

MOVIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS DE CALCÁRIO NO PERFIL DE UM CAMBISSOLO EM PLANTIO DIRETO⁽¹⁾

A. S. AMARAL⁽²⁾, I. ANGHINONI⁽³⁾, R. HINRICHS⁽⁴⁾ & I. BERTOL⁽⁵⁾

RESUMO

A aplicação superficial de calcário tem-se mostrado eficiente na correção da acidez do solo no sistema plantio direto. Ao contrário do esperado, os efeitos da aplicação de calcário têm ocorrido em profundidade e em períodos de tempo relativamente curtos, apesar da sua baixa solubilidade no solo. Os objetivos deste trabalho foram: (a) detectar a presença dos minerais calcita e dolomita do calcário no solo; (b) verificar as alterações químicas relacionadas com a acidez no perfil do solo, decorrentes da aplicação de calcário na superfície, e (c) verificar a movimentação de partículas de calcário e a sua participação na correção da acidez do solo no sistema plantio direto. Foi realizado um experimento em casa de vegetação, utilizando colunas de PVC com amostras indeformadas de um Cambissolo Húmico aluminico léptico argiloso, manejado há cinco anos em sistema plantio direto. A dose de calcário comercial (PRNT 76 %) aplicada no topo da coluna correspondeu a 12 Mg ha⁻¹. Aos sete dias da aplicação do calcário, já foi possível verificar o transporte de partículas finas (< 0,105 mm) do calcário aplicado na superfície do solo até à profundidade de 20 cm, visto que foram detectados os minerais calcita e dolomita nesta profundidade. Os efeitos nos atributos químicos do solo, decorrentes da aplicação de calcário na superfície, ocorreram em todo o perfil, sendo mais expressivos até 10 cm e aos 20 cm de profundidade, onde houve acúmulo de calcário. O transporte de calcário através da água da chuva pode ser um mecanismo importante na correção da acidez do solo em profundidade no sistema plantio direto.

Termos de indexação: calagem superficial, sistema plantio direto, colunas indeformadas de solo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e executada com recursos do CNPq, FAPERGS E PRONEX. Trabalho recebido para publicação em dezembro de 2002 e aprovado em janeiro de 2004.

⁽²⁾ Professor de Solos do Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI. Campus de Erechim, Caixa Postal 743, CEP 99700-000 Erechim (RS). E-mail: asamaral@uri.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. CEP 90540-000 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: ibanghi@ufrgs.br

⁽⁴⁾ Professora do Instituto de Geociências, UFRGS. E-mail: ruth@cme.ufrgs.br

⁽⁵⁾ Professor da Faculdade de Agronomia, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina – CAV/ UDESC. Av. Luiz de Camões 2090, Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). Bolsista do CNPq. E-mail: a2ib@cav.udesc.br

SUMMARY: *MOVEMENT OF LIME PARTICLES IN THE PROFILE OF AN INCEPTISOL UNDER NO-TILLAGE*

Surface lime application has shown to be efficient for correcting soil acidity in no-tillage systems. Contrary to the expected, this effect has occurred in deeper soil layers and in a relatively short time, in spite of the low solubility of liming materials. The objectives of this research were: (a) to detect the presence of calcite and dolomite minerals originated from lime in the soil; (b) to verify chemical alterations related to soil acidity in the soil profile due to surface lime application, and (c) to verify the movement of lime particles and its effects in correcting the soil acidity in no-tillage system. A greenhouse experiment was conducted with undisturbed columns of an Inceptisol (Haplumbrept), which has been under no-tillage for five years. A commercial lime rate of 12 Mg ha⁻¹ was applied on top of the columns. Seven days after the application of lime it was possible to verify a transfer of fine lime particles (< 0.105 mm) from the soil surface down to 20 cm soil depth as substantiated by the presence of calcite and dolomite minerals at this depth. The effects of surface lime application on chemical soil attributes were observed throughout the soil profile, but were more evident up to 10 cm and also at a depth of 20 cm, where there was accumulation of lime. The movement of lime particles with rain water may be an important mechanism of correction of soil subsurface soil acidity in no-tillage systems.

Index terms: surface lime, no-tillage system, undeformed soil columns.

INTRODUÇÃO

O plantio direto constitui uma excelente alternativa de manejo do solo, pois, além de reduzir eficazmente a erosão, preserva a qualidade estrutural do solo obtida ao longo do tempo. O uso desse sistema de manejo, embora ocasione um aumento da densidade do solo na superfície, com conseqüente diminuição do volume de macroporos nessa camada e da rugosidade superficial (Bertol et al., 2000), não tem prejudicado a infiltração de água (Schick et al., 2000; Petrere & Anghinoni, 2001), causado erosão hídrica (Schick et al., 2000) ou afetado o desenvolvimento de raízes das plantas (Sá & Petrere, 1995), desde que se observem os fundamentos do sistema plantio direto.

