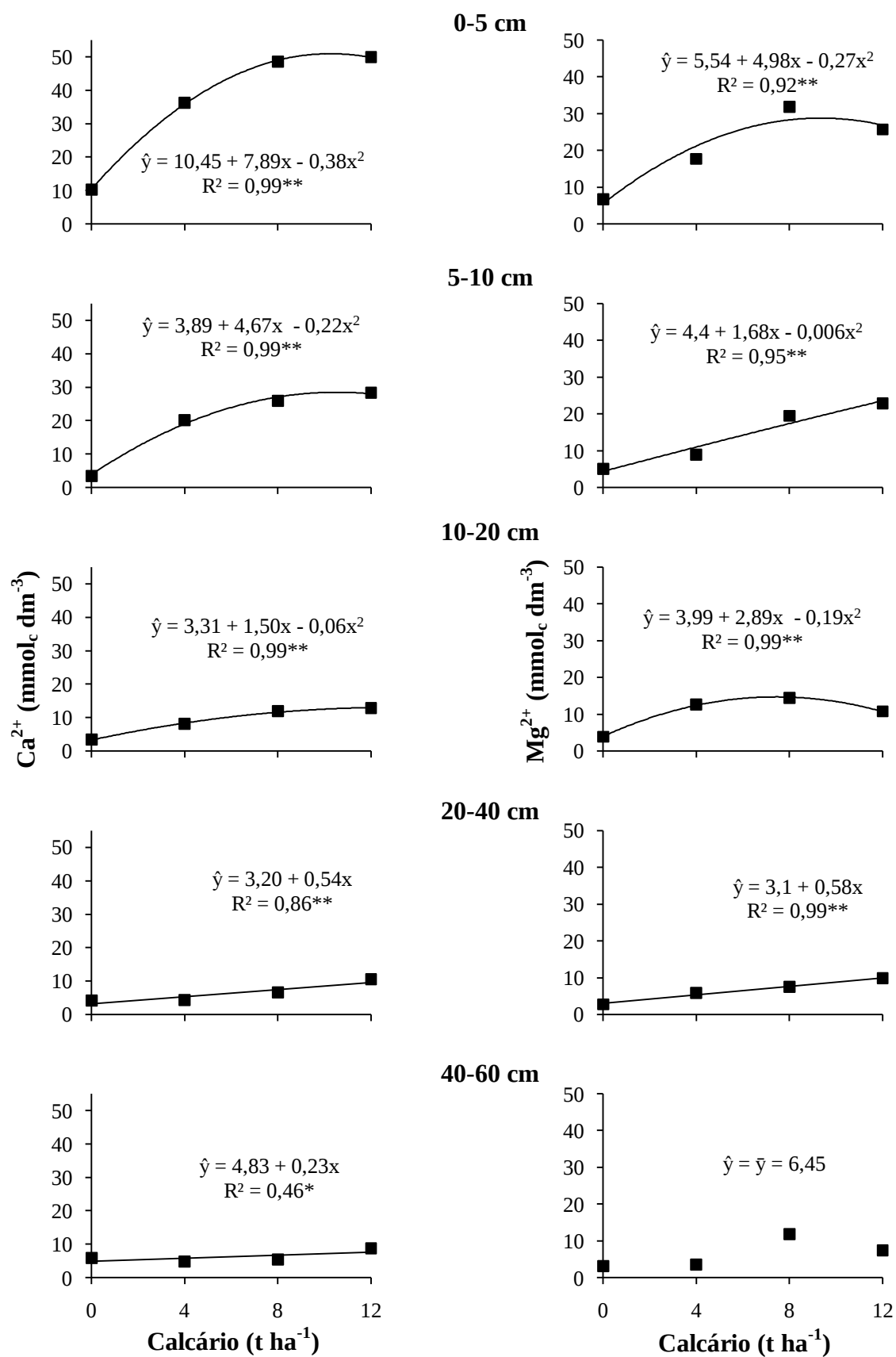


Figura 4. Alterações nos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis do solo em diferentes profundidades, 59 meses após a aplicação de doses de calcário na superfície, em 2004. *: P<0,05 e **: P<0,01.

adicionados pelo calcário dolomítico aplicado em 2004. Foram obtidos altos teores de Ca^{2+} nas camadas superficiais com a aplicação de calcário, o que dificulta a reação de dissolução de CaCO_3 . Nas camadas do subsolo (20-40 e 40-60 cm), o aumento no teor de Ca^{2+} foi linear com as doses de calcário aplicadas, na magnitude de $0,54 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para cada tonelada de calcário aplicada na camada de 20-40 cm, e de $0,23 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 40-60 cm. De acordo com a reação de dissolução do calcário ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$), a alta concentração de Ca^{2+} no meio pode dificultar a solubilização do CaCO_3 . Os altos teores de Ca^{2+} e pH (CaCl_2) encontrados nas camadas superficiais acabam dificultando a ocorrência da reação em presença de altas doses de calcário, fazendo com que esses efeitos sejam de longa duração. O aumento de Ca^{2+} trocável ocorrido no subsolo pode ter sido ocasionado por diversos mecanismos, tais como a movimentação física de partículas de calcário pela água percolada no perfil (AMARAL et al., 2004), a formação de par iônico com NO_3^- proveniente da adubação, causando a lixiviação de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ para camadas mais profundas (CAIRES, 2007) e a formação de complexos organo-metálicos hidrossolúveis, mecanismo sugerido para lixiviação de Ca^{2+} e Mg^{2+} após a aplicação de calcário, na presença de resíduos vegetais no solo (MIYAZAWA, PAVAN e FRANCHINI, 2002).

Os teores de Mg^{2+} trocável apresentaram comportamento similar ao Ca^{2+} trocável nas camadas superficiais do solo, com resposta quadrática nas camadas de 0-5 e 10-20 cm, também indicando que o calcário dolomítico aplicado em 2004 não se solubilizou totalmente nas doses mais elevadas. No subsolo, houve aumento linear no teor de Mg^{2+} trocável na profundidade de 20-40 cm com as doses de calcário, mas a calagem não influenciou o Mg^{2+} trocável na profundidade de 40-60 cm.

O aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram refletidos nas alterações da saturação por bases (V%) do solo (Figura 5) em todas as camadas estudadas. Na camada de 0-20 cm, o valor médio de saturação por bases nas doses mais elevadas de calcário não ultrapassou 50%. No entanto, as doses de 8 e 12 t ha^{-1} foram aplicadas para elevar a saturação por bases a 65%

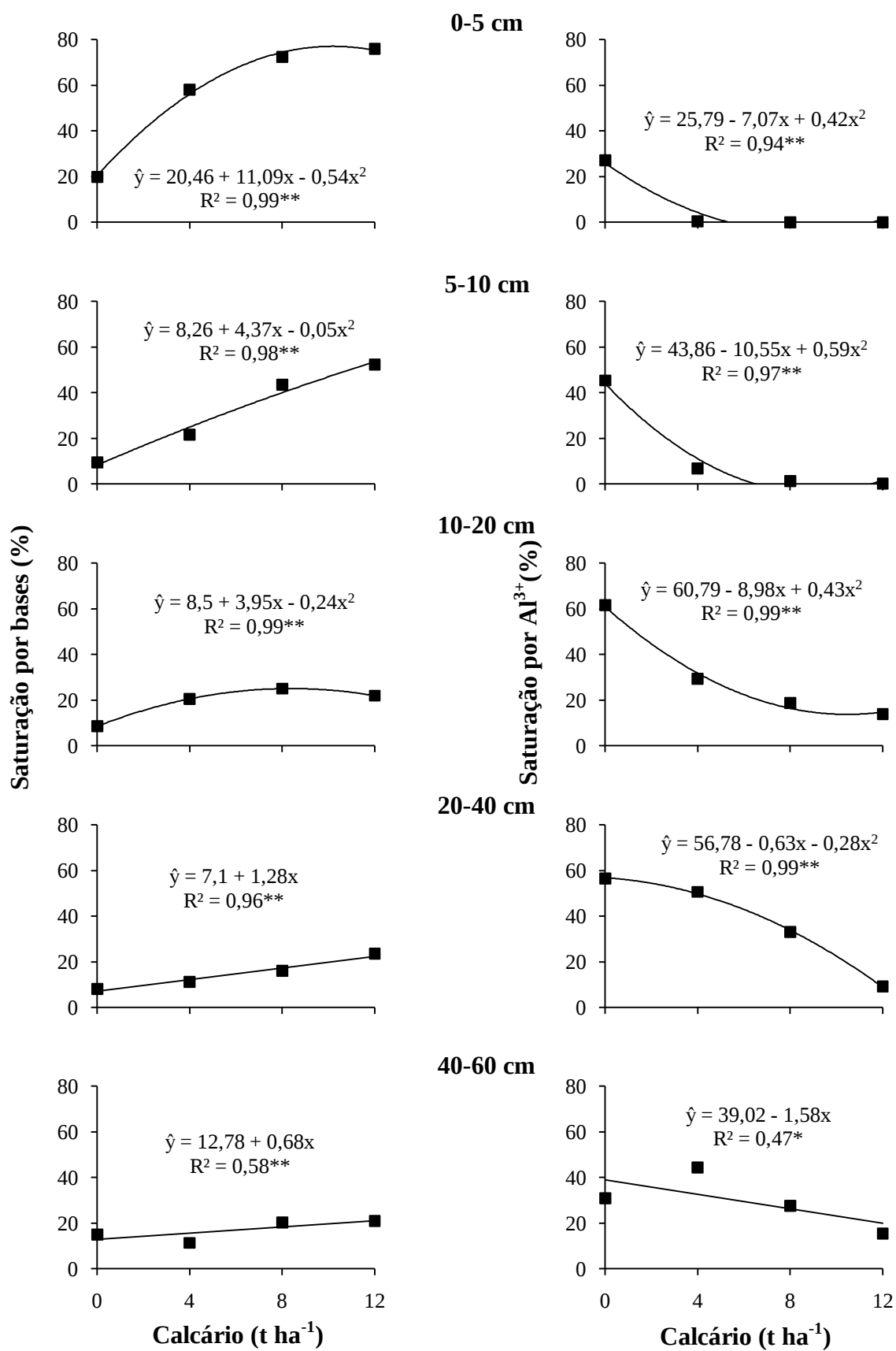


Figura 5. Alterações nos valores de saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) em diferentes profundidades, 59 meses após a aplicação de doses de calcário na superfície, em 2004.
*: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$

e 90% respectivamente. A ocorrência de valores de saturação por bases determinados após a calagem inferior aos calculados é bem conhecida, e pode ocorrer devido às frações mais grosseiras em calcários com baixo PRNT, e principalmente pelo fato da CTC potencial estimada pela análise de solo ser provavelmente inferior à verdadeira CTC a pH 7,0 do solo. No presente estudo, o PRNT foi corrigido para o cálculo das doses. Portanto esse efeito deve ter ocorrido porque o calcário foi aplicado em superfície, apresentado maior reação na camada superficial do solo. Percebe-se que boa parte do calcário aplicado na superfície ainda estava concentrado na camada de 0-5 cm, pelos altos valores de pH encontrados nessa camada, indicando que o calcário ainda não havia se solubilizado totalmente nas maiores doses aplicadas. Por outro lado, o aumento linear nas camadas do subsolo mostra a movimentação do calcário, como foi observado nos aumentos de Ca^{2+} e Mg^{2+} nessas camadas. Entretanto, a elevação na saturação por bases dessas camadas não foi de grande magnitude.

A saturação por Al^{3+} diminuiu com a aplicação de calcário em todas as profundidades (Figura 5), diretamente relacionada com a redução nos teores de Al^{3+} trocável (Figura 3). A saturação por Al^{3+} pode ser diminuída com a calagem mesmo na presença de baixo valor pH, devido ao aumento na saturação por bases pelo incremento de Ca^{2+} e Mg^{2+} proporcionado pela aplicação de calcário dolomítico. No presente trabalho, a saturação por Al^{3+} permaneceu em valores baixos com a aplicação de calcário, mesmo nas camadas mais profundas do solo.

4.1.2. Atributos de crescimento radicular do milho

Os atributos de crescimento radicular do milho foram influenciados significativamente pelos tratamentos de calagem, nas profundidades estudadas. A densidade de comprimento de raízes foi incrementada na camada 0-10 cm com a aplicação de calcário (Figura 6). As doses de calcário aplicadas na superfície reduziram o raio médio de raízes nas camadas de 10-20 e 20- 40 cm (Figura 6). Em média, a distribuição do sistema radicular concentrou-se na proporção de 36,2% (0-10 cm), 15,3% (10-20 cm), 25,4% (20-40 cm) e 23,1% (40-60 cm), sem influência dos tratamentos de calagem. A superfície radicular de raízes não foi afetada

pela aplicação de calcário em nenhuma das camadas amostradas, apresentando média de $238,2 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$ para todas as profundidades.

A redução no raio médio de raízes com a calagem, observada nas profundidades de 10-20 e 20-40 cm (Figura 6), coincide com as profundidades em que foram encontrados os maiores teores de Al^{3+} trocável na ausência de calcário (Figura 3).

O aumento no crescimento de raízes na camada superficial observado pelo atributo densidade de comprimento radicular demonstra o efeito positivo exercido pela calagem. As raízes da maior parte das plantas cultivadas não se desenvolvem bem em solos ácidos, principalmente pela deficiência de Ca e/ou excesso de Al. Porém, no SPD, concentrações de Al^{3+} trocável consideradas tóxicas em solos ácidos não têm causado restrição ao crescimento de raízes de milho (CAIRES et al., 2002; TISSI, CAIRES e PAULETTI, 2004) na ausência de limitação hídrica. Esses autores, no entanto, encontraram teores de Al^{3+} menores que os observados no presente trabalho, entre 8 e $10 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, na ausência de calcário. No presente estudo, os teores de Al^{3+} encontrados foram $8,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada de 0-5 cm, e $14,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada de 5-10 cm. Portanto, o alto teor de Al^{3+} encontrado na superfície limitou o desenvolvimento radicular nessa camada, assim como o acréscimo nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} também favoreceu o crescimento de raízes na superfície devido à aplicação de calcário. Esses resultados foram comprovados pelos altos coeficientes de correlação obtidos na camada de 0-10 cm (Tabela 4). Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, houve períodos de stress hídrico (Figura 1), o que também pode ter potencializado o efeito fitotóxico do Al, favorecendo assim a resposta positiva à calagem.

