

SEÇÃO IV - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

RESÍDUOS DE PLANTAS DE COBERTURA E MOBILIDADE DOS PRODUTOS DA DISSOLUÇÃO DO CALCÁRIO APLICADO NA SUPERFÍCIE DO SOLO⁽¹⁾

A. S. AMARAL⁽²⁾, I. ANGHINONI⁽³⁾ & F. C. DESCHAMPS⁽⁴⁾

RESUMO

As plantas de cobertura têm recebido atenção adicional em função da liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular capazes de formar complexos orgânicos com alumínio, cálcio e magnésio. Dessa forma, além de neutralizarem o alumínio tóxico, esses ácidos podem aumentar a mobilidade, no perfil do solo, dos produtos originados da dissolução do calcário aplicado na superfície. Os objetivos deste trabalho foram (a) identificar os ácidos orgânicos de baixo peso molecular presentes nos resíduos de plantas de cobertura e na solução do solo; (b) avaliar o efeito desses resíduos, juntamente com a aplicação superficial de calcário, na correção da acidez das camadas subsuperficiais do solo no sistema plantio direto, e (c) verificar a relação dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular, liberados na decomposição de resíduos vegetais, com os efeitos, na profundidade do solo, da aplicação superficial de calcário. O experimento foi realizado em casa de vegetação em colunas de PVC com amostras indeformadas de um Cambissolo Húmico Alumínico Léptico argiloso há cinco anos no sistema plantio direto. Os tratamentos constaram da aplicação de resíduos (10 Mg ha⁻¹) de aveia preta (1), ervilhaca (2) e nabo forrageiro (3), calcário (13 Mg ha⁻¹) (4), calcário mais resíduo de aveia preta (5), de ervilhaca (6) e de nabo forrageiro (7) calcário mais ácido cítrico (0,91 Mg ha⁻¹) (8) e uma testemunha (9), dispostos em blocos ao acaso. O uso da cromatografia líquida permitiu identificar os ácidos orgânicos de baixo peso molecular nos resíduos vegetais utilizados. Na aveia preta, houve predomínio do ácido transaconítico, na ervilhaca predominou o ácido málico e no nabo forrageiro os ácidos cítrico e málico. Não foi possível detectar nenhum tipo de ácido orgânico de baixo peso molecular tanto na solução percolada como na solução do solo. Os resíduos vegetais não tiveram efeito na correção da acidez do solo em profundidade. Seus efeitos restringiram-se na camada de 0-2,5 cm, tanto isoladamente como junto com o calcário.

Termos de indexação: aveia preta, ervilhaca, nabo forrageiro, ácidos orgânicos, atributos químicos, plantio direto.

⁽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. Executada com recursos da FAPERGS e CNPq/PRONEX. Recebido para publicação em janeiro de 2003 e aprovado em agosto de 2003.

⁽²⁾ Professor de Solos do Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI. 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. Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: ibanghi@ufrgs.br

⁽⁴⁾ Pesquisador da EPAGRI. CEP 88302-020 Itajaí (SC). E-mail: xicodsc@hotmail.com

SUMMARY: COVER PLANT RESIDUES AND MOBILITY OF DISSOLUTION PRODUCTS OF SURFACE APPLIED LIME

Cover plants have received extra attention due to their release of low molecular weight organic acids that form organic complexes with aluminum, calcium and magnesium. Besides neutralizing toxic aluminum, such compounds can increase the mobility in the soil profile of the dissolution products of lime applied on the soil surface. Objectives of this research were (a) to identify the low molecular weight organic acids found in different cover plant species and in soil solution, (b) to evaluate the effects of the residues, alone or together with surface lime application, in relation to acidity neutralization of subsoil layers in no-tillage systems, and (c) to verify the relation between organic acids of low molecular weight, released during the decomposition of plant residues, with the effect on soil acidity properties in the soil profile due to surface lime application. The experiment was carried out in a greenhouse in undisturbed Inceptisol (Haplumbrept) soil samples in columns, collected in a field experiment under no-tillage for five years. Nine treatments were applied: residue (10 Mg ha⁻¹) of black oat (1), common vetch (2), oil seed radish (3), lime (13 Mg ha⁻¹) (4), lime plus residue of black oat (5), of common vetch (6), of oil seed radish (7), and lime plus citric acid (0.91 Mg ha⁻¹) (8) and no treatment (9), arranged in randomized blocks. The liquid chromatography method (HPLC) allowed an identification of the main low molecular weight organic acids in the plant residues. Trans-aconitic acid was the most important in black oat, malic acid in common vetch, and citric and malic acids in oil seed radish. It was not possible to detect organic acids in the percolate or soil solution. Plant residues had no effect on acidity neutralization in the deeper soil since the effects, alone or with lime application on the soil surface, were restricted to the soil surface layer (0-2.5 cm).