Com o decorrer do tempo, em geral, no solo sob plantio direto, verifica-se um aumento de bioporos pela ação contínua de raízes e alta atividade da meso e macrofauna (Gassen & Kocchann, 1998; Wuest, 2001). Os bioporos e a estrutura de boa qualidade do solo, graças ao seu não-revolvimento, permitem a formação de canais, os quais são mantidos intactos e contínuos no perfil do solo (Gassen & Kocchann, 1998). A não-mobilização do solo e o aumento da matéria orgânica determinam, ao longo do tempo, um ambiente propício para a atividade de minhocas, larvas de insetos e de outros organismos e o aumento da atividade microbiana. Esses processos contribuem para a formação e estabilização dos agregados do solo, melhorando também a sua estrutura (Molope et al., 1987). Quando essas propriedades físicas são preservadas, as taxas de infiltração instantânea de água no sistema plantio direto e em pastagem nativa são maiores do que no

preparo de solo com revolvimento convencional (Schick et al., 2000; Petrere & Anghinoni, 2001).

Os atributos físicos do solo inerentes ao sistema plantio direto, associados às condições de clima e solo no Sul do País, podem possibilitar a movimentação, no perfil do solo, de partículas finas de calcário que não reagiram na superfície. A migração das partículas pode ser importante para explicar, pelo menos em parte, os efeitos na neutralização da acidez e na concentração de cálcio e magnésio verificados na subsuperfície do solo após períodos relativamente curtos da aplicação superficial de calcário.

Uma das formas de comprovar efetivamente a movimentação de partículas finas do calcário no perfil do solo é a identificação de calcita e dolomita no solo. O problema é que, geralmente, as quantidades de partículas de calcário transportadas são muito pequenas em relação ao volume de solo. A principal técnica de identificação de minerais, a difratometria de raios-X (DRX), é de aplicabilidade limitada quando eles estão presentes em concentrações menores do que 5 % nas amostras de solo (Trollard et al., 1995). Esse problema pode ser contornado pelo uso de métodos complementares à técnica de DRX, como a análise térmica diferencial (ATD) e a microscopia eletrônica.

As características peculiares do sistema plantio direto também admitem a dissolução e reprecipitação de carbonatos no solo ao longo do tempo. A dissolução dos minerais constituintes do calcário (calcita e dolomita) na superfície do solo pode saturar a água infiltrada com os íons Ca²⁺, Mg²⁺ e HCO₃⁻ e, assim, à medida que o produto de solubilidade seja excedido e outras condições necessárias estejam

presentes (baixa pressão parcial de CO_2 e evaporação), os referidos íons podem reprecipitar em camadas inferiores. Admitindo-se tal possibilidade e detectada a dolomita e calcita por meio da DRX, uma questão relevante seria como distinguir se os minerais identificados no interior do solo seriam litogênicos (partículas originais do calcário aplicado na superfície do solo que foram transportadas sem se dissolverem) ou pedogênicos (sofreram os processos de dissolução e reprecipitação).

Os objetivos deste trabalho foram: (a) detectar a presença dos minerais calcita e dolomita do calcário no solo; (b) verificar as alterações químicas relacionadas com a acidez no perfil do solo, decorrentes da aplicação de calcário na superfície, e (c) verificar a movimentação de partículas de calcário e a sua participação na correção da acidez do solo no sistema plantio direto.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em colunas de PVC que continham amostras indeformadas de solo em casa de vegetação, no Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), entre outubro de 2000 e abril de 2001.

Utilizaram-se amostras de um Cambissolo Húmico aluminóico léptico argiloso, coletadas em um experimento na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Campus do Centro de Ciências Agroveterinárias de Lages (SC). O experimento foi iniciado em maio de 1995, com a aplicação de calcário, fósforo e potássio, incorporados ao solo com uma aração e duas gradagens, de acordo com CFSRS/SC (1994). Foram utilizados, na ocasião, $3,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico (PRNT 100 %), 125 kg ha^{-1} de superfosfato triplo e 100 kg ha^{-1} de cloreto de potássio, iniciando-se, em seguida, o plantio das culturas, sendo sempre milho (*Zea mays*) no verão e ervilhaca comum (*Vicia sativa*) no inverno. O experimento foi manejado no sistema plantio direto, sem reaplicação de calcário até o momento da amostragem (25/10/2000).

Na ocasião da amostragem do solo, o experimento estava sendo cultivado com ervilhaca comum. Para facilitar a retirada das colunas do solo, as plantas foram eliminadas nos locais de coleta. Coletaram-se amostras indeformadas em colunas de PVC de 12,0 cm de diâmetro por 22 cm de altura. A camada de coleta no solo foi de 0-20 cm. As características químicas do solo nessa camada eram: pH (H_2O) 4,7; fósforo disponível (Mehlich-1) $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$; potássio disponível (Mehlich-1) 74 mg dm^{-3} ; matéria orgânica (combustão úmida) 42 g kg^{-1} ; $\text{H} + \text{Al}$ $8,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; alumínio trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) $2,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; cálcio trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) $5,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e magnésio trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) $4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$,

determinados conforme Tedesco et al. (1995). A necessidade de calcário nessa amostragem (25/10/2000) foi de $9,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ para elevar o pH em água a 6,0 (PRNT 100 %). A composição granulométrica do solo correspondeu a 430 g kg^{-1} de argila, 100 g kg^{-1} de areia e 470 g kg^{-1} de silte.

Após a coleta, as colunas foram transferidas para câmara de crescimento, com condições de temperatura e luminosidade controladas e semeada a aveia preta. Após o desbaste, deixaram-se três plantas por coluna. A coleta da parte aérea foi realizada 70 dias após a semeadura.