Alguns trabalhos têm demonstrado que em SPD há menor concentração de espécies tóxicas de Al na solução do solo e maior concentração de Al complexado com ligantes orgânicos (SALET, ANGHINONI e KOCHHAN, 1999; ZAMBROSI et al., 2007, BROWN et al., 2008; ALLEONI et al., 2010). No entanto, há indícios de que a complexação do Al com ligantes orgânicos não é efetiva quando se tem situações de deficiência hídrica no solo.

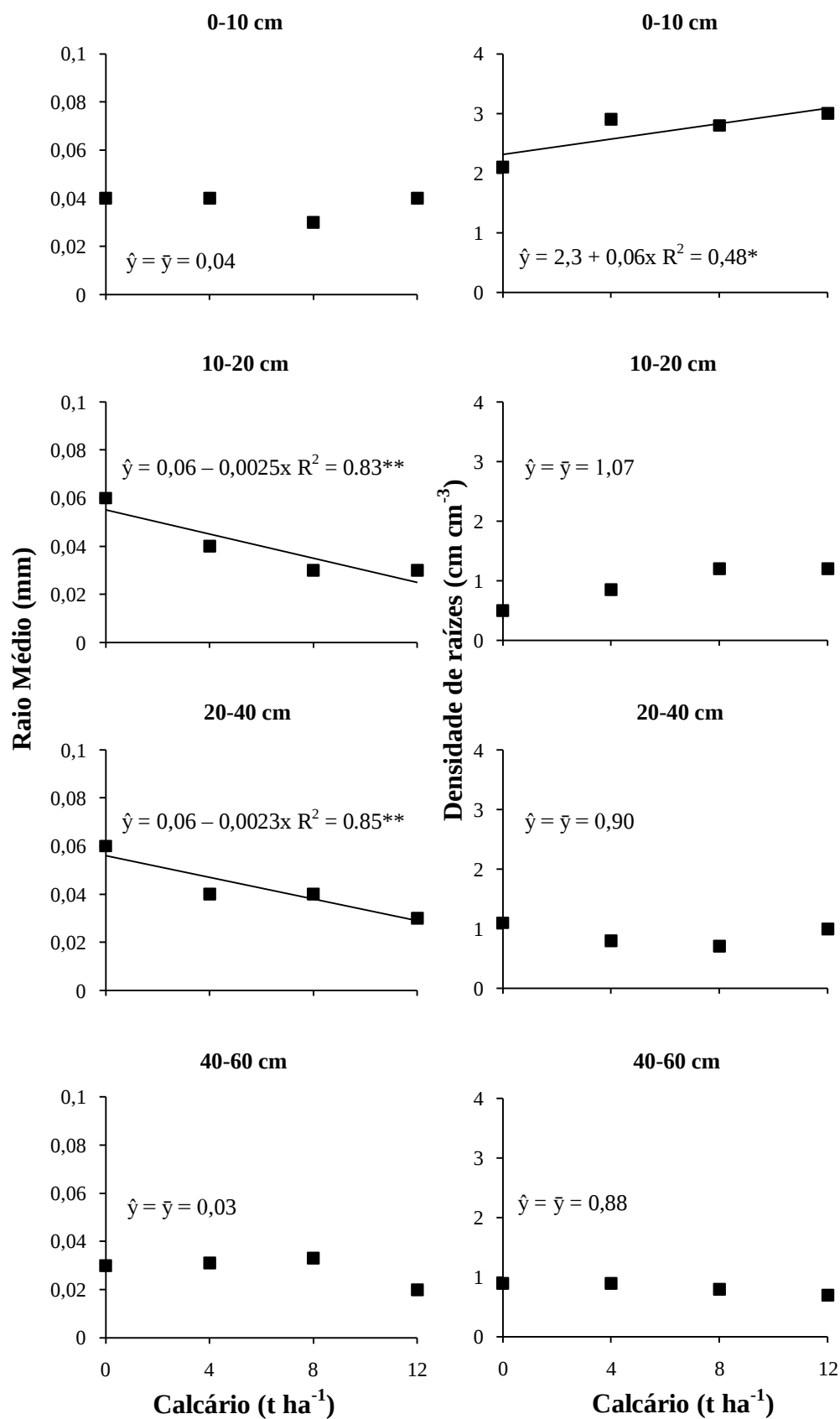


Figura 6. Alterações no raio médio e densidade de comprimento de raízes de milho em função da aplicação de calcário em sistema plantio direto. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$ correlação obtidos na camada de 0-10 cm (Tabela 5). Durante o ciclo de desenvolvimento da

Tabela 4. Coeficientes de correlação entre atributos de raízes de milho e atributos químicos do solo em diferentes profundidades.

Profundidade	pH (CaCl ₂)	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Saturação por Al ³⁺	Saturação por bases
cm	<i>Densidade de comprimento de raízes</i>					
0-10	0,57**	-0,69**	0,51*	0,44**	-0,69**	0,61**
10-20	-0,33ns	0,06ns	-0,26ns	0,24ns	-0,06ns	-0,10ns
20-40	-0,08ns	-0,15ns	0,04ns	-0,10ns	-0,03ns	0,01ns
40-60	-0,46*	0,31ns	-0,34ns	-0,26ns	0,25ns	-0,31ns
	<i>Raio Médio de raízes</i>					
0-10	-0,49*	0,57**	-0,55**	-0,62**	0,60**	-0,57**
10-20	-0,48*	0,68**	-0,68**	-0,70**	0,74**	-0,56*
20-40	-0,38*	0,49*	-0,39*	-0,04ns	0,19ns	-0,33*
40-60	-0,26ns	0,29ns	-0,35ns	0,01ns	0,31ns	-0,25ns

ns: não significativo, *: P<0.05 e **: P<0.01.

Em um estudo envolvendo aplicação superficial de calcário em área manejada há longo período no SPD, Caires et al. (2008) observaram que a acidez do solo limitou drasticamente o crescimento radicular do trigo por causa da prolongada falta de chuvas ocorrida durante a fase de desenvolvimento vegetativo da cultura, mas não causou efeitos negativos no crescimento radicular das culturas de milho e soja quando houve adequada disponibilidade hídrica.

Os altos coeficientes de correlação obtidos nas camadas superficiais (Tabela 4) entre atributos químicos do solo e crescimento de raízes, nas diferentes profundidades avaliadas, demonstram que as melhorias nas condições de acidez do solo proporcionadas pela calagem foram efetivas na densidade de comprimento de raízes, apenas na camada superficial de 0-10 cm.

O menor regime de chuvas observado em determinadas fases da cultura do milho (Tabela 2) aparentemente não foi de grande magnitude para o desenvolvimento radicular das plantas. Dessa maneira, havendo boa disponibilidade hídrica nas demais fases de desenvolvimento, as raízes não apresentaram maior crescimento nas camadas subsuperficiais com a aplicação de calcário.

O raio médio de raízes foi correlacionado negativamente com Mg²⁺ até 20 cm, e com Ca²⁺, pH e saturação por bases até a camada de 20-40 cm. O teor de Al³⁺ até 40 cm e a

saturação por Al^{3+} até 20 cm foram correlacionados positivamente com o raio médio das raízes. A ação do Al no engrossamento de raízes é um efeito fisiológico amplamente conhecido (KOCHIAN, 1995), que inibe a exploração do ambiente radicular e consequentemente diminui a absorção de nutrientes. No entanto, esses resultados mostram também o efeito benéfico da adição de bases trocáveis no solo, estimulando a formação de raízes com menor diâmetro e permitindo assim melhor distribuição de raízes e maior exploração do ambiente radicular para a absorção de água e nutrientes. Mesmo na ausência de Al, Ritchey, Silva e Costa (1982) observaram grande acréscimo no desenvolvimento radicular até 75 cm de profundidade com a aplicação de cálcio, demonstrando o efeito preponderante do Ca no crescimento radicular, já conhecido há bastante tempo.

4.1.3. Concentração de nutrientes nas folhas e nos grãos de milho

A aplicação superficial de calcário proporcionou aumento nos teores de P, Ca e Mg no tecido foliar de milho, e diminuição na concentração de S, Zn e Mn (Tabela 5). Os aumentos nas concentrações de P, Ca e Mg na folha estiveram relacionados com o aumento na densidade de comprimento de raízes na camada de 0-10 cm. O teor de S na folha foi diminuído com a aplicação de calcário, em decorrência provavelmente de efeito de diluição, que ocorreu com o maior crescimento das folhas pela aplicação de calcário, diminuindo a sua concentração no tecido foliar. Além disso, em solos tropicais, há maior concentração de S em camadas mais profundas, diminuindo a sua concentração em camadas superficiais, principalmente com aplicação de calcário e fósforo, devido à competição aniônica com carbonatos e fosfatos nas camadas superficiais, sendo adsorvido na presença de cargas positivas em camadas subsuperficiais (RHEINHEIMER et al., 2005).

Tabela 5. Teor de nutrientes nas folhas e grãos de milho de acordo com os tratamentos de calcário na superfície no sistema plantio direto.

Calcário	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn
t ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
Folhas										
0	14,9	1,3	22,5	3,9	1,5	1,1	9,4	128,8	20,5	99,0
4	12,1	1,7	24,9	4,1	2,4	1,0	8,3	158,8	17,1	88,2
8	12,9	1,7	21,9	4,1	2,9	0,8	8,5	142,6	15,7	71,4
12	13,4	2,0	22,7	4,5	3,7	0,8	10,5	183,4	15,1	75,9
Efeito	ns	L**	ns	L*	L**	L*	ns	ns	L*	L*
C.V. (%)	8,4	10,9	11,5	15,6	17,9	16,2	11,9	15,3	13,1	19,4
Grãos										
0	7,0	2,5	3,5	0,16	1,1	0,6	2,3	60,3	27,6	6,8
4	8,5	6,9	8,3	0,14	3,1	0,7	2,0	69,1	33,2	9,5
8	6,7	6,3	5,9	0,14	2,5	0,5	1,3	52,9	21,0	5,7
12	6,0	4,8	4,5	0,32	1,5	0,5	2,0	37,7	21,0	5,9
Efeito	ns	Q**	ns	ns	Q**	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	11,2	11,5	14,3	12,1	19,8	17,5	16,0	19,4	12,7	20,7

L = Efeito linear por regressão polinomial; Q = Efeito quadrático por regressão polinomial; ns: não significativo, *: $p < 0.05$ e **: $p < 0.01$.

Não houve relação entre os atributos de crescimento radicular e o teor de Zn e Mn na folha. No entanto, o aumento no pH (CaCl_2) do solo na camada 0-5 cm afetou negativamente a absorção desses micronutrientes, apresentando correlação negativa com os teores de Zn ($r = 0,45$; $P < 0,05$) e Mn ($r = 0,63$; $p < 0,01$) na folha, porém não foram observadas deficiências desses nutrientes nas plantas. A menor disponibilidade de Zn coincide com valores elevados de pH (LINDSAY, 1979). O aumento observado na absorção de P também pode ter contribuído na menor absorção de Zn, devido à inibição competitiva que ocorre entre esses nutrientes na planta (MARSCHNER, 1995).

A diminuição no teor de Mn na folha não limitou o desenvolvimento da cultura. A calagem, em doses adequadas, reduz o teor de Mn no solo a níveis não-tóxicos (QUAGGIO et al., 1986), porém doses excessivas de calcário podem causar problemas de deficiência. Na cultura da soja, Caires e da Fonseca (2000) também observaram redução na absorção de Zn e

Mn com aplicação de calcário, devido ao aumento no pH das camadas superficiais, sem causar problemas de deficiência.

Aumentos na concentração de P nas folhas de milho com a calagem não são normalmente observados em plantio direto (CAIRES et al., 2002; 2004; FELDHAUS, 2006), apesar do conhecido efeito do pH no aumento da disponibilidade de P no solo. Contudo, nesses trabalhos, também não se observou melhoria no crescimento radicular com a calagem, como verificado no presente estudo. O P é um elemento pouco móvel no solo, de forma que a exploração das raízes assume grande importância na absorção desse nutriente. O aumento na absorção de P com a calagem deve ter sido ocasionado pelo aumento na densidade de raízes, considerando que houve correlação linear significativa entre o teor de P na folha e a densidade de raízes na camada 0-10 cm ($r = 0,64$; $P < 0,01$).

Aumentos de Ca e Mg nas folhas de milho com a aplicação superficial de calcário dolomítico em SPD também foram observados em diversos outros trabalhos (CAIRES et al., 1999; 2002; 2004; TISSI, CAIRES e PAULETTI, 2004). A calagem na superfície em SPD, ao aumentar os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no solo, pode causar desequilíbrios nutricionais de cátions na planta, principalmente entre Mg e K (CAIRES, 2007). Porém, no presente trabalho, esse efeito não foi observado, mesmo com o aumento substancial de Mg nas folhas de milho.

As respostas observadas nas concentrações de P e Mg nas folhas se refletiram também na composição mineral dos grãos (Tabela 6), sem efeito no teor de Ca nos grãos, devido à pouca mobilidade desse nutriente na planta (MALAVOLTA, 2006). Os teores de P e Mg nos grãos apresentaram resposta quadrática com a aplicação de calcário. Deve-se considerar que P e Mg são elementos sinérgicos na planta, sendo que a absorção de P é máxima na presença de Mg^{2+} , possivelmente pela participação do Mg na ativação de ATPase da membrana implicadas na absorção iônica e na própria geração do ATP na fotossíntese e respiração, onde

o Mg é fundamental (MALAVOLTA, 2006). Dessa maneira, o aumento na absorção de Mg também favoreceu a absorção de P pelas plantas de milho.