Index terms: black oat, common vetch, oil seed radish, organic acids, chemical attributes, no-tillage.

INTRODUÇÃO

O sucesso do sistema plantio direto está diretamente relacionado com o uso de rotação de culturas com a inclusão de plantas de cobertura, para conciliar o rendimento econômico com a preservação da capacidade produtiva do solo. A rotação de culturas com espécies de raízes agressivas pode permitir a continuidade desse sistema sem interrupções, mesmo quando a compactação superficial de solo ocorre.

Recentemente, as plantas de cobertura têm recebido atenção adicional no sistema plantio direto, contribuindo para reduzir os efeitos negativos da acidez na subsuperfície do solo. Durante a decomposição dos resíduos vegetais, ocorre liberação de compostos orgânicos hidrossolúveis que, em última análise, são ácidos orgânicos de baixo peso molecular (Franchini et al., 2001). Esses compostos possuem radicais funcionais que os tornam capazes de formar complexos orgânicos com alumínio, cálcio e magnésio (Pearson, 1966). Dessa forma, além de neutralizarem o alumínio tóxico, esses compostos podem aumentar a mobilidade, no perfil do solo, dos produtos originados da dissolução do calcário aplicado na superfície.

A manutenção dos resíduos das plantas de cobertura na superfície do solo no sistema plantio direto dificulta a ação microbiana, em virtude do

menor contato com o solo, resultando numa decomposição mais lenta. Com isso, mais o constante aporte de resíduos, é possível ocorrer produção contínua de compostos orgânicos hidrossolúveis de baixo peso molecular (ligantes), podendo resultar em sua perenização no solo.

A identificação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular na solução de solo tem sido efetuada em solos de clima temperado (Hue et al., 1986; Pohlman & McColl, 1988; Bissani, 2000). Nas condições de clima e solo do Sul do Brasil, a identificação desses compostos na solução do solo não tem sido bem-sucedida (Miyazawa et al., 1992). Foi identificada, até o momento, a presença de ácidos orgânicos apenas no extrato de tecido vegetal (Franchini et al., 1999c; Franchini et al., 2001) e não no solo. Além disto, os efeitos no solo dos ácidos orgânicos provenientes da decomposição inicial de resíduos vegetais têm sido verificados somente quando foram utilizadas doses muito elevadas (40 a 80 Mg ha⁻¹ de resíduo seco).

A manutenção dos resíduos da parte aérea das espécies utilizadas como cobertura na superfície do solo no sistema plantio direto, além de proporcionar aumentos da concentração de diferentes ácidos orgânicos na camada superficial, pode beneficiar a ação da calagem superficial nesse sistema, pela liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular durante a decomposição dos diferentes resíduos vegetais.

O presente estudo foi desenvolvido com os objetivos: (a) identificar os ácidos orgânicos de baixo peso molecular presentes nos resíduos de plantas de cobertura e na solução do solo; (b) avaliar o efeito desses resíduos, isoladamente ou junto com a aplicação superficial de calcário, na correção da acidez das camadas subsuperficiais do solo no sistema plantio direto, e (c) verificar a relação dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular liberados na decomposição de resíduos vegetais com os efeitos, na profundidade do solo, da aplicação superficial de calcário.