Após a coleta da parte aérea das plantas, adicionou-se parafina derretida nas bordas internas das colunas, a partir da superfície do solo, com o objetivo de impedir o fluxo preferencial de água junto às paredes das colunas. Na extremidade inferior das colunas, prendeu-se um filtro de papel Whatman nº 42, que era trocado semanalmente. Adaptou-se também um funil de plástico na base de cada coluna. O conjunto (coluna, filtro e funil) foi colocado sobre um becker de vidro (500 mL) para receber o material percolado. Retiraram-se todos os resíduos orgânicos (matéria orgânica leve) da superfície das colunas e aplicaram-se 400 mL de água destilada em cada coluna, antes da aplicação dos tratamentos, com o objetivo de eliminar possíveis interferências de ácidos orgânicos remanescentes.

Após a umidade do solo se estabilizar em $\pm 18 \%$, foram aplicados os tratamentos com calcário dolomítico comercial (PRNT 76 %; PN 82,64 %; CaO 24 % e MgO 16 %).

Os tratamentos consistiram da aplicação, ou não, na superfície do solo, de $14,3 \text{ g}$ por coluna de calcário dolomítico, equivalente a uma dose de 12 Mg ha^{-1} . Utilizaram-se somente as partículas de calcário que passaram pela peneira de 0,105 mm e que ficaram retidas na de 0,053 mm.

Com base nos dados médios de precipitação pluviométrica da região da área experimental, foram aplicados 400 mL de água por coluna semanalmente, simulando uma chuva de 35 mm, durante quatro semanas. Após 24 h da aplicação de água, coletava-se a solução percolada e substituía-se o filtro.

Na solução percolada semanalmente, foram determinados os valores de pH (potenciômetro com eletrodo de vidro combinado), condutividade elétrica (condutivímetro de mesa), Ca e Mg (espectrofotometria de absorção atômica) e HCO_3^- (titulação com H_2SO_4 $0,025 \text{ mol L}^{-1}$) (Tedesco et al., 1995).

Nas amostras de solo e no material acumulado sobre os filtros, foram realizadas análises mineralógicas, por meio da técnica de DRX, para detectar a presença dos minerais calcita e dolomita. Utilizou-se equipamento Siemens Diffrac D5000, com goniômetro $\theta-\theta$ (theta-theta), radiação $\text{Cu-K}\alpha$ e monocromador de grafite. As condições de operação do tubo de raios-X foram de 40 kV e 30 mA. As

amostras foram passadas em forma de pó natural a $0,6^\circ$ por minuto. Amostras do calcário dolomítico aplicado na superfície e amostras do calcário acumulado sobre os filtros foram examinadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL, modelo JSM 5800 (20 kV) do Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFRGS. Após a retirada do último filtro, as colunas foram congeladas para facilitar a separação, através de seções transversais, em nove camadas: 0-2,0; 2,0-4,0; 4,0-6,0; 6,0-8,0; 8,0-10,0; 10,-12,0; 12,0-14,0; 14,0-16,0 e 16,0-20,0 cm, as quais foram secas e moídas. No solo, foram determinados os valores de pH em H_2O e pH em $CaCl_2$ $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (potenciômetro com eletrodo de vidro combinado), cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (KCl 1 mol L^{-1}) e potássio disponível (Mehlich-1) (Tedesco et al., 1995; EMBRAPA, 1997).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com três repetições. Procedeu-se à análise da variância, com a aplicação do teste de médias de Tukey ($P < 0,05$) para diferenciação entre os atributos químicos avaliados. O modelo estatístico utilizado para a análise da variância foi:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + \text{erro a (i,j)} + C_k + \text{erro b (i,k)} + TC_{j,k} + \text{erro c (i,j,k)} \quad (1)$$

em que B = blocos ($i = 1,2,3$); T = tratamentos ($j = 1,2$); C = camadas de solo ($k = 1,2,\dots, 9$). Para os dados analisados na solução percolada, substituiu-se o fator camadas de solo pelo fator tempo ($k = 7,14,21,28$ dias).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Movimentação vertical de calcário

Os minerais calcita e dolomita, principais constituintes do calcário dolomítico utilizado, foram facilmente identificados em amostras antes da aplicação ao solo (Figura 1a). A identificação desses minerais no solo somente foi possível nas camadas e nos filtros onde o calcário podia ser observado visualmente e não misturado com o solo. Isto aconteceu na primeira camada (0-2 cm) e onde havia calcário remanescente, como na última camada (16-20 cm), em contato direto com os filtros, evidenciando que, de fato, as partículas simplesmente percolaram com a água. O calcário acumulado sobre os filtros estava praticamente isento de solo, o que facilitou sua separação e detecção.

As análises por DRX do calcário encontrado na primeira camada (0-2 cm) e do calcário coletado nos filtros após qualquer uma das chuvas mostram a mesma posição e intensidade dos picos e a mesma proporção de altura de picos (Figura 1b). Nas camadas onde não havia impedimento para infiltração da água, não houve acúmulo de calcário.