4.1.4. Extração de nutrientes pela cultura do milho

O acúmulo de nutrientes pela cultura do milho nas folhas, colmos e espigas foi diferente com a aplicação de calcário (Tabela 6). Destaca-se que a localização dos nutrientes na planta e os incrementos proporcionados pela calagem foram de acordo, principalmente, com a mobilidade desses nutrientes na planta. Segundo Malavolta (2006), os nutrientes podem ser classificados como móveis (N, P, K, Mg, Cl e Mo), pouco móveis (S, Cu, Fe, Mn e Zn) e quase imóveis (Ca e B), influenciando diretamente a redistribuição deles na planta. Explica-se, dessa forma, o aumento na extração de N, K, Ca e Mg nas folhas, P, K e Mg nos colmos e P e Mg nas espigas. Nota-se que o Ca, que tem pequena mobilidade nas plantas, se concentrou principalmente nas folhas, enquanto K, P e Mg, que possuem alta mobilidade, foram encontrados em concentrações similares nas diferentes partes da planta. A distribuição dos nutrientes nas folhas, colmos e espigas concorda com os resultados obtidos em outros trabalhos (VASCONCELLOS, VIANA e FERREIRA, 1998; DUARTE et al., 2003).

Os incrementos observados de nutrientes em diferentes partes das plantas de milho com aplicação de calcário se refletiram na extração total de nutrientes pela planta inteira, obtida pela soma da extração observada nas folhas, colmos e espigas (Tabela 6), à exceção N e Fe, que foram incrementados nas folhas e espigas, respectivamente, porém não foram estatisticamente significativos quando se considerou a extração total.

Tabela 6. Acúmulo de nutrientes em diferentes partes da planta e extração total pela parte aérea do milho em função de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto

Calcário	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Mn	Fe
	-----kg ha ⁻¹ -----					-----g ha ⁻¹ -----				
Folhas										
0	14,9	1,9	25,0	7,7	3,4	0,44	16,3	28,7	124,7	730,0
4	18,9	2,8	31,7	11,0	6,0	0,33	17,1	26,0	125,3	606,7
8	17,7	2,0	26,9	10,9	7,8	0,40	18,2	34,0	113,7	740,0
12	17,0	2,4	28,9	12,2	8,3	0,51	18,1	27,7	117,3	770,0
Efeito	Q*	ns	L*	L*	L**	ns	ns	ns	ns	ns
CV(%)	5,7	20,1	9,3	24,6	29,4	28,7	28,9	23,4	9,2	12,8
Colmos										
0	12,4	0,7	28,8	7,2	1,4	0,06	21,2	37,3	216,0	263,3
4	9,6	0,6	41,0	7,5	2,3	0,07	26,1	28,3	144,0	213,3
8	8,4	0,9	35,9	7,8	2,7	0,13	24,3	27,3	171,0	403,3
12	14,7	1,7	37,8	7,6	2,2	0,10	25,2	33,3	189,6	256,7
Efeito	ns	L*	Q*	ns	Q**	ns	ns	ns	ns	ns
CV(%)	10,8	20,6	20,8	24,2	14,5	35,1	41,3	21,2	18,3	41,3
Espigas										
0	35,8	4,73	27,1	1,2	3,9	0,2	13,2	79,3	33,0	90,0
4	38,3	7,46	36,2	0,97	5,3	0,7	27,2	94,7	49,7	156,7
8	35,5	7,2	27,2	0,53	4,0	0,6	15,1	82,7	39,3	133,3
12	41,1	8,6	29,3	1,2	5,8	0,8	16,2	106,3	44,0	163,3
Efeito	ns	L*	ns	ns	L*	L*	ns	ns	ns	L*
CV(%)	17,7	25,6	13,2	28,8	19,3	38,1	48,3	32,4	19,2	27,4
Planta Inteira										
0	63,3	7,3	80,9	16,0	8,7	0,69	49,7	145,7	374,0	108,7
4	66,9	10,9	108,9	19,4	13,6	1,1	71,3	149,0	318,7	97,3
8	61,7	10,1	90,1	19,2	14,4	1,2	57,2	144,0	324,3	127,3
12	72,9	12,7	96,1	21,0	16,2	1,4	60,2	168,0	351,0	118,7
Efeito	ns	L**	Q*	L**	L**	L*	ns	ns	ns	ns
CV(%)	10,4	24,0	11,8	23,1	20,5	31,8	24,5	19,8	10,8	18,1

L: Efeito linear; Q: Efeito quadrático; ns: não significativo, *: $p < 0.05$ e **: $p < 0.01$.

O aumento na extração de P, Ca e Mg confirmam os resultados obtidos na diagnose foliar. Apesar da diminuição observada nos teores de Zn e Mn no tecido foliar de milho (Tabela 6), não foram observadas diferenças na extração desses micronutrientes pela cultura. Destaca-se também que foi observada uma pequena diminuição no teor de S nas folhas, possivelmente devido ao efeito de diluição no tecido foliar. Entretanto, nota-se aumento na extração desse nutriente, refletindo o aumento observado nas espigas de milho. O aumento

observado na extração de K (Tabela 7), que foi refletido no aumento na concentração observada nos grãos (Tabela 6) mostra que não houve desequilíbrio nutricional causado pelo aumento de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo com a aplicação de calcário, contrastando com a resposta obtida por Caires et al. (2002). Karlem, Flannery e Sadler (1987) observaram que, em sistemas de alta produção, a cultura do milho apresenta o maior pico de absorção de K nas primeiras fases de desenvolvimento da cultura, que compreende a fase de desenvolvimento vegetativo, em que as plantas definem o potencial produtivo. No presente trabalho, houve períodos de menor precipitação pluvial nessa fase (Tabela 3). Com a melhoria na acidez do solo pela calagem, há aumento na disponibilidade de macronutrientes, incluindo K^+ (VAN RAIJ, 1991). Portanto, a correção do solo proporcionada pela calagem, principalmente na subsuperfície, onde há maior umidade no solo, pode ter favorecido a extração de K pelas plantas de milho, principalmente na fase de desenvolvimento vegetativo. Além disso, o Ca em concentrações adequadas pode apresentar efeito sinérgico com o K na planta (VIETS, 1944, citado por MALAVOLTA, 2006).

4.1.5. Produção de massa seca da parte aérea e rendimento de grãos de milho

As doses de calcário aplicadas na superfície proporcionaram aumento quadrático ($P < 0.01$) na massa seca de parte aérea e na produção de grãos de milho (Figura 7). De acordo com as equações de regressão ajustadas, a máxima produção de massa seca seria obtida com a dose de $11,3 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário e o máximo rendimento de grãos seria obtido com a dose de $9,2 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário. O aumento no rendimento de grãos com a calagem foi de 3.000 kg ha^{-1} , comparando a testemunha e a produção estimada na dose de $9,2 \text{ t ha}^{-1}$, representando um incremento de 42% na produção de grãos da cultura. A produção de massa seca da parte aérea esteve diretamente relacionada com o rendimento de grãos, o que mostra que esse atributo pode ser utilizado como indicativo para a resposta do milho à aplicação de calcário.

Vários trabalhos têm mostrado aumento na produção de grãos de milho com a calagem superficial em plantio direto (PÖTTKER e BEN, 1998; SÁ, 1999; CAIRES et al., 2000; 2002;

2004). No entanto, esses autores obtiveram altas produtividades mesmo na ausência de calcário, em solos com elevada acidez no SPD, que foram explicadas pela menor toxicidade do Al para as plantas (BROWN et al., 2008), concentrações suficientes de cátions trocáveis (CAIRES et al., 1998; 1999) e maior umidade disponível do solo (CAIRES e DA FONSECA, 2000; TARKALSON, HERGERT e CASSMAN, 2006). Entretanto, no presente estudo, a produção estimada de grãos na ausência de calcário foi de 7.070 kg ha⁻¹, abaixo do rendimento médio de grãos de milho na região de Ponta Grossa – PR, que foi de 7.455 kg ha⁻¹, na safra 2008-2009 (SEAB, 2009).

As altas produtividades que têm sido obtidas na ausência de calagem, em solos ácidos sob plantio direto, têm gerado dúvidas a respeito da necessidade de aplicação de calcário nesse sistema, levando à interpretação de que a quantidade de calcário necessária para esse sistema seria menor do que a exigida pelo sistema convencional de preparo do solo (CAIRES, 2007). No presente trabalho, a produtividade relativamente mais baixa obtida na ausência de calcário pode ser explicada pela moderada sensibilidade do híbrido de milho ao Al e aos períodos de stress hídrico enfrentados pela cultura (Figura 1; Tabela 2), além das severas condições de acidez, observadas na ausência de aplicação de calcário.

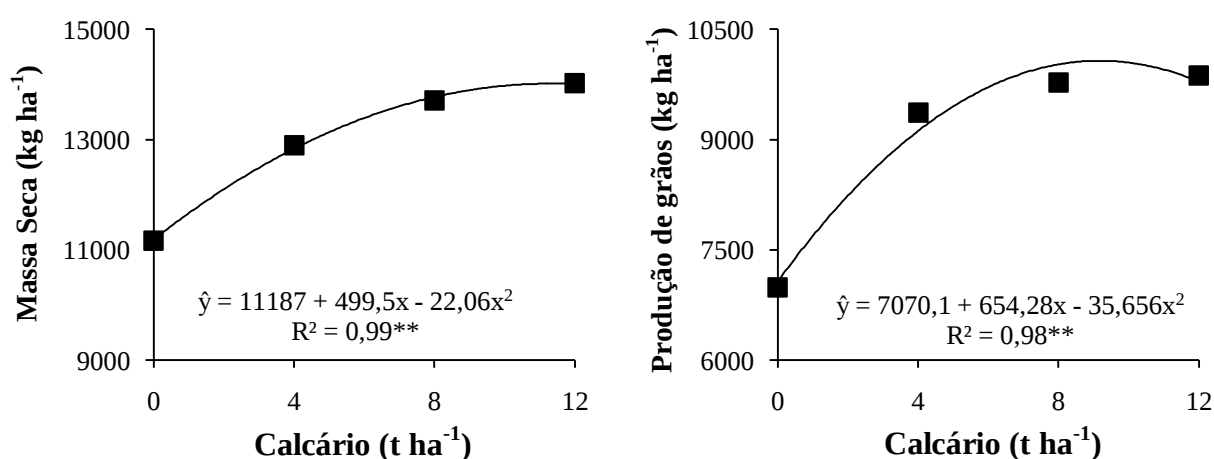


Figura 7. Massa seca da parte aérea e produção de grãos de milho em função de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto. **: P<0.01

Destaca-se que as altas produtividades das culturas em solos ácidos manejados em SPD têm sido obtidas sem a ocorrência de limitação hídrica, e alguns trabalhos avaliaram a resposta do milho à calagem na superfície sem informações a respeito da precipitação pluvial ocorrida durante o ciclo de desenvolvimento das plantas. Caires et al. (2006b), em um estudo de calagem na superfície durante longo prazo em SPD na região Centro-Sul do Paraná, observaram expressivo aumento na produção de grãos de trigo, moderadamente sensível ao Al, com a aplicação de calcário na superfície, quando houve falta de chuvas durante longos períodos da fase vegetativa e logo após o florescimento da cultura. A cultura do milho também pode apresentar diferentes respostas à calagem superficial em plantio direto de acordo com a disponibilidade hídrica no solo. No sistema convencional, Freire (1984) demonstrou em colunas de solo, que a cultura do milho respondeu à aplicação de calcário apenas na presença de déficit hídrico. No entanto, não existem estudos com esse enfoque no SPD. Adicionalmente, valiosas informações relacionadas com a tolerância de genótipos de milho ao Al não têm sido consideradas em alguns trabalhos (CAIRES, 2007).

As alterações nos atributos químicos relacionados à acidez do solo ocasionadas pela calagem na superfície influenciaram consideravelmente a produção de grãos de milho cultivado em plantio direto. Até a camada de 20 cm de profundidade, a produção de grãos de milho foi aumentada com a elevação no pH (CaCl_2) e diminuída com o aumento no teor de Al^{3+} trocável no solo (Figura 8). Os maiores rendimentos de grãos foram obtidos com pH em CaCl_2 6,1 na camada de 0-5 cm e 5,1 na camada de 5-10 cm. Na profundidade de 10-20 cm, houve ajuste linear, com incremento na ordem de 251,5 kg de grãos de milho para cada 0,1 unidades de aumento no pH(CaCl_2). A neutralização do Al^{3+} nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm foi efetiva no aumento do rendimento de grãos de milho, com maior incremento na camada de 0-5 cm.