MATERIAL E MÉTODOS

Características do solo, coleta das colunas e cultivo das espécies

Foi utilizado um Cambissolo Húmico Alumínico Léptico argiloso (EMBRAPA, 1999). As amostras foram coletadas em um experimento realizado no sistema plantio direto iniciado em 1995, sem reaplicação de calcário. Na amostragem do solo (25/10/2000), a área estava sendo cultivada com ervilhaca comum. Foram coletadas, na ocasião, 27 amostras indeformadas de solo em colunas de PVC de 12,0 cm de diâmetro por 22 cm de altura. A profundidade de coleta foi de 0-20 cm. Os atributos químicos do solo nessa camada foram: pH (H₂O) 4,7; índice SMP 5,0; P (Mehlich-1) 6,0 mg kg⁻¹; K (Mehlich-1) 74 mg kg⁻¹; MO (combustão úmida) 42 g kg⁻¹; H + Al 8,8 cmol_c kg⁻¹, Al (KCl 1 mol L⁻¹) 2,5 cmol_c kg⁻¹, Ca (KCl 1 mol L⁻¹) 5,5 cmol_c kg⁻¹ e Mg (KCl 1 mol L⁻¹) 4,0 cmol_c kg⁻¹, segundo método descrito por Tedesco et al. (1995). O solo apresenta textura argilo-siltosa (430, 470 e 100 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente).

Após a coleta, as colunas foram transferidas para câmara de crescimento, com condições de temperatura e luz controladas, semeando-se, em cada série de nove colunas, aveia preta (*Avena strigosa*), ervilhaca comum (*Vicia sativa*) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus*). Para esse cultivo, não foi feita adubação, tendo a coleta da parte aérea ocorrida no início do período de florescimento, aos 65 dias da semeadura.

Condução do experimento em casa de vegetação

Após o cultivo, as colunas ficaram em repouso por aproximadamente 120 dias. Durante esse período, o solo foi umedecido periodicamente. As colunas foram, então, preparadas, recebendo, inicialmente, parafina derretida nas bordas internas acima do solo, com o objetivo de impedir o fluxo preferencial de água junto às paredes das colunas. Na extremidade inferior das colunas, foi presa uma tela de nylon de 0,03 mm de malha, com o objetivo de sustentar o solo nas colunas de PVC, além de um funil de

plástico. O conjunto (coluna, tela e funil) foi colocado sobre um becker de vidro (500 mL) para a coleta do percolado. Retiraram-se todos os resíduos orgânicos (matéria orgânica leve) da superfície do solo das colunas e foram aplicados 400 mL de água destilada em cada coluna, antes da aplicação dos tratamentos, com o objetivo de eliminar possíveis interferências de ácidos orgânicos remanescentes.

Os seguintes tratamentos foram aplicados na superfície do solo condicionado nas colunas de PVC (01/06/01): (1) Resíduo de aveia preta; (2) Resíduo de ervilhaca; (3) Resíduo de nabo forrageiro; (4) Resíduo de aveia preta + calcário; (5) Resíduo de ervilhaca + calcário; (6) Resíduo de nabo forrageiro + calcário; (7) Ácido cítrico + calcário; (8) Calcário e (9) Testemunha.

Nos tratamentos que receberam o corretivo, aplicou-se, na superfície das colunas, uma quantidade de calcário dolomítico (14,3 g) equivalente à dose de 13,0 Mg ha⁻¹. Utilizou-se um calcário comercial com PRNT 76,0 %; PN 82,6 %; CaO 24,0 % e MgO 16,0 %. Foram utilizadas somente as partículas de calcário que passaram pela peneira de 0,50 mm e que ficaram retidas na de 0,25 mm, as quais corresponderam a 13,8 % do calcário comercial utilizado, de forma a eliminar a descida de partículas finas do calcário (Amaral, 2002).

Os resíduos vegetais coletados na primeira etapa do experimento foram moídos (2 mm) e aplicados na superfície do solo das mesmas colunas onde as espécies haviam se desenvolvido. A dose utilizada foi equivalente a 10 Mg ha⁻¹ de matéria seca. Nos tratamentos com adição de resíduos + calcário, aplicaram-se, primeiramente, os resíduos e sobre estes, o calcário. Esta segunda etapa teve a duração de 60 dias e, a cada 15 dias, promovia-se uma aplicação de água (250 mL) equivalente a uma chuva de 22 mm. No tratamento com ácido cítrico (C₆H₇O₇), utilizou-se citrato de potássio (C₆H₅K₃O₇H₂O) na concentração de 5 mmol L⁻¹, também aplicado a cada 15 dias, em substituição à água destilada. Dessa forma, a quantidade total de ácido cítrico aplicada correspondeu a 0,91 Mg ha⁻¹, o equivalente a 23 Mg ha⁻¹ de matéria seca de nabo forrageiro ou 15 Mg ha⁻¹ de matéria seca de resíduos de soja, que contêm 4 e 6 % de ácido cítrico, respectivamente (Franchini et al., 2001).