No entanto, quando as colunas foram desmontadas, foi possível verificar visualmente acúmulo de calcário na superfície de agregados na última camada (16-20 cm) do solo (Figura 2). Todavia, após a moagem do solo existente nas colunas e da consequente mistura do calcário com o solo, a identificação de calcita e dolomita pela DRX não foi possível, provavelmente, em razão das quantidades insuficientes desses minerais no solo analisado (Trollard et al., 1995).

O deslocamento vertical de partículas do calcário ocorreu pelo movimento descendente da água aplicada que se infiltrou, por meio de canais e espaços existentes no solo que foram mantidos intactos. Convém ressaltar que, antes da adição dos tratamentos, procurou-se simular uma condição de estiagem (equivalente a 15 dias sem chuva). Além disso, utilizaram-se apenas as partículas mais finas do calcário ($0,105\text{-}0,053 \text{ mm}$), que representavam 31 % da massa do calcário comercial utilizado, o que explica a ocorrência, na primeira adição de água, da maior recuperação de calcário (Quadro 1). A quantidade total recuperada de calcário, no final das quatro semanas, chegou a 10,86 % da quantidade total aplicada na superfície do solo nas colunas.

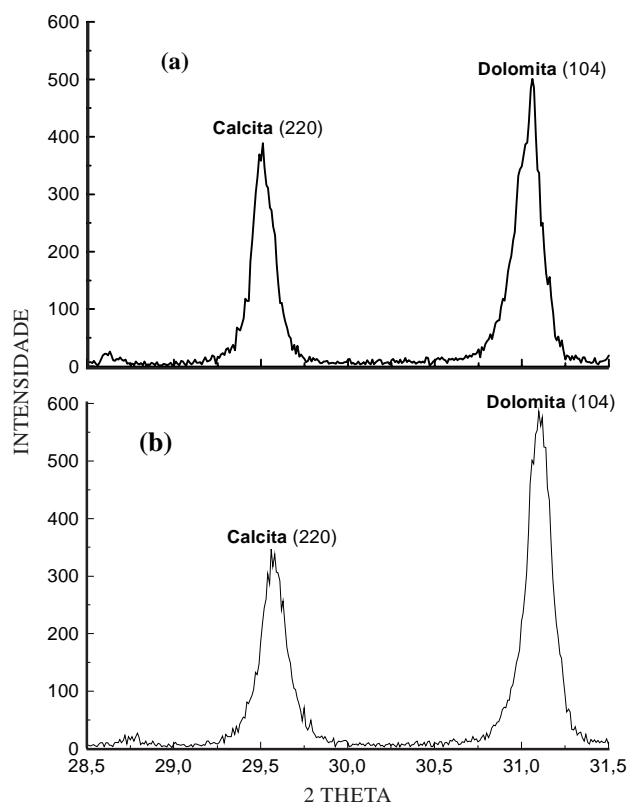


Figura 1. Difratograma de raios-X do calcário dolomítico (a) e das partículas retidas no filtro no fundo da coluna após as primeira adição de água (b). Reflexos nos planos hkl 220 ($d = 0,303 \text{ nm}$) de calcita e 104 ($d = 0,299$) de dolomita.

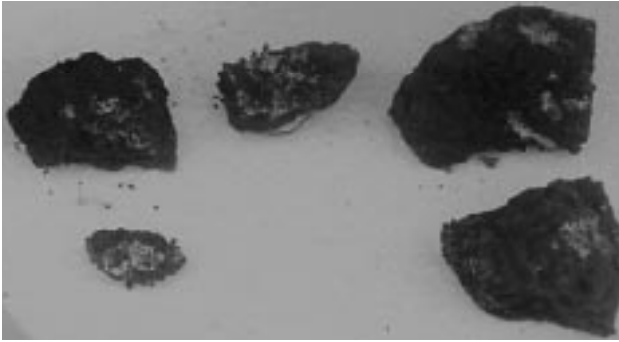


Figura 2. Partículas acumuladas de calcário na superfície de agregados do solo encontrados na última camada (16-20 cm) da coluna.

Quadro 1. Quantidade de calcário, recuperada semanalmente, 24 h após cada aplicação de 400 mL (35 mm de lâmina) de água por coluna

Período após a aplicação do calcário	Quantidade recuperada de calcário		
	Água percolada ⁽¹⁾	Filtro ⁽²⁾	Total
	g por coluna		
dia			
7	1,03	2,80	3,83
14	0,10	0,29	0,39
21	0,07	0,17	0,24
28	0,05	0,15	0,20
Total ⁽¹⁾	1,25	3,41	4,66
Fração (%) ⁽²⁾	2,93	7,93	10,86

⁽¹⁾ Soma das quantidades determinadas em cada uma das três repetições. ⁽²⁾ Em relação à quantidade total aplicada nas três colunas (42,9 g).

A semelhança dos difratogramas do calcário original (Figura 1a) e do calcário acumulado sobre os filtros (Figura 1b) indica que o calcário coletado na profundidade da parte inferior da coluna foi transportado da superfície para o interior do solo. No entanto, a distinção entre calcitas ou dolomitas de origem litogênica ou pedogênica em solos requer análises mais detalhadas de morfologia e de micromorfologia.