Em SPD, alguns estudos não mostraram resposta no rendimento de grãos de milho com a calagem superficial (CAIRES et al., 1999, 2002; TISSI, CAIRES e PAULETTI, 2004),

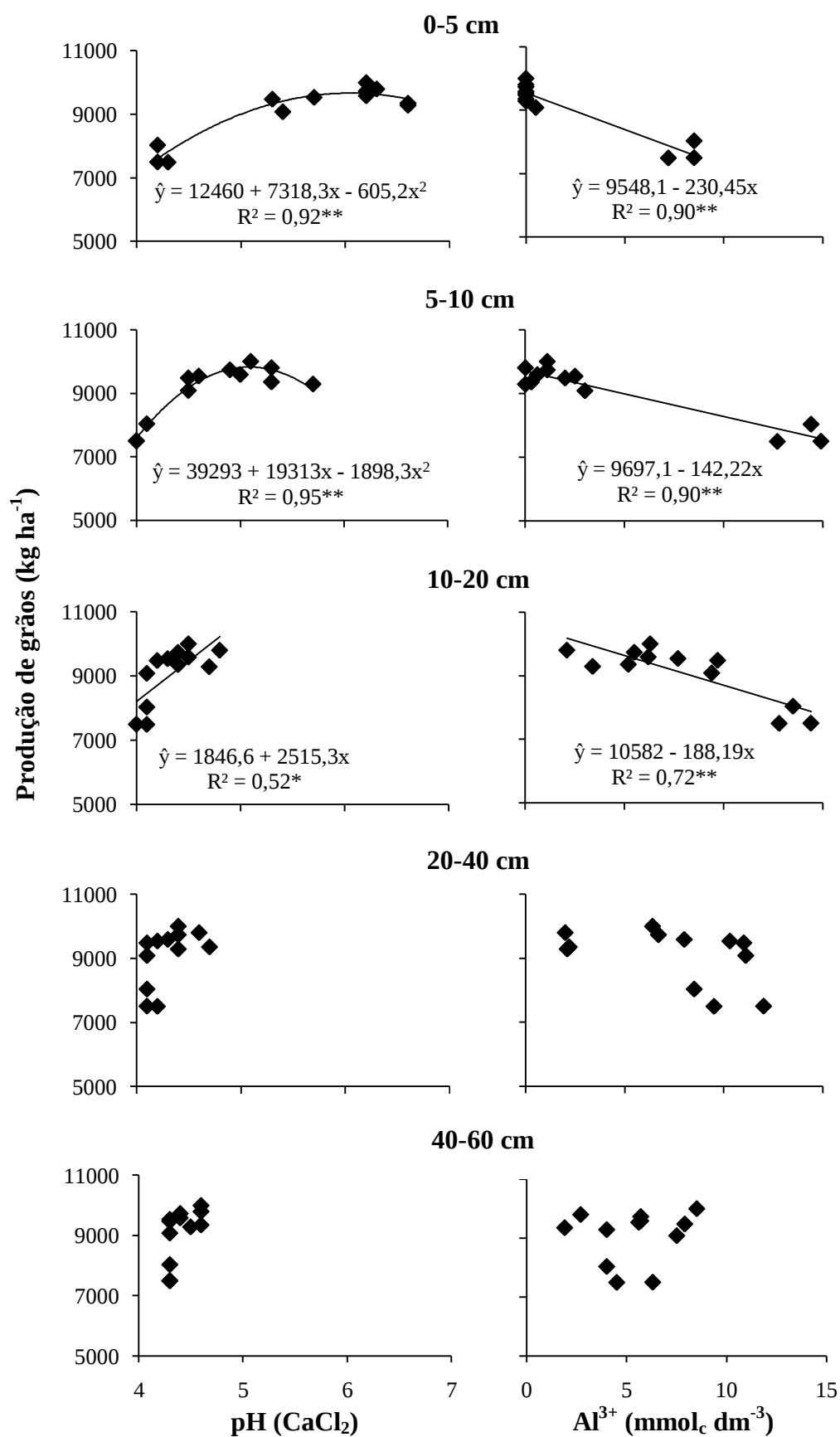


Figura 8: Relações entre atributos de acidez do solo (pH e Al³⁺), em diferentes profundidades, e produção de grãos de milho após a aplicação de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto.*: P<0.05 e **: P<0.01

mesmo na presença de concentrações de Al^{3+} trocável consideradas tóxicas no solo (8 a 11 $\text{mmol}_\text{c} \text{ dm}^{-3}$). Tais efeitos têm sido relacionados com a presença de menor concentração de espécies tóxicas de Al e maior concentração de Al complexado com ligantes orgânicos (ZAMBROSI et al., 2007; BROWN et al., 2008; ALLEONI et al., 2010). Entretanto, as altas correlações obtidas entre a produção de grãos de milho e o teor de Al^{3+} trocável nas camadas superficiais do solo (Figura 8), onde o teor de matéria orgânica é mais elevado, demonstraram que a complexação com ligantes orgânicos não foi suficiente para amenizar a fitotoxidez do Al. Em adição, os baixos teores de Ca e Mg na ausência de calcário também prejudicaram a produção da cultura. Deve-se ressaltar que o híbrido utilizado era moderadamente sensível ao Al e que foram observados períodos prolongados sem chuvas durante o desenvolvimento vegetativo da cultura do milho, o que pode desfavorecer a formação de complexos orgânicos menos tóxicos de Al (CAIRES et al., 2008).

Os efeitos benéficos da aplicação de calcário para a cultura do milho não se restringem apenas à neutralização de Al^{3+} trocável. Muitos outros fatores relacionados à calagem contribuem para o incremento na produção de milho, com várias respostas positivas em valores de pH acima do necessário para a neutralização total de Al^{3+} trocável (ERNANI, BAYER e MAESTRI, 2002), o que também foi observado no presente trabalho.

A produção de grãos de milho foi afetada significativamente pelas concentrações de Ca^{2+} trocável nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm e de Mg^{2+} trocável nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm (Figura 9). Níveis críticos de Ca^{2+} e Mg^{2+} em solos tropicais são difíceis de serem estabelecidos, por estarem diretamente relacionados à acidez do solo. No entanto, esses resultados mostram que a calagem superficial, em adição à correção da acidez do solo, também beneficiou a produção de milho com o incremento de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no solo. Esses efeitos foram também observados em outros trabalhos. Maschietto (2006) obteve aumento na produção de milho com a calagem, altamente correlacionado com o teor de Ca^{2+}

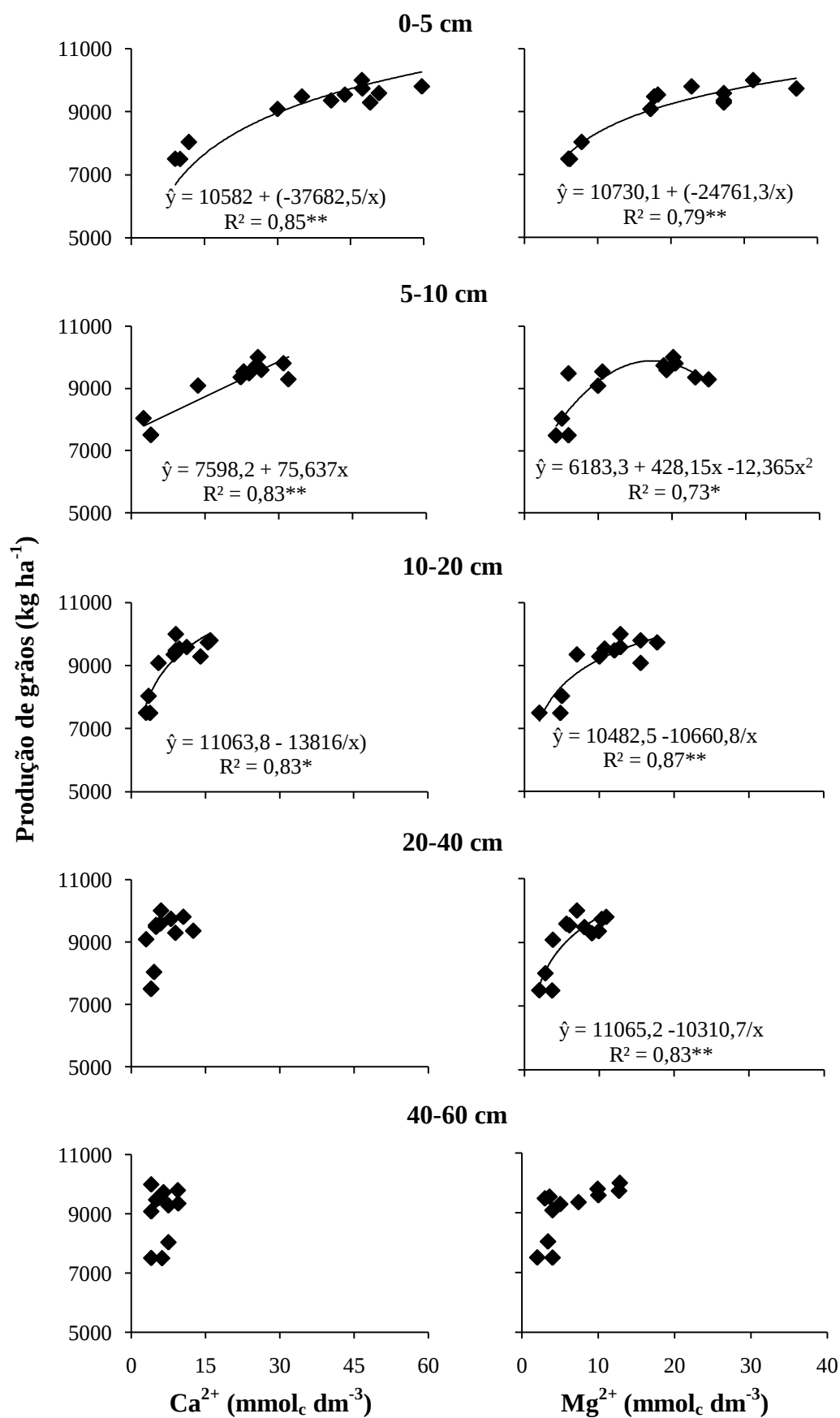


Figura 9: Relações entre teores de bases trocáveis (Ca²⁺ e Mg²⁺) no solo, em diferentes profundidades, e produção de grãos de milho após a aplicação de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto. *: P<0.05 e **: P<0.01

até 60 cm de profundidade. Caires et al. (2004) verificaram incremento na produção de milho com aumento na saturação por Ca e Mg na CTC a pH 7,0.

Os valores de saturação por Al^{3+} e saturação por bases até 40 cm de profundidade influenciaram significativamente o rendimento de grãos de milho (Figura 10), refletindo a neutralização de Al^{3+} trocável e o incremento de Ca^{2+} e Mg^{2+} com a aplicação de calcário dolomítico. As respostas observadas foram similares às obtidas por Nolla e Anghinoni (2006) e Nicolodi, Anghinoni e Gianello (2008), para a produção de grãos de soja, com as maiores produtividades da cultura em níveis de saturação por Al abaixo de 5% e saturação por bases acima de 50% nas camadas de 0-10 e 0-15 cm. Os resultados do presente trabalho confirmam a recomendação para a calagem superficial em plantio direto no Paraná, que visa elevar a saturação por bases a 65%, na camada 0-20 cm (CAIRES, BANZATTO e DA FONSECA, 2000).

Devem-se destacar os resultados obtidos na profundidade de 20-40 cm, com aumento na produção de milho a partir da redução na saturação por Al e pequeno incremento na saturação por bases, mostrando os efeitos benéficos proporcionados pela calagem superficial em camadas mais profundas, indicando que recomendações com base apenas nas camadas superficiais, principalmente até 10 cm de profundidade, em plantio direto não são efetivas para a cultura do milho, especialmente quando se leva em consideração o uso de genótipos altamente produtivos, porém sensíveis à presença de Al^{3+} no solo e períodos de déficit hídrico durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

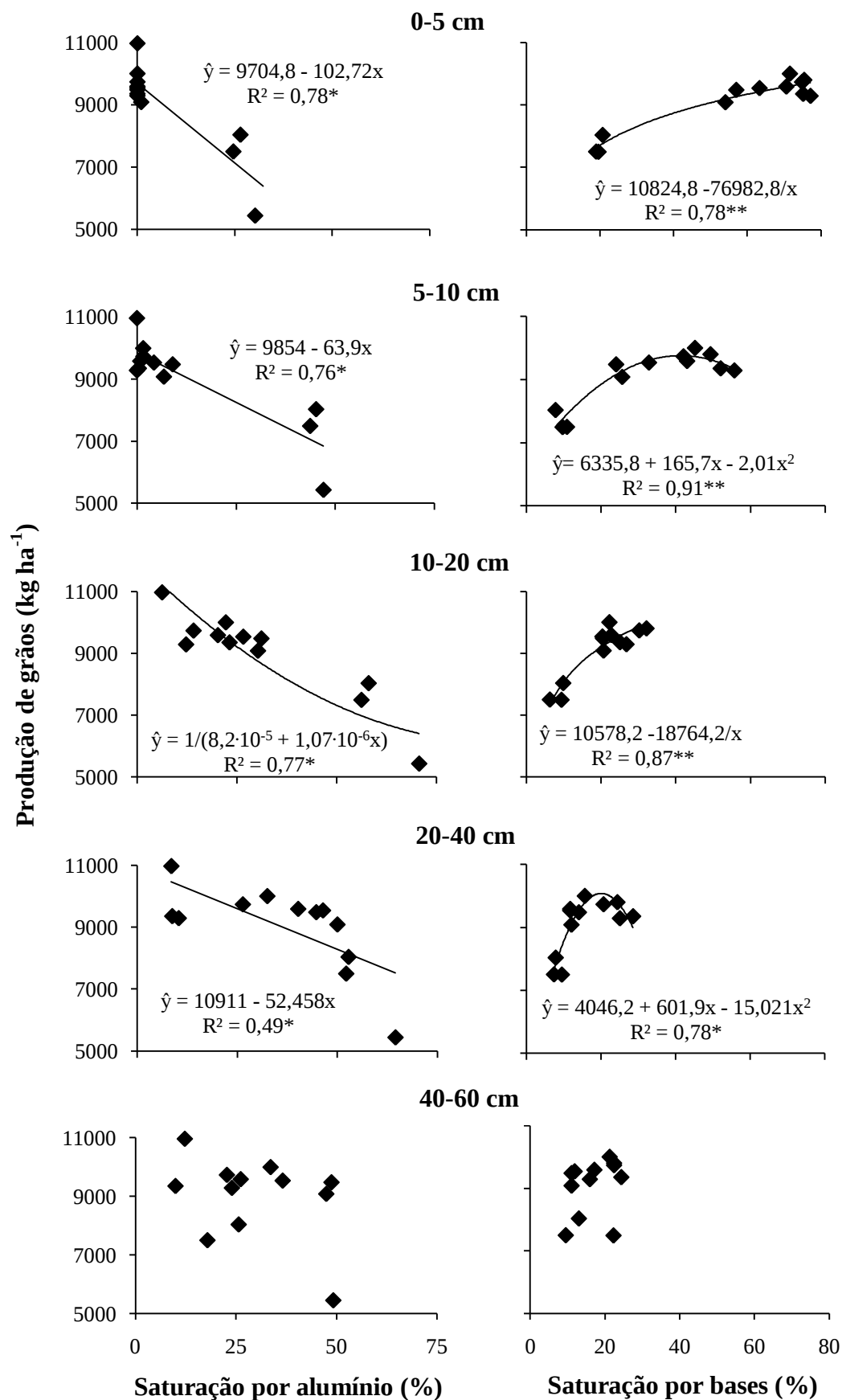


Figura 10: Relações entre saturação por alumínio e saturação por bases no solo, em diferentes profundidades, e produção de grãos de milho após a aplicação de doses de calcário na superfície em sistema plantio direto. *: $P < 0.05$ e **: $P < 0.01$

4.2. Experimento conduzido em colunas indeformadas de solo

4.2.1. Atributos de crescimento radicular do milho

A aplicação de calcário promoveu diminuição no raio médio de raízes na presença de deficiência hídrica, apenas na camada de 0-5 cm (Figura 11). Essa redução ocorreu nos dois híbridos utilizados e, embora tenha sido de pouca magnitude, de apenas 0,0009 mm para cada tonelada de calcário aplicada, mostra que os teores de Al^{3+} encontrados na camada superficial do solo (Tabela 4) causaram engrossamento de raízes, que é um dos mais conhecidos efeitos tóxicos de Al^{3+} nas plantas (KOCHIAN, 1995). Entretanto, a ausência de efeito no tratamento sem deficiência hídrica demonstra que não houve toxicidade do Al para as raízes de milho quando a disponibilidade de água no solo foi adequada. Na camada de 10-20 cm, houve aumento no raio médio de raízes, sem deficiência hídrica, com as doses de calcário. As colunas utilizadas no estudo tinham altura de 20 cm. Portanto, abaixo dessa camada, havia limitação física da superfície de madeira sobre a qual as colunas estavam dispostas. O engrossamento observado nas raízes ocorreu devido a essa limitação nas condições de adequada disponibilidade hídrica, em que o crescimento se mostrou mais vigoroso.