Análises e determinações

Tecido vegetal: As amostras da parte aérea das espécies vegetais foram analisadas para caracterização química. As análises de C, N, P, K, Ca e Mg foram realizadas segundo Tedesco et al. (1995). Os teores de celulose, hemicelulose e lignina bruta foram determinados pelos métodos FDN (fibra detergente neutra) e FDA (fibra detergente ácida), descritos por van Soest & Wine (1967), enquanto a digestibilidade "in vitro" foi determinada segundo o método descrito por Jones & Hayward (1975).

Com o objetivo de identificar e quantificar os ácidos orgânicos de baixo peso molecular, os materiais vegetais foram secos em estufa (60 °C), até peso constante, e moídos (1 mm). Utilizou-se 1 g de material vegetal para 15 mL de H₂SO₄ 0,005 mol L⁻¹ (1:15). A mistura foi colocada em um becker de vidro (100 mL) e agitada com bastão de vidro por 20 min; após 30 min, a mistura foi transferida para tubos de centrífuga, agitada em agitador horizontal por 20 min e, após, centrifugada por 30 min (4.000 RPM). A solução obtida foi acidificada para pH 2,5 e congelada até o momento da análise.

As análises foram efetuadas no Laboratório de Análises de Água da Empresa de Pesquisa Agrícola de Santa Catarina (EPAGRI-SC), Itajaí (SC). Utilizou-se a técnica de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). Foi utilizado um cromatógrafo Shimadzu, modelo LC10-VP, dotado de bomba para gradiente quaternário, injetor automático com suporte de amostras termostatizado (10 °C), forno de coluna (40 °C) e detector de absorção no UV-210 nm. O sistema foi gerenciado por uma estação de trabalho com “software” específico. Foi utilizada uma coluna trocadora de íons da marca Aminex-HPX-87H (BioRad). A fase móvel utilizada foi H₂SO₄ 0,005 mol L⁻¹, isocrática, com fluxo de 0,6 mL min⁻¹. O volume de injeção das amostras foi de 10 µL. Preparou-se uma solução padrão composta de ácido oxálico (50 µg mL⁻¹), ácido cítrico (500 µg mL⁻¹), ácido tartárico (300 µg mL⁻¹), ácido transaconítico (15 µg mL⁻¹), ácido málico (500 µg mL⁻¹) e ácido fumárico (5 µg mL⁻¹).

Solução percolada: A solução percolada foi coletada para identificar e quantificar os ácidos orgânicos de baixo peso molecular aos 15, 30, 45 e 60 dias da aplicação dos tratamentos. Após cada coleta, filtrou-se uma alíquota de 5 mL, utilizando-se membrana de acetato de celulose com 0,45 µm; as alíquotas foram então acidificadas e armazenadas congeladas. As análises (HPLC) foram efetuadas, conforme descrito no item anterior.

Solução do solo: No final do período experimental, as colunas foram desmontadas e separadas por secções transversais, em sete camadas com espessuras de: 0-2,5; 2,5-5,0; 5,0-7,5; 7,5-10,0; 10,0-12,5; 12,5-15,0 e 15,0-20,0 cm. A solução do solo foi extraída para identificar e quantificar os ácidos orgânicos de baixo peso molecular pelo seguinte procedimento: amostras do solo de cada camada foram secas ao ar, moídas e peneiradas (2 mm); após, foram umedecidas com uma quantidade de água destilada equivalente à capacidade de campo. Decorridas seis horas para o equilíbrio, extraiu-se a solução do solo pelo método da centrífuga, adaptado de Elkhatib et al. (1987); 2 mL da solução do solo foram filtrados utilizando-se membrana de acetato de celulose com 0,45 µm. Após, adicionou-se H₂SO₄ para diminuir o pH até 2,5 e, então, as amostras

foram armazenadas congeladas. O tempo decorrido da extração da solução até à análise pela HPLC foi, em média, de 96 h. As análises foram também efetuadas, conforme descrito anteriormente.