Por meio das imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura, pode-se observar que a clivagem romboédrica típica da calcita e da dolomita (Doner & Linn, 1989) ocorre tanto nas amostras do calcário antes da aplicação no solo (Figura 3a), como no calcário acumulado nos filtros na primeira (Figura 3b) e na segunda coleta (Figura 3c). A clivagem romboédrica, no entanto, apenas dá indícios de que se trata de calcita ou dolomita, porém não possibilita distinguir entre minerais litogênicos e pedogênicos.

A imagem do calcário coletado após a primeira chuva simulada (Figura 3b) revela a predominância de partículas com granulometria mais fina (< 15 µm) do que o calcário original (15 a 100 µm - Figura 3a), indicando que as partículas maiores ficaram retidas na rede do solo no interior da coluna. O calcário acumulado no filtro, 24 h após a segunda chuva simulada (Figura 3c), apresentou maior predomínio de partículas mais finas, aparentando uma textura diferente do calcário aplicado na superfície (Figura 3a). Essas diferenças de granulometria podem ser atribuídas à recristalização de carbonatos da solução.

Segundo Doner & Lynn, (1989), a dissolução e a reprecipitação de uma mistura de calcário calcítico e dolomítico favorecem a precipitação do calcário calcítico, de modo que, no difratograma, a relação de alturas dos picos da calcita e da dolomita deveria estar alterada. Como isto não se observou (Figura 1ab), pode-se concluir ser o calcário litogênico. Em condições de campo, no entanto, considerando as interferências dos fatores de solo

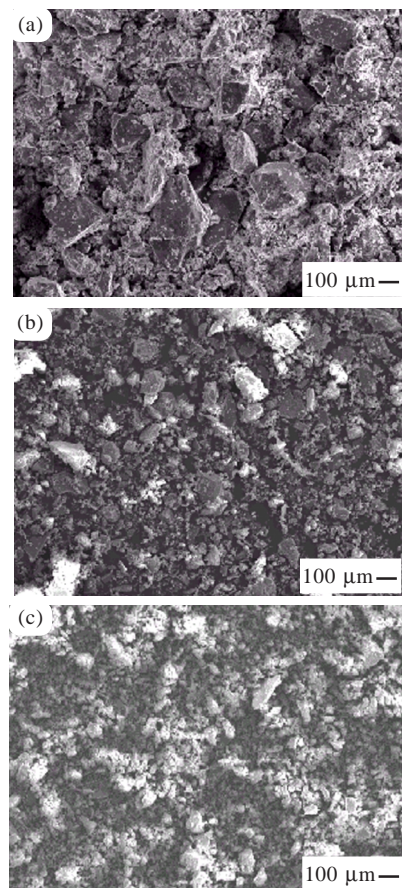


Figura 3. Imagens das partículas do calcário dolomítico obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV), antes da aplicação na superfície do solo (a), acumulado nos filtros após a primeira (b) e segunda adição de água (c).

(textura, matéria orgânica, força iônica, pH) e de ambiente (temperatura, umidade e CO_2), a reprecipitação pode ser favorecida podendo ocorrer a formação de carbonatos pedogênicos (Levy, 1981).

Vários estudos (Arnauld, 1979; Levy, 1981; Mermut & Arnauld, 1981) em solos originados de rochas calcárias mostram as diferenças de calcitas ou dolomitas originadas diretamente do material de origem (litogênicas) daquelas originadas de processos de dissolução e precipitação dos carbonatos (pedogênicas). Cristais de calcita ou dolomita do tamanho de areia (diâmetro > 0,2 mm) são herdados do material de origem. A dolomita em solos é quase que exclusivamente proveniente do intemperismo físico da rocha primária (Levy, 1981; Mermut & Arnauld, 1981). A precipitação de carbonatos de cálcio e magnésio não é simplesmente o reverso da dissolução da calcita e dolomita. Existe uma precipitação preferencial de CaCO_3 , a qual tem sido descrita por várias equações empíricas (Doner & Lynn, 1989). A razão constante entre calcita e dolomita, determinável pela razão de intensidade dos respectivos picos nos difratogramas (Figura 1), é também um indicativo de que o calcário coletado nos filtros é litogênico.

A calagem estimula a atividade microbiana no solo, através da elevação do pH, o que implica maior produção de CO_2 . Com o aumento da pressão parcial de CO_2 ($p\text{CO}_2$), há um aumento da solubilidade do calcário (Salomons & Mook, 1976). Entretanto, o carbonato pode precipitar novamente quando o produto de solubilidade é excedido, situação provocada pelo decréscimo da $p\text{CO}_2$ e aumento da concentração do soluto. Desta maneira, o decréscimo da $p\text{CO}_2$ com a profundidade do solo poderia favorecer a precipitação do calcário a partir do soluto percolado. Assim, diante das condições inerentes do sistema plantio direto, a ocorrência desse mecanismo não pode ser descartada.

Calagem superficial e composição da solução percolada

A aplicação do calcário na superfície do solo, seguida da adição semanal de água em quantidade equivalente a uma chuva de 35 mm, determinou aumento dos valores de pH, condutividade elétrica, cálcio, magnésio e bicarbonato na solução percolada, em relação à testemunha (Figura 4). Os maiores valores desses atributos foram observados após a primeira adição de água, indicando que os efeitos ocorreram rapidamente e estão relacionados com a quantidade de partículas transportadas (Quadro 1). Deve ter havido efeito tanto das partículas que desceram sem reagir e que depois se dissolveram na solução percolada, como das partículas que se dissolveram na superfície do solo com posterior descida dos produtos de sua dissolução. Isto caracteriza uma espécie de frente de alcalinização, sendo os produtos da dissolução do calcário (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-) transportados juntamente com a água infiltrada e percolada.