Com déficit hídrico, a calagem superficial proporcionou aumento na densidade de raízes (Figura 12) e no comprimento total de raízes (Figura 13) em todas as camadas estudadas. Entretanto, na ausência de déficit hídrico, não houve diferença na densidade (Figura 12) e no comprimento total de raízes (Figura 13) com a calagem, o que demonstra claramente os benefícios proporcionados pela calagem ao crescimento radicular em situação de seca. Em níveis adequados de umidade, mesmo em condições de baixo pH e elevados teores de Al^{3+} trocável (Tabela 4), as raízes cresceram normalmente, sendo indiferentes à aplicação de calcário. Freire (1984), avaliando a massa seca de raízes, também observou que houve aumento no desenvolvimento radicular no nível de 40% do VTP com água, não

verificando resposta no nível de 70%. O aumento no volume de solo ocupado com raízes é fundamental em situações de seca, possibilitando maior absorção de água e nutrientes.

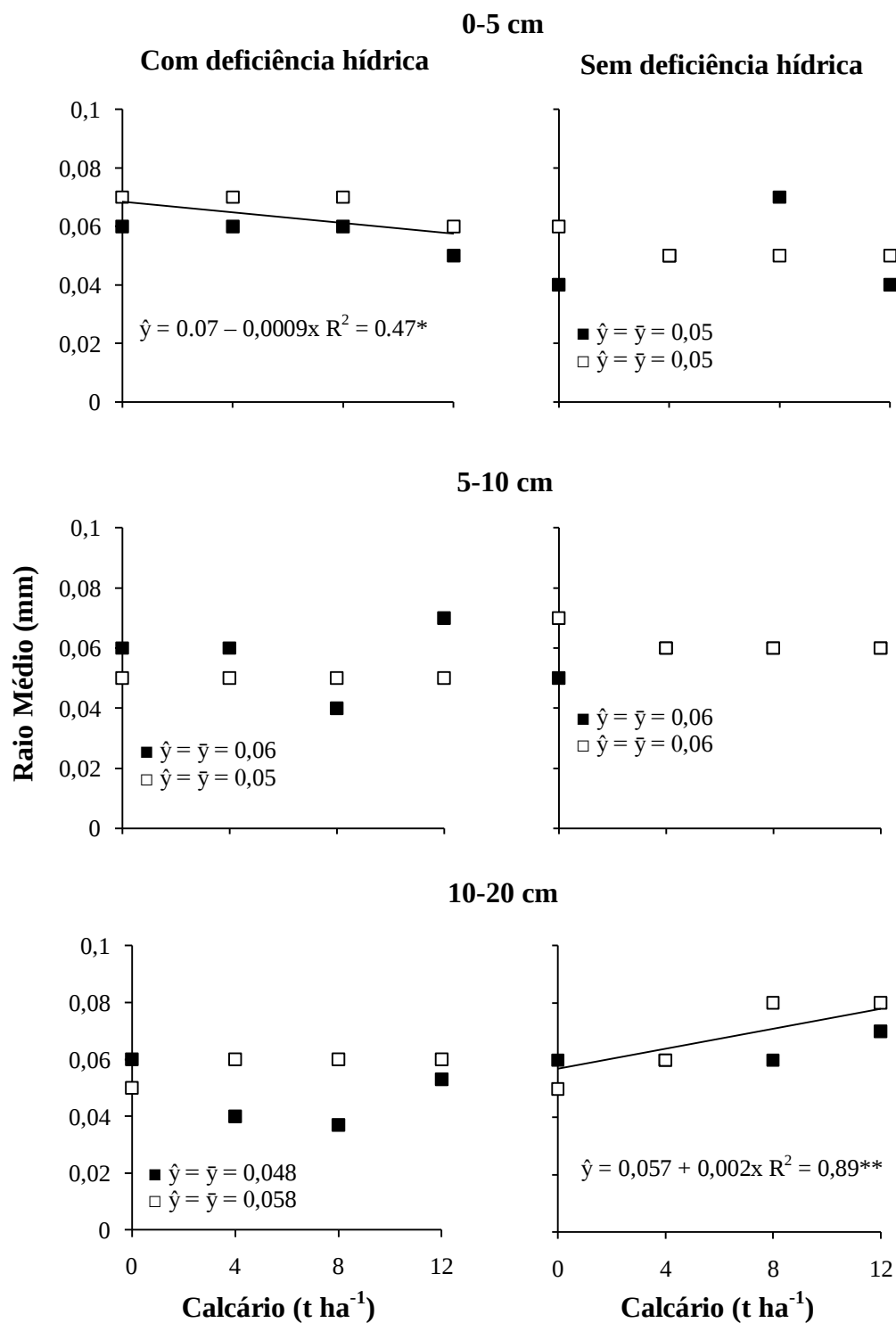


Figura 11. Raio médio de raízes dos híbridos de milho P32R22 (■) e P30F53 (□), em função de doses de calcário, com e sem deficiência hídrica. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.

A superfície radicular foi pouco afetada pela aplicação de calcário (Figura 14). No entanto, nota-se, nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, que na ausência de déficit hídrico, a calagem incrementou a superfície radicular. A superfície radicular representa a superfície total de raízes para absorção de nutrientes em um determinado volume de solo. Dessa maneira, o raio médio de raízes influencia diretamente esse atributo, assim como a densidade de comprimento de raízes. Pelos resultados observados, pode-se afirmar que o aumento na densidade de raízes nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm, com deficiência hídrica, e o aumento no raio médio na ausência de deficiência hídrica incrementaram a superfície radicular nessas condições. No entanto, o aumento na superfície radicular na camada de 10-20 cm, na ausência de déficit hídrico, foi reflexo direto do efeito observado no raio médio de raízes nessa camada.

De maneira geral, o crescimento das raízes de milho não foi influenciado pela aplicação de calcário na ausência de deficiência hídrica em todas as profundidades estudadas. Mesmo o solo apresentando baixos valores de pH (CaCl_2) nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (4,4, 4,2 e 4,3 respectivamente) e teores considerados tóxicos de Al^{3+} (11,3, 15,0 e 15,3 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), na ausência de calcário, a densidade de raízes foi similar aos tratamentos com aplicação de calcário, quando não houve déficit hídrico. Isso mostra que, mesmo com altos teores de Al^{3+} trocável no solo, não houve inibição no crescimento radicular do milho nessas condições, o que concorda com resultados obtidos em experimentos de campo sem limitação hídrica (CAIRES et al., 2002; TISSI, CAIRES e PAULETTI, 2004; FELDHAUS, 2006). No entanto, com déficit hídrico, a aplicação de calcário incrementou o crescimento radicular em todas as camadas estudadas, sendo correlacionado com os atributos químicos do solo, principalmente na camada de 10-20 cm (Tabela 7). Isso evidencia o efeito positivo da

calagem no aprofundamento de raízes em condições de déficit hídrico, possibilitando aumento na absorção de água e nutrientes nas camadas mais profundas do solo.

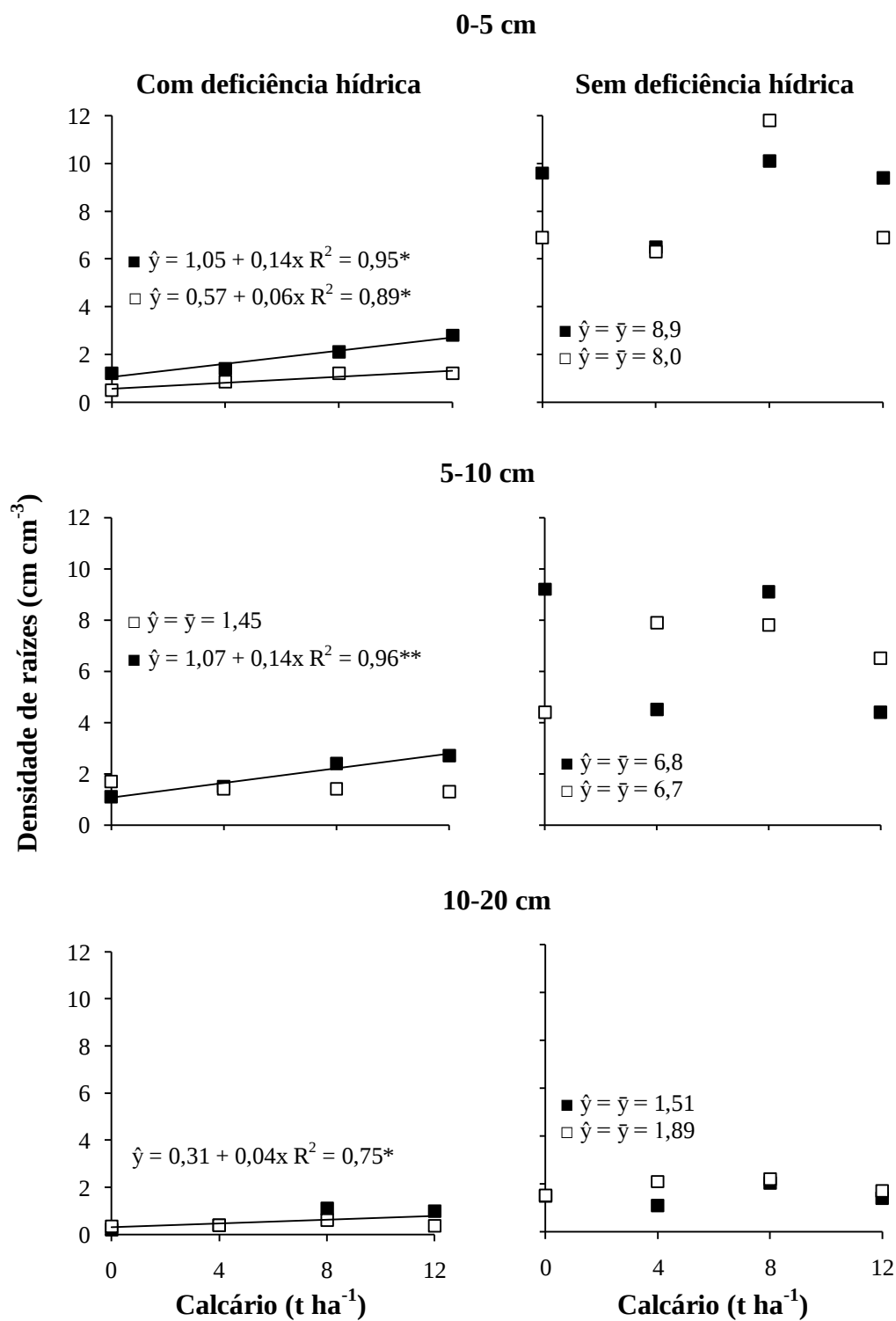


Figura 12. Densidade de comprimento de raízes dos híbridos de milho P32R22 (■) e P30F53 (□), em função de doses de calcário, com e sem deficiência hídrica. *: $P < 0.05$ e **: $P < 0.01$

Há controvérsias em relação à calagem na superfície e seus efeitos em condições de seca. Segundo Anghinoni (2007), com a calagem superficial, o crescimento radicular fica restrito às camadas da superfície, podendo causar prejuízos em situações de seca. No entanto, esses resultados demonstram que, quando a calagem proporciona correção da acidez em camadas mais profundas do solo, abaixo do local de sua aplicação, os efeitos são favoráveis e amenizam os prejuízos causados por períodos prolongados sem chuvas.

Na cultura do trigo, resultados similares foram obtidos por Caires et al. (2006b) em condições de campo, sendo que a acidez do solo limitou drasticamente o crescimento radicular quando houve prolongada falta de chuvas durante a fase de desenvolvimento vegetativo da cultura, tendo ocorrido aumento de 66% no comprimento de raízes de trigo por área superficial de solo (0-60 cm) com a calagem superficial, devido principalmente ao aumento no pH, no teor de Ca^{2+} trocável e na saturação por bases, e à redução no teor de Al^{3+} trocável e na saturação por Al^{3+} do solo. Em condições semelhantes de acidez do solo, Caires et al. (2008) não observaram resposta da calagem superficial no crescimento radicular das culturas de milho e soja, em condições de adequada disponibilidade hídrica.

A distribuição do sistema radicular da cultura do milho foi diferente, dependendo da disponibilidade de água, sem influência significativa das doses de calcário. Na média dos tratamentos de calagem, com deficiência hídrica, as raízes se concentraram em 35,5% na camada de 0-5 cm, 34,7% na camada de 5-10 cm e 29,8% na camada de 10-20 cm. Sem deficiência hídrica, a concentração de raízes foi de 42,7% na camada de 0-5 cm, 37,2% na camada de 5-10 cm e 20,1% na camada de 10-20 cm. Isso indica que, sem deficiência hídrica, as camadas de 0-5 e 5-10 cm foram as mais importantes para o desenvolvimento radicular do milho.