Fase sólida do solo: Após a desmontagem das colunas e a separação das sete camadas de solo, descritas no item anterior, as amostras foram secas (60 °C), moídas (2 mm) e submetidas às seguintes determinações: pH H₂O e pH CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, Ca, Mg e Al trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹), K (Mehlich-1) e carbono orgânico total (dicromato de potássio + H₂SO₄). Todas as análises foram feitas segundo método descrito por Tedesco et al. (1995), exceto pH CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, que foi determinado segundo EMBRAPA (1997).

Análise estatística: Foi utilizado o delineamento experimental em blocos ao acaso com três repetições. Procedeu-se à análise da variância, com a aplicação do teste de médias Tukey (P < 0,05) para diferenciação dos atributos químicos avaliados. O modelo estatístico utilizado para a análise da variância do experimento, com restrição ao fator profundidade, foi:

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

em que m = média; B = blocos (i = 1,2,3); T = tratamentos (j = 1,2,...,9); C = camadas de solo (k = 1,2,..., 7).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição dos resíduos vegetais

Os resíduos vegetais apresentaram diferenças entre as espécies em relação ao conteúdo de nutrientes, hemicelulose, celulose, lignina e proteína (Quadro 1). Esses valores, associados à digestibilidade “in vitro”, determinam seguinte ordem de decomposição: aveia preta < ervilhaca < nabo forrageiro. Os valores da relação C:N da ervilhaca e nabo forrageiro foram muito semelhantes; entretanto, a digestibilidade foi bem superior para o nabo, demonstrando que nem sempre resíduos com a mesma relação C:N terão a mesma taxa de decomposição, pois isso depende também dos conteúdos de lignina, celulose e hemicelulose. Quanto maior a digestibilidade determinada “in vitro”, mais rápida deverá ser a decomposição e mais rápida também a produção de ácidos orgânicos de cadeia curta em condições de campo. Isso foi demonstrado por Souza (2001), quando utilizou resíduos de aveia, azevém e ervilhaca para determinar a quantidade de ácidos orgânicos (acético, propiônico, butírico e isobutírico) produzida na decomposição desses resíduos na solução de solo alagado sob cultivo de arroz.

Os resíduos utilizados também diferem quanto ao conteúdo de ácidos orgânicos, especialmente para os ácidos transaconítico, cítrico e málico (Quadro 2). No resíduo de aveia preta, há um predomínio de ácido aconítico, na ervilhaca comum, predomina o ácido málico, e, no nabo forrageiro, predominam os ácidos cítrico e málico. A concentração total de ácidos foi bem superior no nabo em relação aos demais resíduos. Esses resultados são semelhantes aos determinados por Franchini et al. (2001) para aveia preta e nabo forrageiro.

Considerando a dose de matéria seca aplicada (10 Mg ha^{-1}), pode-se, com os dados do quadro 2, estimar a quantidade de ácidos orgânicos adicionada nos tratamentos. Assim, tem-se o equivalente a 9,0, 4,3 e $0,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de ácido oxálico; 36,1, 55,1 e $352,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de ácido cítrico; 0,0, 0,0 e $6,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de ácido tartárico; 0,0, 85,3 e $349,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de ácido málico; 97,4, 2,51 e $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de ácido transaconítico e 2,0, 2,3 e $2,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de ácido fumárico, totalizando 144,5, 149,5 e $711,8 \text{ kg ha}^{-1}$ desses ácidos para aveia preta, ervilhaca comum e nabo forrageiro, respectivamente. Comparando as quantidades adicionadas de ácido cítrico pelos resíduos com a quantidade aplicada por meio do citrato de potássio

(914 kg ha^{-1}), verifica-se que correspondem a aproximadamente 4, 6 e 39 % de ácido cítrico para a aveia preta, ervilhaca e nabo, respectivamente.