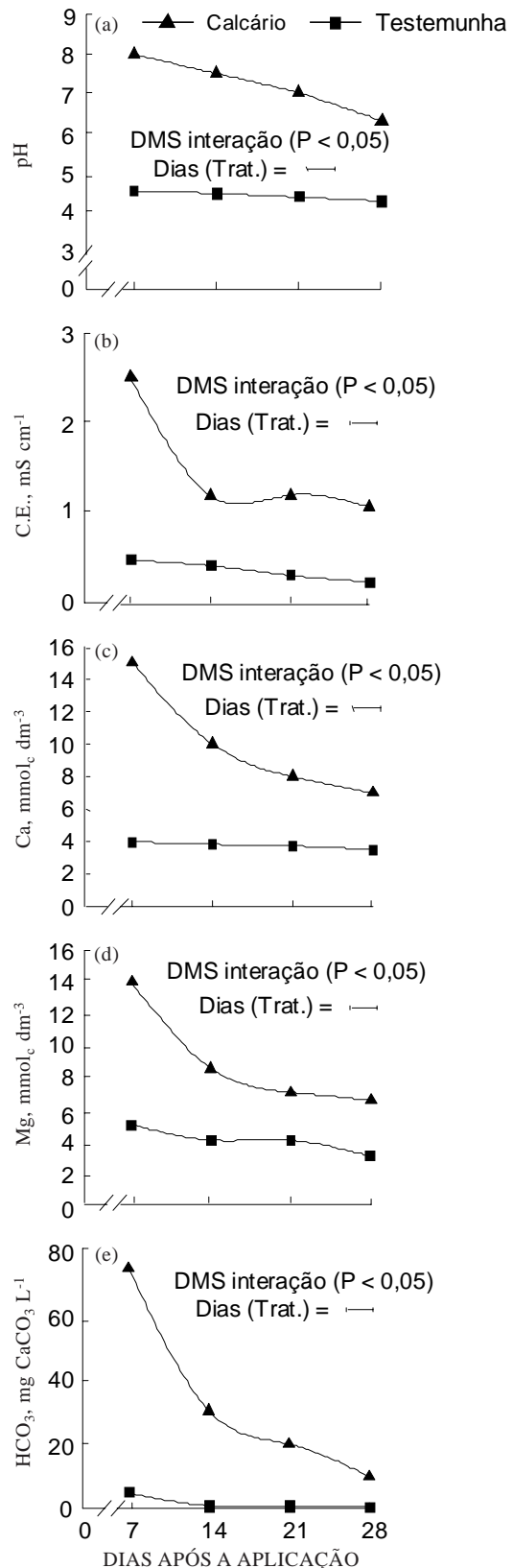


Figura 4. Valores de pH (a), condutividade elétrica (CE) (b), cálcio (c), magnésio (d) e bicarbonato (e) da solução percolada de acordo com as épocas de adição de água sobre o solo com e sem calcário superficial.

Os valores dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- na solução percolada poderiam dar suporte à hipótese de reprecipitação de carbonatos no solo (Doner & Pratt, 1969). A presença desses íons na solução percolada indica que a perturbação provocada pela calagem ultrapassou a capacidade de amortização do sistema solo e provocou um novo estado em relação à testemunha. Porém, alterações no subsistema mineralógico não se manifestam rapidamente, dada a lentidão dessas reações (Azevedo et al., 1996).

Calagem superficial e atributos químicos no perfil do solo

A aplicação do calcário na superfície do solo aumentou o pH e o cálcio e o magnésio trocáveis e

diminuiu o teor de alumínio trocável, em relação à testemunha (Figura 5a,b,c,d,e), cujo efeito já havia se manifestado na água percolada (Figura 4). A capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Al}^{3+}$) também foi maior no tratamento com calcário e comportou-se semelhantemente aos valores de cálcio (Figura 5f). A ação do calcário provocou a formação de gradientes nos atributos químicos a partir da superfície do solo, decorridos 28 dias da aplicação superficial do corretivo (Figura 5a,b,c,d,e). Os efeitos atingiram todas as camadas, especialmente até 10 cm e, na última camada (16-20 cm), onde houve acúmulo do calcário no filtro.