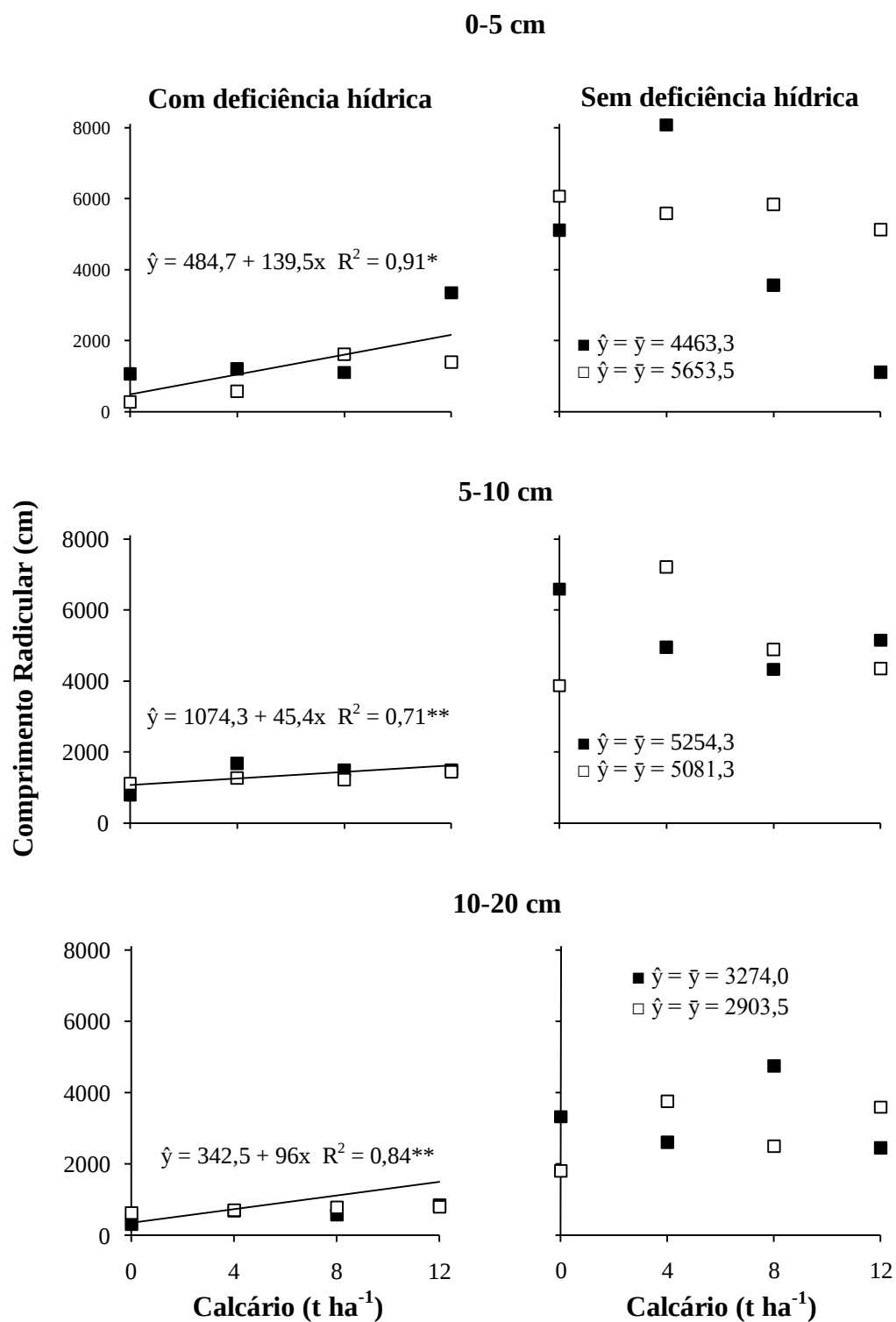


Figura 13. Comprimento total de raízes dos híbridos de milho P32R22 (■) e P30F53 (□), em função de doses de calcário, com e sem deficiência hídrica. *: $P < 0.05$ e **: $P < 0.01$

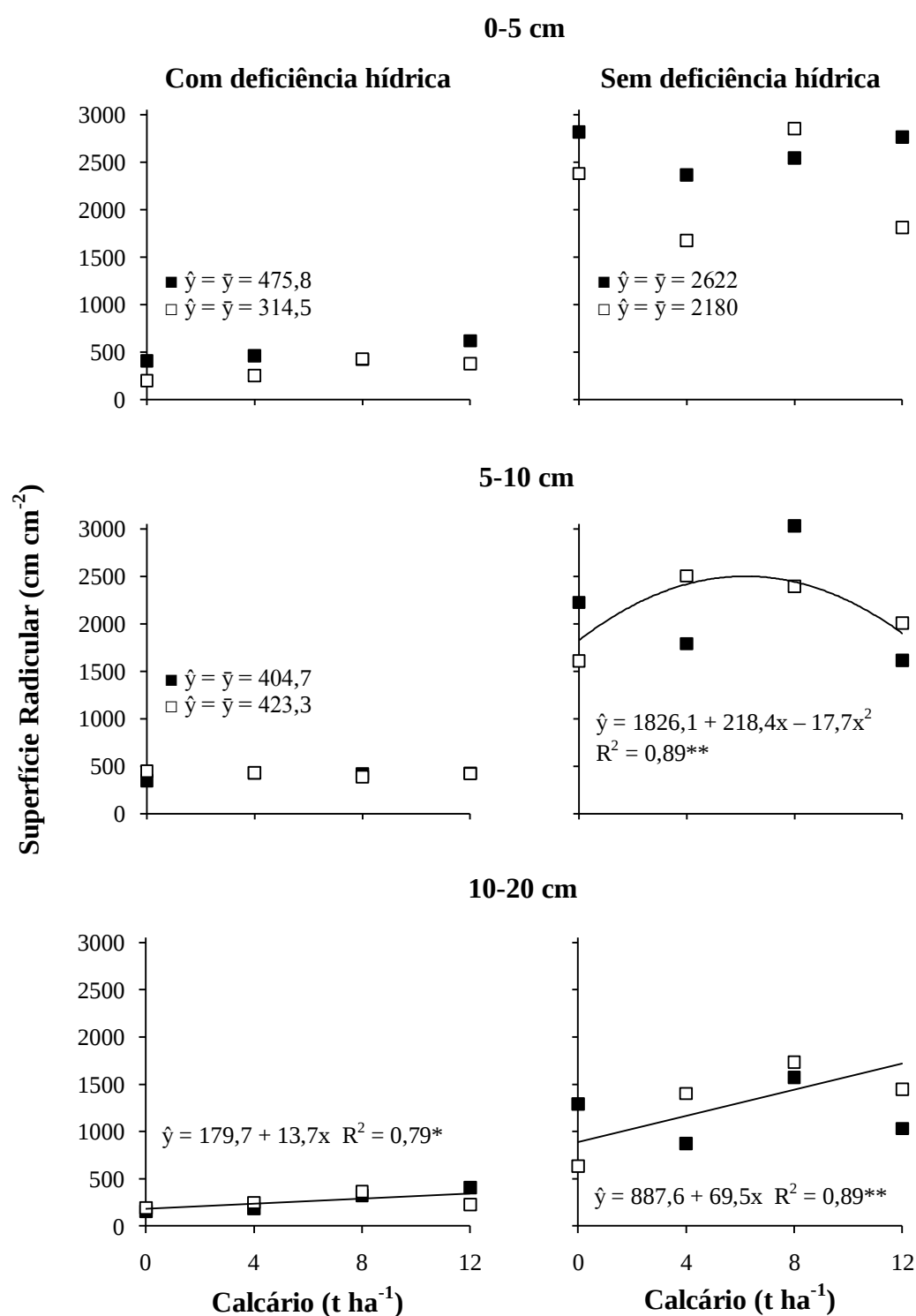


Figura 14. Superfície radicular dos híbridos de milho P32R22 (■) e P30F53 (□), em função de doses de calcário, com e sem deficiência hídrica. *: $P < 0.05$ e **: $P < 0.01$

Tabela 7. Coeficientes de correlação entre atributos de raízes de milho e atributos químicos do solo, em função da profundidade

Profundidade	pH (CaCl ₂)	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Saturação por Al ³⁺	Saturação por bases
Densidade de comprimento de raízes						
<i>Sem deficiência hídrica</i>						
0-5	0,09	-0,04	0,06	0,01	-0,03	0,07
5-10	0,02	0,03	-0,02	0,01	0,02	-0,04
10-20	0,12	-0,10	0,07	-0,01	-0,10	0,04
<i>Com deficiência hídrica</i>						
0-5	0,23	-0,20	0,22	0,16	-0,20	0,23
5-10	0,19	-0,16	0,18	0,22	-0,16	0,19
10-20	0,38*	-0,40*	0,40*	0,29	-0,41*	0,38*
Superfície radicular						
<i>Sem deficiência hídrica</i>						
0-5	-0,13	0,15	-0,11	-0,18	0,16	-0,09
5-10	0,14	-0,18	0,19	0,20	-0,20	0,12
10-20	0,36*	-0,35*	0,31*	0,19	-0,36*	0,27
<i>Com deficiência hídrica</i>						
0-5	0,35*	0,28	0,33*	0,33*	-0,28*	0,35*
5-10	0,06	-0,08	0,07	0,05	-0,08	0,06
10-20	0,50**	-0,52**	0,52**	0,41*	-0,52**	0,49**
Comprimento total de raízes						
<i>Sem deficiência hídrica</i>						
0-5	0,18	0,17	-0,30*	-0,31*	0,16	-0,35*
5-10	0,03	0,05	-0,09	-0,16	0,04	-0,13
10-20	0,14	-0,25	0,16	0,14	-0,25	0,14
<i>Com deficiência hídrica</i>						
0-5	0,47*	-0,34*	0,42*	0,45*	-0,32*	0,45*
5-10	0,55**	-0,41*	0,43*	0,46*	-0,39*	0,52**
10-20	0,60**	-0,54**	0,59**	0,60**	-0,54**	0,61**
Raio Médio de raízes						
<i>Sem deficiência hídrica</i>						
0-5	0,01	0,02	-0,02	-0,07	0,02	-0,01
5-10	0,03	-0,04	0,04	0,03	-0,05	0,03
10-20	0,45**	-0,54**	0,55**	0,50**	-0,54**	0,54**
<i>Com deficiência hídrica</i>						
0-5	-0,36*	0,21	-0,31*	-0,40*	0,20	-0,33*
5-10	0,07	0,05	-0,02	-0,03	0,02	0,04
10-20	0,01	0,05	0,01	0,02	0,06	0,03

ns: não significativo, *: $p < 0,05$ e **: $p < 0,01$.

No entanto, em situações de seca, devem ser consideradas camadas mais profundas. Considerando que as recomendações de correção da acidez do solo abrangem diversos anos agrícolas, o uso da camada de 0-20 cm para recomendação de calagem mostra-se mais prudente em função do risco de ocorrência de estiagens. Destaca-se que experimentos visando determinar profundidade de amostragem para o SPD podem ser feitos utilizando colunas indeformadas de solo, por meio de avaliações de atributos da parte aérea e de raízes das culturas, como foi também relatado por Nolla e Anghinoni (2006) para a cultura da soja. No entanto, é fundamental que se considere diferentes situações de disponibilidade hídrica no solo e materiais genéticos com variados graus de tolerância ao Al a fim de estabelecer critérios adequados para a tomada de decisão quanto à recomendação de calagem.

4.2.2. Extração de nutrientes pelas plantas de milho

A calagem aumentou a extração de K, S, Mg, Cu e Zn e reduziu a extração de Mn, na ausência de déficit hídrico (Figura 15). Com o aumento do pH e neutralização do Al^{3+} trocável (Tabela 4), em condição de adequada disponibilidade hídrica, o incremento na absorção dos nutrientes e a diminuição na extração de Mn indica o favorecimento da calagem no desenvolvimento da cultura. O híbrido P-32R22 extraiu maiores quantidades de K e S que o híbrido P-30F53, e a extração de Ca foi maior no híbrido P-30F53, independentemente da calagem, na ausência de déficit hídrico. De maneira geral, poucas diferenças foram observadas na extração de nutrientes entre os híbridos de milho utilizados.

Mesmo com o aumento no teor de Ca^{2+} trocável no solo pela aplicação de calcário, não foi observado incremento na extração desse nutriente, na ausência de deficiência hídrica (Figura 15). Com base no comportamento observado do crescimento das raízes, na ausência de déficit hídrico, provavelmente os teores de Ca^{2+} das camadas superficiais foram suficientes

para a nutrição da cultura, mesmo na ausência de calagem, até o momento do corte das plantas. Em SPD, a adequada disponibilidade hídrica nas camadas superficiais (CAIRES e DA FONSECA, 2000) e o alto conteúdo de bases trocáveis nessas camadas (CAIRES et al., 1998), devido ao aumento no conteúdo de matéria orgânica nesse sistema, têm causado pouca ou nenhuma resposta das culturas à calagem em plantio direto, na ausência de déficit hídrico. 61

Com déficit hídrico, todos os nutrientes analisados foram afetados pela aplicação de calcário, tendo ocorrido incrementos na extração de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu e Zn, e diminuição na extração de Mn, pelas plantas de milho (Figura 15). A extração de N, P, K, Ca, Mg e S foram correlacionadas significativamente com a densidade de comprimento de raízes nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm ($P < 0.05$). Tanguilig et al. (1987) relatam que, em situações de stress hídrico, a extração de nutrientes é mais influenciada pela capacidade das raízes em absorver nutrientes do que pela transpiração. Deste modo, o maior volume de solo explorado pelas raízes, nessas condições, proporcionou maior absorção desses nutrientes, melhorando, assim, a nutrição da cultura do milho. Não houve diferenças entre os híbridos utilizados na extração de nutrientes pela cultura, na presença de déficit hídrico.

Os valores de $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ obtidos com a aplicação de calcário (Tabela 4) são condizentes com os níveis considerados ideais para a absorção de macronutrientes (MALAVOLTA, 2006). Assim, a extração de N, P e S foi favorecida pela melhoria nas condições de acidez do solo.

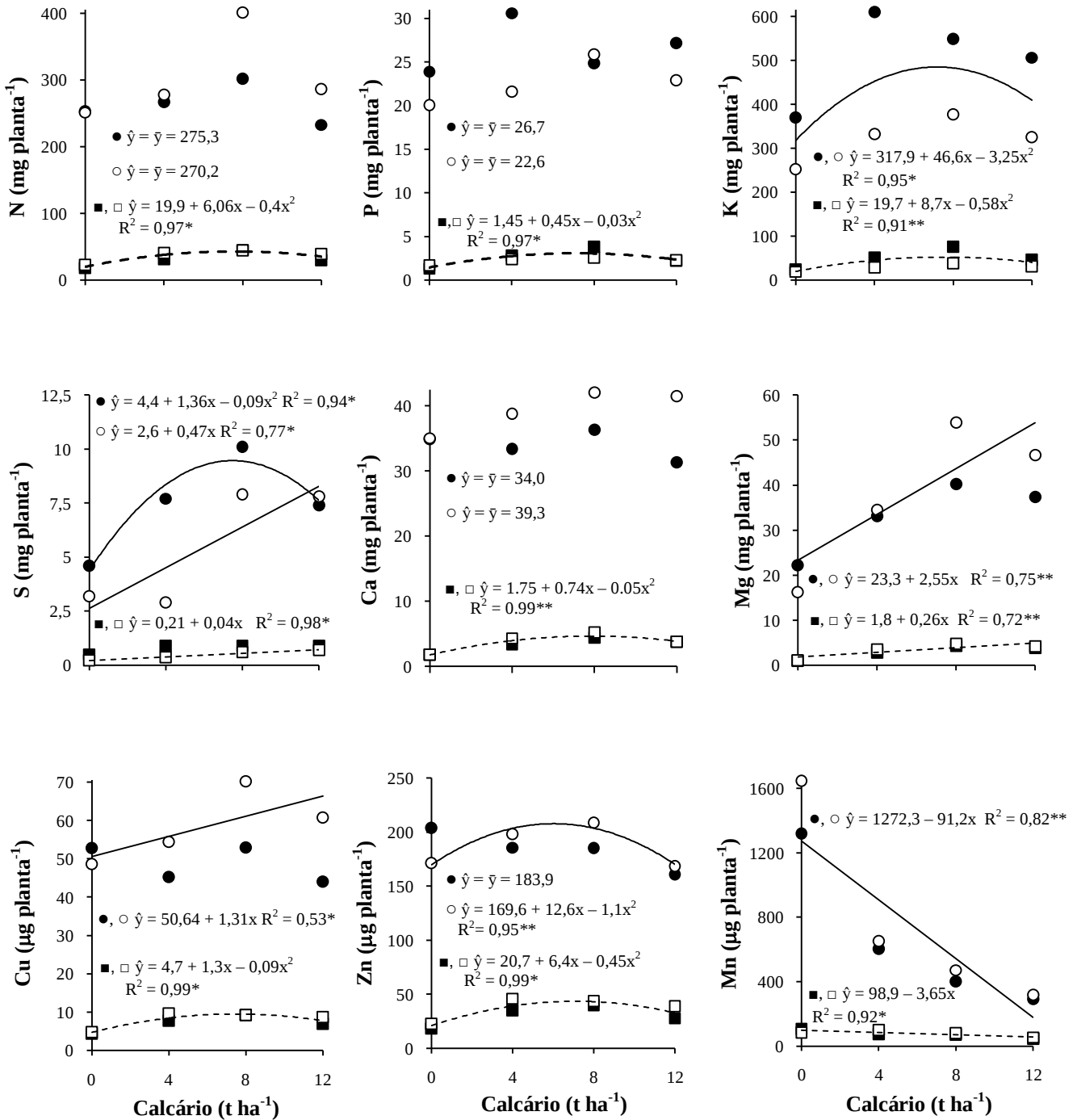


Figura 15. Extração de nutrientes pelas plantas de milho, em função de doses de calcário, em dois níveis de volume total de poros (VTP) ocupados com água, com diferentes híbridos: 80% - P32R22 (●), 80% - P30F53 (○), 50% - P32R22 (■) e 50% - P30F53 (□). *: $P < 0.05$ e **: $P < 0.01$

A disponibilidade de K^+ no solo pode ser diminuída pela aplicação de calcário, quando há grande adição de Ca^{2+} e Mg^{2+} , os quais competem pelos sítios de troca na fase sólida do solo, podendo causar lixiviação de K^+ no solo. Caires et al. (2004) observaram decréscimo na concentração de K no tecido foliar de milho após a calagem, que foi correlacionado negativamente com a relação $(Ca+Mg)/K$ no solo. Andreotti et al. (2000) também observaram intensa competição entre Ca, Mg e K pelos sítios de troca no momento da absorção, com diminuição de K nas folhas de milho à medida que se aumentou os teores de Ca e Mg no solo. No entanto, a correção da acidez do solo pela calagem exerceu efeito positivo na extração de K pelas plantas de milho no experimento avaliado em campo (Tabela 6), pela melhoria nas condições de acidez do solo. Além disso, o Ca em concentrações adequadas favorece a absorção de K, pela participação na abertura dos canais celulares que possibilitam a entrada de K na planta (VIETS, 1944, citado por MALAVOLTA, 2006). Não se observou diminuição na disponibilidade de K^+ no solo com a calagem, e mesmo com o aumento na extração de Ca e Mg, a calagem aumentou também a extração de K, fato ocorrido tanto na presença quanto na ausência de déficit hídrico, concordando com os resultados obtidos com a cultura no campo. Portanto, possivelmente as concentrações de Ca e Mg no solo não foram tão elevadas a ponto de dificultar a absorção de K e, pelo contrário, pode ter havido efeito sinérgico do Ca com K na planta. O K tem como uma de suas principais funções nas plantas o controle da abertura e fechamento estomático (MALAVOLTA, 2006). Logo, em situações de déficit hídrico, é fundamental a presença desse nutriente para que a planta suporte tais condições, mantendo o turgor celular (TANGUILIG et al., 1987).

O aumento observado na extração de Cu e Zn pode ser explicado pela melhoria observada no crescimento radicular com a calagem, na presença de déficit hídrico. Na ausência de déficit hídrico, não houve alteração no crescimento radicular do milho, portanto outros mecanismos podem explicar a maior extração de micronutrientes nessas condições. A

elevação no pH do solo causa diminuição na disponibilidade de Cu e Zn no solo (CAMARGO, VALADARES e DECHEN, 1982). Esse efeito pode ser verificado no presente trabalho, pois na maior dose de calcário utilizada, houve menor extração desses nutrientes (Figura 15). No entanto, a elevação nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} com a aplicação de calcário pode aumentar a disponibilidade de Cu^{2+} e Zn^{2+} trocáveis no solo, com a liberação desses íons para a solução do solo, aumentando a sua disponibilidade em condição de pH menos elevado. Esses efeitos, porém, ocorreram apenas nas colunas indeformadas de solo, não tendo sido observado nas condições de campo. Destaca-se que, nessa situação, as raízes das plantas ficam confinadas ao tamanho das colunas, aumentando a exploração do solo pelas raízes, potencializando assim a absorção de nutrientes que ocorrem em menores quantidades no solo.

A redução observada na extração de Mn (Figura 15) não foi verificada no campo (Tabela 7). A calagem e o consequente aumento no pH do solo é uma prática que afeta diretamente a disponibilidade de Mn no solo (NASCIMENTO, FONTES e NEVES, 2002). No entanto, a ausência de efeito observada na extração de Mn pela cultura do milho no campo não permite afirmar que a redução na extração de Mn pelas plantas de milho detectada nas colunas de solo foi limitante para a cultura. Não foi observada deficiência de Mn nas plantas, e as concentrações observadas na maior dose de calcário estão dentro dos teores considerados suficientes para a nutrição do milho (MALAVOLTA, VITTI e OLIVEIRA, 1997).

4.2.3. Massa seca da parte aérea

A massa seca da parte aérea das plantas de milho foi incrementada pela aplicação de calcário nos dois níveis de água utilizados, sem diferença significativa entre os híbridos (Figura 16). Sem deficiência hídrica, o ponto de máximo calculado pela curva de regressão ajustada foi obtido com a dose de $5,1 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário. Com deficiência hídrica, o ponto de máximo foi obtido com a dose de $9,3 \text{ t ha}^{-1}$. Portanto, a dose de calcário necessária para atingir a máxima produção de massa seca do milho, com deficiência hídrica no solo, foi

82,4% maior que a dose necessária sem deficiência hídrica. Destaca-se que a dose estimada para a máxima produção de grãos de milho no experimento conduzido no campo foi $9,3 \text{ t ha}^{-1}$, portanto muito similar à calculada para a massa seca na presença de déficit hídrico.

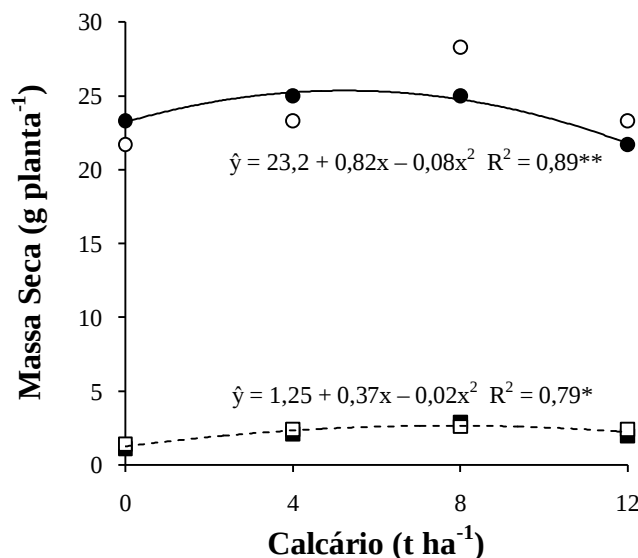


Figura 16. Massa seca da parte aérea de plantas de milho, em função de doses de calcário, em dois níveis de volume total de poros (VTP) ocupados com água, com diferentes híbridos: 80% - P32R22 (●), 80% - P30F53 (○), 50% - P32R22 (■) e 50% - P30F53 (□). *: $P < 0.05$ e **: $P < 0.01$

Análises de correlação entre os atributos químicos de acidez do solo e a produção de massa seca do milho, com e sem deficiência hídrica, considerando a média dos dois híbridos (Tabela 8), mostram claramente que a melhoria na acidez do solo com a calagem pouco influencia o desenvolvimento da cultura do milho quando as condições de disponibilidade hídrica são adequadas. Por outro lado, na presença de déficit hídrico, os atributos químicos do solo influenciaram consideravelmente a produção de massa seca do milho.

Os resultados encontrados permitem afirmar que, na ausência de deficiência hídrica, a cultura do milho apresenta bom desenvolvimento em SPD, havendo pequeno incremento no seu desenvolvimento com a aplicação de calcário, que dificilmente se reflete em maior rendimento de grãos. Todavia, na presença de déficit hídrico, a cultura responde a doses relativamente altas de calcário, devido ao maior crescimento radicular (GONZALES-ERICO

et al., 1976; FREIRE, 1984), e também à maior toxicidade do Al^{3+} em condições de seca no SPD (CAIRES, 2007). Considerando um sistema de sucessão cultural durante diversos anos agrícolas, sem irrigação, a calagem é uma prática fundamental para garantir a sustentabilidade (TARKALSON, HERGERT e CASSMAN, 2006) e eficiência econômica do SPD (CAIRES, BANZATTO e DA FONSECA, 2000; CAIRES et al., 2005).

Tabela 8. Coeficientes de correlação entre a produção de massa seca de milho e atributos químicos da acidez do solo em diferentes profundidades

Atributo	Profundidade	Com deficiência hídrica	Sem deficiência hídrica
<i>pH (CaCl₂)</i>	0-5 cm	0,53**	0,16
	5-10 cm	0,48**	0,11
	10-20 cm	0,38*	0,03
<i>Al³⁺</i>	0-5 cm	0,58**	-0,22
	5-10 cm	0,56**	-0,19
	10-20 cm	0,50**	-0,12
<i>Ca²⁺</i>	0-5 cm	0,55**	0,18
	5-10 cm	0,57**	0,20
	10-20 cm	0,36*	0,03
<i>Mg²⁺</i>	0-5 cm	0,48**	0,09
	5-10 cm	0,55**	0,20
	10-20 cm	0,35*	-0,03
<i>Saturação por Alumínio</i>	0-5 cm	-0,58**	-0,22
	5-10 cm	-0,57**	-0,21
	10-20 cm	-0,50**	-0,12
<i>Saturação por bases</i>	0-5 cm	0,54**	0,17
	5-10 cm	0,52**	0,14
	10-20 cm	0,33*	0,03

*: significativo a $p < 0.05$ e **: significativo a $p < 0.01$

5. CONCLUSÕES

A calagem na superfície em sistema plantio direto corrigiu a acidez do solo, aumentou os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e reduziu o teor de Al^{3+} trocável em camadas abaixo do local de sua aplicação, mas os efeitos foram mais pronunciados nas camadas mais superficiais do solo.

Com a correção da acidez do solo pela calagem superficial em plantio direto, houve melhoria na nutrição e extração de nutrientes pela cultura do milho, refletindo a melhoria no crescimento radicular, principalmente até 10 cm de profundidade.

A produção de grãos de milho foi prejudicada em condições de alta acidez do solo, na ausência de aplicação calcário em sistema plantio direto. A calagem superficial ocasionou importante acréscimo na produtividade de milho, com máximo rendimento de grãos estimado na dose de $9,2 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário.

Os atributos químicos de acidez do solo influenciaram diretamente a produção de grãos de milho, sendo que as melhores condições encontradas na camada de 0-20 cm para a obtenção das maiores produtividades foram: $\text{pH} (\text{CaCl}_2) > 5,0$; $\text{Al}^{3+} < 3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Ca}^{2+} > 30 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Mg}^{2+} > 10 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (relação $\text{Ca/Mg} = 3$); $\text{m}\% < 5\%$ e $\text{V}\% > 50\%$.