Como não houve acúmulo do corretivo nas demais camadas, deve ter ocorrido apenas o efeito dos

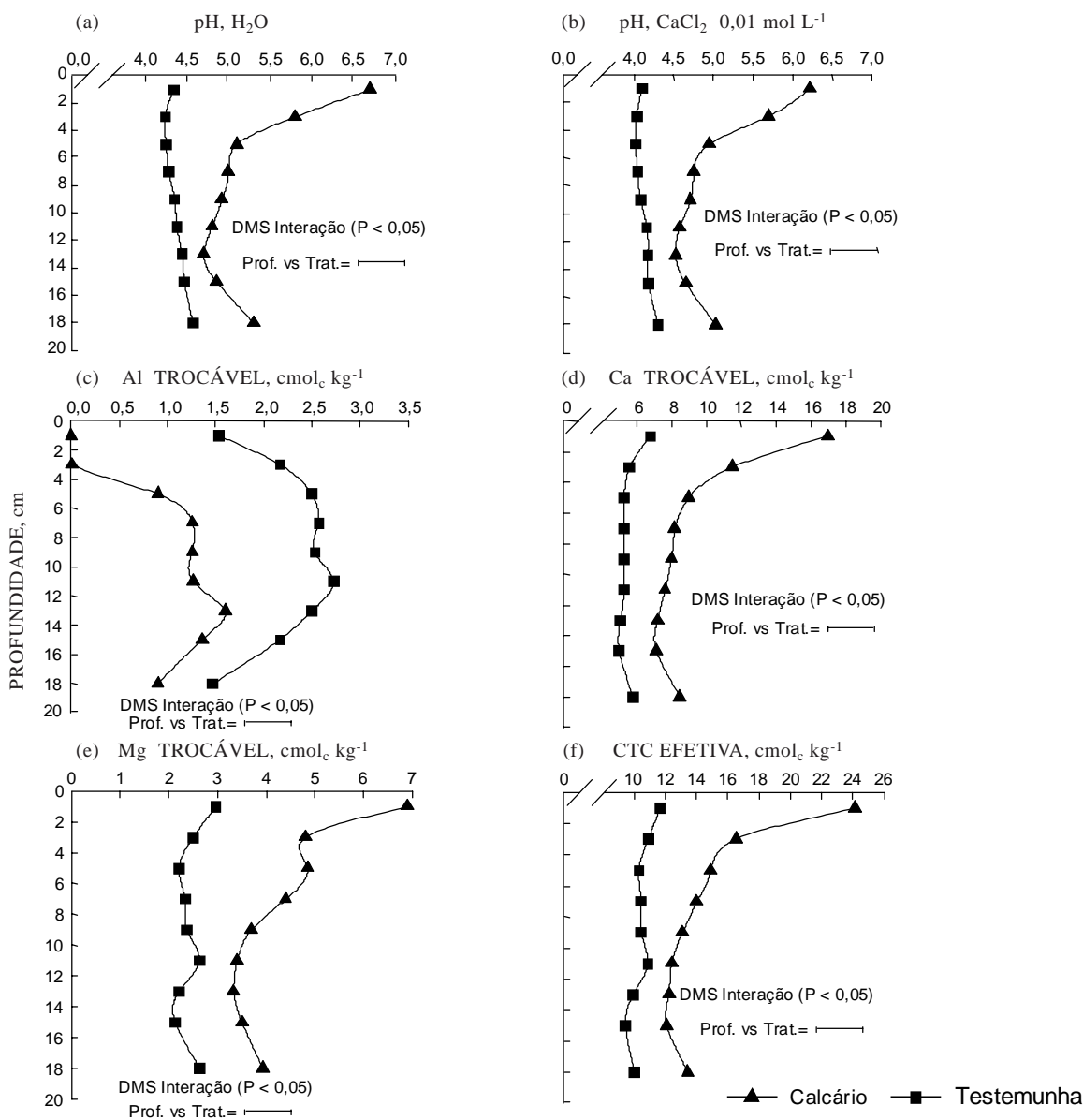


Figura 5. Valores de pH em água (a), pH CaCl_2 0,01 mol L^{-1} (b), alumínio trocável (c), cálcio trocável (d), magnésio trocável (e) e CTC efetiva ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Al}^{3+}$) (f) do solo quatro semanas após a aplicação ou não do calcário superficial.

produtos de sua dissolução (Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^-), indicando que, além do deslocamento de partículas de calcário não reagidas, houve também a formação de uma frente de alcalinização, a partir da superfície do solo, já evidenciada pelas análises da solução percolada (Figura 4). O uso do filtro simulou uma zona de impedimento, que pode ocorrer no solo em condições de campo, indicando que, caso não houvesse esse impedimento, as partículas de calcário teriam atingido profundidades maiores.

As modificações nos atributos químicos do solo decorrentes da aplicação superficial de calcário em campo (Sá, 1996; Pöttker & Ben, 1998; Rheinheimer et al., 2000; Amaral & Anghinoni, 2001) têm-se expressado em profundidades menores do que as do presente trabalho. Nesses trabalhos, com doses de calcário variando de 0,7 a 17 Mg ha^{-1} e tempo de aplicação de um a quatro anos, em solos com diferentes texturas, as camadas afetadas variaram de 2,5 cm, para pH e alumínio trocável, a 12,5 cm, para cálcio e magnésio trocáveis. Em trabalho similar, Petrere & Anghinoni (2001) verificaram, em colunas indeformadas de solo, que, decorridas 25 semanas da aplicação do equivalente a 6 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico na superfície de um Latossolo Vermelho distroférrico típico de campo nativo, os efeitos ocorreram até 7,5 cm, para pH e alumínio trocável; até 10 cm, para magnésio trocável, e até 5 cm, para cálcio trocável. Entretanto, somente dois dos trabalhos anteriormente citados (Rheinheimer et al., 2000; Petrere & Anghinoni, 2001) admitem que os efeitos de calcário no perfil do solo tenham uma participação importante do transporte de partículas do calcário.