Na ausência de déficit hídrico, a calagem superficial não alterou o crescimento radicular da cultura do milho em plantio direto, enquanto que, em situação de deficiência hídrica, houve melhoria significativa no crescimento radicular do milho com a aplicação de calcário na superfície.

A extração de nutrientes e a massa seca das plantas de milho foram afetadas pela aplicação de calcário, com e sem déficit hídrico. Porém, a dose de calcário necessária para a obtenção da máxima produção de massa seca na presença de déficit hídrico foi 82% maior que na ausência de deficiência hídrica.

O comportamento dos híbridos P-32R22 e P-30F53 foi relativamente semelhante. O híbrido P-30F53, utilizado no campo, foi altamente produtivo, porém sensível à presença de Al^{3+} , principalmente em condições de stress hídrico.

O efeito tóxico do Al^{3+} em plantio direto pode variar de acordo com a disponibilidade hídrica do solo. A menor toxicidade do Al em sistema plantio direto, decorrente de sua complexação com frações coloidais da matéria orgânica, somente ocorre quando não há falta de água no solo. Em situação de seca, a fitotoxicidade do Al aumenta e compromete o crescimento radicular, a nutrição e a produção de milho cultivado em sistema plantio direto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU JR., C.H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A.F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 337-343, 2003.

ALCARDE, J.A.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A. S.; ALVARES V., V.H., eds. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade brasileira de Ciência do Solo. p.291-334, 2003.

ALLEONI, L. R. F. ; CAMBRI, M. A. ; CAIRES, E. F. ; GARBUIO, F. J. . Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, p. 1010-1017, 2010.

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 Agricola**, v. 60, p. 119-123, 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.28, p.115–123, 2004.

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, 2004.

AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I. Alterações de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.695-702, 2001.

ANDRADE, C.L.; ALBUQUERQUE, P.E.R.; BRITO, R.A.L.; RESENDE, M. Variabilidade e manejo da irrigação da cultura do milho. **Circular Técnica da Embrapa**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Circular 85, 2006

ANDREOTTI, M.; SOUZA, E.C.A.; CRUSCIOL, C.A.; RODRIGUES, J.D. ; BÜLL, L.T. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes pelo milho em razão da saturação por bases e da adubação potássica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.35, p.2437-3446, 2000.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. SBCS. 1 ed. p.205-274, 2007.

BRADY, D.J.; EDWARDS, D.G.; ASHER, C.J.; BLAMEY, F.P.C.; Calcium amelioration of aluminium toxicity effects on root hair development in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). **New Phytologist**, v.123, p.531-538, 1993.

BROWN, T.T.; KOENIG, R.T.; HUGGINS, D.R.; HARSH, J.B.; ROSSI, R.E. Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.72, p. 634-640, 2008.

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

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 de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.315-327, 1999.

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.; 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.; 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, 2002.

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.

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.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. Lime application in the establishment of a no till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil Tillage Research**, v.89, p.3-12, 2006.

CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J.; ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.87-98, 2006a.

CAIRES, E. F. ; CORRÊA, J. C. L. ; CHURKA, S. ; BARTH, G. ; GARBUIO, F. J. . Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Scientia Agricola**, v. 63, p. 502-509, 2006b.

CAIRES, E. F. . Calagem no sistema plantio direto para correção da acidez e suprimento de Ca e Mg como nutrientes.. In: Simpósio sobre Informações Recentes para Otimização da Produção Agrícola, 2007, Piracicaba. Anais do Simpósio sobre Informações Recentes para Otimização da Produção Agrícola. Piracicaba : International Plant Nutrition Institute - IPNI, 2007.

CAIRES, E. F. ; GARBUIO, F. J. ; CHURKA, S. ; BARTH, G. ; CORRÊA, J. C. L. . Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 28, p. 57-64, 2008.

CAMARGO, A. P. ; VAN RAIJ, B. ; CANTARELLA, H. V. ; ROCHA, T. R. ; NAGAI, V. ; MASCARENHAS, H. . Efeito da calagem nas produções de cinco cultivos de milho, seguidos de algodão e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 7, p. 1007-1012, 1982.

CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; DECHEN, A.R. Efeito do pH e da incubação na extração de manganês, zinco, cobre e ferro do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.6, p.83-88, 1982.

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. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (Eds.). **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato p.147-196, 1993.

CHRIST, M. e DAVID, M.B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a spodosol. **Soil Biology Biochemistry**. v.28, p.1191-1199, 1996.

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

CONYERS, M.K.; HEENAN, D.P.; MCGHIE, W.J.; POILE, G.P. Amelioration of acidity with time by limestone under contrasting tillage. **Soil Tillage Research**, v.72, p.85–94, 2003.

DEBRECZENI, K.; KISMANYOKY, T.S. Acidification of soils in long-term field experiments. **Communications of Soil Science and Plant Analysis**, v.36, p.321–329, 2005.

DELHAIZE, E.; RYAN, P.R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, v. 107, p. 315-321, 1995.

DIEHL, R.C., MIYAZAWA, M.; TAKAHASHI, H.W. Compostos orgânicos hidrossolúveis de resíduos vegetais e seus efeitos nos atributos químicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.32, p.2653-2659, 2008.

DUARTE, A.P.; KIEHL, J.C.; CAMARGO, M.A.F.; RECO, P.C. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em cultivares de milho originárias de clima tropical e introduzidas de clima temperado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, n.3, p.1-19, 2003.

DYERS, C.L.; KOPITKE, P.M.; SHELDON, A.R.; MENZIES, N.M. Influence of soil moisture content on soil solution composition. **Soil Science Society of American Journal**. v.72, p.355-361, 2008.

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

ERNANI, P. R. ; NASCIMENTO, J. A. L. ; OLIVEIRA, L. C. . Increase of grain and green matter of corn by liming. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 22, n. 2, p. 275-280, 1998.

ERNANI, P. R. ; CASSOL, P.C. ; MORIGUTTI, H. ; GARCIA, M. ; VACARO, M. Aplicação de gesso agrícola e lixiviação de potássio em solos catarinenses. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 7-16, 1993.

ERNANI, P.R.; BAYER, C.; MAESTRI, L. Corn yield as affected by liming and tillage system on an acid Brazilian Oxisol. **Agronomy Journal**, v.94, p.305–309, 2002.

FAEP – Federação de Agricultura do Estado do Paraná. <http://www2.faep.com.br/>. Acesso em 06/06/2009.

FEBRAPDPD - Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. <http://www.febrapdp.org.br/>. Acesso em 06/04/2010.

FELDHAUS, I.C. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem superficial e à adubação nitrogenada realizada na aveia em sistema plantio direto. Ponta Grossa:, 2006. 82p. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Ponta Grossa.

FRANCHINI, J.C.; HOFFMANN-CAMPO, C.B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. Organic composition of green manures during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**., v.34, p.2045–2058, 2003.

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.

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.

FURLANI, P. R.; FURLANI, A. M. C. Tolerância a alumínio e eficiência a fósforo em milho e arroz: características independentes. **Bragantia**, v. 50, p. 331-340, 1991.

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

GONZALES-ERICO, E.; WOLF, J.M.; NADERMAN, C.; SOARES, W.V.; GALRÃO, E.Z. Relações entre toxidez de alumínio, desenvolvimento de raízes, absorção de água e produção de milho em um Oxisol (Latosolo Vermelho-Escuro) do Distrito Federal. **Ciência e Cultura**, v.28, p.181-182, 1976.

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.

IAPAR, Médias históricas das estações do IAPAR. http://200.201.27.14/Site/Sma/Estações_IAPAR/Estações_Paraná.htm. Acesso em 21/12/2009.

ISHITANI M.; RAO I.; WENZL P.; BEEBE S.; TOHME J. Integration of genomics approach with traditional breeding towards improving abiotic stress adaptation: drought and aluminum toxicity as case studies. **Field Crops Research**, v.90, p.35-45, 2004.

JIAO, Y.; WHALEN, J.K. ; HENDERSHOT, W.H. No tillage and manure applications increase aggregation and improve nutrient retention in a sandy-loam soil. **Geoderma**, v.134, p.24-33, 2006.

KARLEN, D.L.; FLANNERY, R.L.; SADLER, E.J. Nutrient and dry matter accumulation rates for high yielding maize. **Journal of Plant Nutrition**, v.10, p.1409-1417, 1987.

KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annals Reviews of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. v. 46, p.237-260, 1995.

KOCHIAN, L.V.; HOEKENGA, O.; PIÑEROS, M. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Reviews of Plant Biology**. v.55 p.459-493, 2004.

LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. New York, John Wiley, 449 p, 1979.

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

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

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

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. Academic Press, San Diego, 1995.

MARIANO, ED ; KELTJENS, WG . Long-Term Effects of Aluminum Exposure on Nutrient Uptake by Maize Genotypes Differing in Aluminum Resistance. **Journal of Plant Nutrition**, v. 28, p. 323-333, 2005.

MASCHIETTO, E.H.G. Alterações químicas do solo, produção e qualidade dos grãos de milho em função da calagem na superfície em sistema plantio direto, 40f. 2006, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual de Ponta Grossa.

MAZZOCATO, A.C.; ROCHA, P.S.G.; SERENO, M.J.C.M.; BOHNEN, H.; GRONGO, V., BARBOSA NETO, J.F. Tolerância ao alumínio em plântulas de milho. **Ciência Rural**, v.32, p.1924, 2002.

MISRA, A.; TYLER, G. Influence of soil moisture on soil solution chemistry and concentrations of minerals in the calcicoles *Phleum phleoides* and *Veronica spicata* grown on a limestone soil. **Annals of Botany**, v.84, p.401-410, 1999.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian Archives of Biology and Technologies**, v.45, p.251–256, 2002.

MORAES, M.F.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; COSCIONE, A.R. Mobilidade de íons em solo ácido com aplicação de calcário, ácido orgânico e material vegetal em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.4, p. 673-684, 2007.

MOUSSA-MACHRAOUI, S.B.; ERROUISSI F.; NOUIRA S. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. **Soil Tillage Research**, v. 106, p.247-253, 2010.

NASCIMENTO, C.W.A.; FONTES, R.L.F.; NEVES, J.C.L. Dessorção, extração e fracionamento de manganês em Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.589-597, 2002.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n.1, p. 237-248, 2008.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Atividade e especiação química na solução afetadas pela adição de fósforo em latossolo sob plantio direto em diferentes condições de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.955-963, 2006.

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.

OLMOS, I.L.J.; CAMARGO, M.N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. **Ciência e Cultura**, v.28, p.171–180, 1976.

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).

PIONEER SEMENTES. Características do híbrido 30F53. www.pioneersementes.com.br. Acesso em 05/05/2010.

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.

PRADO, R.M. Saturação por bases e híbridos de milho sob sistema plantio direto. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, p.391-4, 2001.

QUAGGIO, J.A. Reação do solo e seu controle. In: **Simpósio avançado de química e fertilidade do solo**, Campinas, Anais. p. 53-89, 1986.

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.

RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E.C.; GATIBONI, L.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.797–805, 2000.

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**, Santa Maria, v.35, n.3, p.562-569, 2005.

RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, v.72, p.40-44, 1980.

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.; VALE, L.S.R.; GRASSI FILHO, H.; MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.491–497, 1994.

ROUT, G.R., SAMANTARAY, S.; DAS, P.. Aluminium toxicity in plants: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.21, p.3-21, 2001

SÁ, J. C. M. . Sistema de produção de milho visando alta produtividade na região dos Campos Gerais no Centro-Sul do Paraná. In: L. T. Bull; H. Cantarella. (Org.). **Cultura do milho** - fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, SP: POTAFÓS, v. 1, p. 249-279, 1993.

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: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Lavras: Universidade Federal de Lavras/Departamento de Ciência do Solo, p.267–319, 1999.

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.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JÚNIOR, A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.427-436, 2000.

SCHILDKNECHT, P.H.P.A. O efeito tóxico do Al^{3+} em raízes de milho e em células V79 e a participação da parede celular na tolerância ao cátion. 2004, 143 f. Tese (doutorado). Universidade de Campinas.

SEAB - Secretaria de Agricultura e do Abastecimento do Paraná. <http://www.seab.pr.gov.br/>. Acesso em 02/06/2009.

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

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. SBCS. 1 ed. p.205-274, 2007.

SPARKS, D.L. Environmental soil chemistry. 2 ed. San Diego, Academic Press, 2003. 352p.

TANG, C.; RENGEL, Z.; DIATLOFF, E.; GAZEY, C. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. **Field Crops Research**, v.80, p.235-244, 2003.

TANGUILIG, V.C.; YAMBAO, E.B.; O' TOOLE, J.C.; DE DATTA, S.K. Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. **Plant and Soil**, v.103, p.155-168, 1987.

TARKALSON, D.D.; HERGERT, G.W.; CASSMAN, K.G. Long term effects of tillage on soil chemical properties and grain yields of a dryland 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.

TRIPLETT, G.B.; DICK, W.A. No tillage crop production: A revolution in agriculture! **Agronomy Journal**, v.100, p.153-165, 2008.

VAN RAIJ, B.; CAMARGO, A. P. V. ; CANTARELLA, H. ; SILVA, N. M. . Alumínio trocável e saturação em bases como critério para recomendação de calagem. **Bragantia**, v. 42, n. 13, p. 149-150, 1983.

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

VAN RAIJ, B.; FURLANI, P. R. ; QUAGGIO, J. A. ; PETTINELI JÚNIOR, A. . Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em tres níveis de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 101-108, 1998.

VASCONCELLOS, C.A.; VIANA, M.C.M.; FERREIRA, J.J. Acúmulo de matéria seca e de nutrientes em milho cultivado no período inverno-primavera. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p.23-29, 1998.

WUEST, S.B. Soil biopore estimation: effects of tillage, nitrogen and photographic resolution. **Soil Tillage Research**, v.62, p.111-116, 2001.

ZAMBROSI, F.C.B.; ALLEONI, L.R.F.; CAIRES, E.F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.37, p.110-117, 2007.