Analisando as diferenças deste trabalho com as dos anteriormente referidos, destacam-se o menor tempo decorrido entre a aplicação do calcário e a avaliação dos seus efeitos no solo, a utilização de calcário constituído de partículas mais finas (0,105 a 0,053 mm), a aplicação na superfície do solo sem a presença de resíduos vegetais e o cultivo de aveia preta antes da aplicação do calcário. A possibilidade de a decomposição das raízes ter influenciado a ação da calagem superficial existe, porém é pequena, principalmente porque, antes da aplicação do calcário, as colunas foram lixiviadas para eliminar os possíveis ácidos orgânicos remanescentes e o excesso de sais, porventura acumulados. Assim, pode-se afirmar que a ação do calcário, que ocorreu de maneira rápida e em profundidade no perfil do solo, deveu-se majoritariamente ao deslocamento vertical de partículas do calcário que não reagiram na superfície do solo e ao transporte dos produtos de sua dissolução através da solução percolada.

CONCLUSÕES

1. Houve transporte rápido de partículas finas do calcário da superfície até à profundidade de 20 cm

pela água que percola no solo, sendo o transporte preferencial de partículas com diâmetro de 15 μm ou menores.

2. O calcário acumulado sobre os filtros colocados na base das colunas de solo foi caracterizado como litogênico, pela razão constante entre as intensidades dos picos de calcita e dolomita.

3. A identificação do calcário no interior do solo pode indicar que os efeitos na neutralização da acidez e no aumento de cálcio e magnésio na subsuperfície do solo foram, em grande parte, devidos ao movimento vertical de partículas do calcário.

4. Os efeitos na correção da acidez no perfil do solo foram rápidos e intensos, o que permite enfatizar a importância do transporte de calcário através da água da chuva no sistema plantio direto com reaplicações do corretivo na superfície do solo ao longo do tempo.

LITERATURA CITADA

- AMARAL, A.S. & ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 36:695-702, 2001.
- ARNAULD, R.J.S.T. Nature and distribution of secondary soil carbonates within landscapes in relation to soluble $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ratios. *Can. J. Soil Sci.*, 59:87-98, 1979.
- AZEVEDO, A.C.; KÄMPF, N. & BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de latossolo bruno pela calagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:191-198, 1996.
- BERTOL, I.; SCHICK, J. & MASSARIOL, J.M. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. *R. Ci. Rural*, 30:91-95, 2000.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – CFRS/SC. Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul; EMBRAPA/CNPT, 1994. 224p.
- DONER, H.E. & LYNN, W.C. Carbonate, halide, sulfate and sulfide minerals. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Wisconsin, Soil Society of America, 1989. p.279-324.
- DONER, H.E. & PRATT, P.F. Solubility of calcium carbonate precipitated in aqueous solutions of magnesium and sulfate salts. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 33:690-693, 1969.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Classificação do Solo, 1997. 247p.
- GASSEN, D.N. & KOCHHANN, R.A. Benefícios da fauna do solo de plantio direto. In: NUERNBERG, N.J., ed. *Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto*. Lages, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 1998. p.151-160.

- LEVY, R. Ions activity product of calcium carbonate precipitated from soil solutions of different degrees of supersaturation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:1070-1073, 1981.
- MERMUT, A.R. & ARNAULD, R.J.S.T. A study of microcrystalline pedogenic carbonates using submicroscopic techniques. *Can. J. Soil Sci.*, 61:261-272, 1981.
- MOLOPE, M.B.; GRIEVE, I.C. & PAGE, E.R. Contributions by fungi and bacteria to aggregate stability of cultivated soils. *J. Soil Sci.*, 38:71-77, 1987.
- PETREIRE, C. & ANGHINONI, I. Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:885-895, 2001.
- PÖTTKER, D. & BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:675-684, 1998.
- RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E.E. & GATIBONI, L.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:795-805, 2000.
- SÁ, J.C.M. Calagem em solos sob plantio direto na região dos Campos Gerais, Centro Sul do Paraná. In: SÁ, J.C.M., ed. Curso sobre manejo do solo no sistema plantio direto. Ponta Grossa, Fundação ABC, 1996. p.73-107.
- SÁ, J.C.M. & PETREIRE, C. Desenvolvimento radicular da cultura do milho em solos sob plantio direto da região dos Campos Gerais e do Planalto Gaúcho. In: CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1995, Castro. Anais. Castro, Fundação ABC, 1995. p.172-204.
- SALOMONS, W. & MOOK, W.G. Isotope geochemistry of carbonate dissolution and reprecipitation in soils. *Soil Sci.*, 122:15-24, 1976.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O. & BALBINOT Jr., A.A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo. I - Perdas de solo e água. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:427-436, 2000.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. & BOHNEN, H. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)
- TROLLARD, F.; BOURRIE, G. & JEANROY, E. Trace metals in natural iron oxides from laterites: A study using selective kinetic extraction. *Geoch. & Cosmoch. Acta*, 59:1285-1297, 1995.
- WUEST, S.B. Soil biopore estimation: effects of tillage, nitrogen, and photographic resolution. *Soil & Till. Res.*, 62:111-116, 2001.