Detecção dos ácidos orgânicos no solo

Apesar das quantidades relativamente altas dos ácidos orgânicos, especialmente cítrico, málico e transaconítico, adicionadas ao solo pelos resíduos vegetais, nenhum desses ácidos orgânicos foi detectado (HPLC), tanto na solução percolada quanto na solução do solo. Embora o método utilizado tenha sido eficiente para detectar, na solução do solo, esses ácidos orgânicos sintéticos recém-adicionados ao solo, o grau de recuperação mostrou-se muito afetado pela composição do solo e procedimento analítico (Anghinoni et al., 2002). A eficiência decresce rapidamente com o aumento no teor de argila e matéria orgânica e com a secagem do solo.

O solo utilizado apresenta valores elevados de matéria orgânica, alumínio trocável e teores relativamente altos de argila, o que, além de determinar seu alto poder-tampão, pode ter influenciado a dinâmica dos ácidos orgânicos no solo. A liberação desses ácidos ocorre na superfície do solo e, como a água foi aplicada em quantidade suficiente para percolar, é possível que, durante esse processo, os ligantes tenham sido adsorvidos pelo solo ou rapidamente transformados pela atividade microbiana (Wolt, 1994; Jones et al., 1996; Jones, 1998), o que resultou no seu desaparecimento ou, então, em concentrações muito pequenas na solução percolada, nas quatro coletas e na solução do solo 60 dias após a aplicação dos tratamentos.

Na primeira etapa do experimento, as espécies foram cultivadas nas mesmas colunas onde se realizou a segunda etapa, com o retorno da parte aérea em suas respectivas colunas. Portanto, poder-se-ia também esperar a presença dos ácidos orgânicos na solução do solo, graças à sua liberação pelos exsudatos radiculares na rizosfera ou à própria decomposição do sistema radicular (Jones, 1998). No presente trabalho, apenas levanta-se tal possibilidade, visto que não foram feitas análises exclusivas da rizosfera.

Quadro 1. Composição química dos resíduos vegetais utilizados

Atributo	Resíduo		
	Aveia	Ervilhaca	Nabo
Carbono (g kg^{-1})	440,0	400,0	380,0
Nitrogênio (g kg^{-1})	19,0	47,0	41,0
Relação C:N	23:1	8:1	9:1
Fósforo (g kg^{-1})	2,8	4,3	7,0
Potássio (g kg^{-1})	22,0	37,0	43,0
Cálcio (g kg^{-1})	4,8	12,0	20,0
Magnésio (g kg^{-1})	1,7	3,2	4,7
Proteína bruta (g kg^{-1})	118,4	292,8	255,4
Hemicelulose (g kg^{-1})	139,9	51,9	25,4
Celulose (g kg^{-1})	335,5	242,2	182,3
Lignina bruta (g kg^{-1})	40,0	57,0	20,0
Digestibilidade (%) ⁽¹⁾	74,3	80,6	94,3

⁽¹⁾ "in vitro".

Quadro 2. Conteúdo de ácidos orgânicos alifáticos de baixo peso molecular na parte aérea de três espécies vegetais, obtidos pelo uso da cromatografia líquida (HPLC)

Espécie	Oxálico	Cítrico	Tartárico	Málico	Aconítico ⁽¹⁾	Fumárico	Total
mg g ⁻¹ de matéria seca							
Aveia	0,90	3,61	0,00	0,00	9,74	0,20	14,45
Ervilhaca	0,43	5,51	0,00	8,53	0,25	0,23	14,95
Nabo	0,00	35,20	0,64	34,94	0,15	0,25	71,18

⁽¹⁾ Transaconítico.

Atributos químicos do solo

Na ausência do calcário, os valores de pH, tanto em H₂O quanto em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (Figura 1a,c), bem como os teores de cálcio e magnésio trocáveis (Figuras 2a,c), foram mais elevados com a aplicação superficial dos resíduos, independentemente do tipo, somente na camada de 0-2,5 cm. A diminuição dos teores de Al trocável também ocorreu, predominantemente nessa camada (0-2,5 cm), independentemente do tipo de resíduo. Em geral, o pH em H₂O foi ligeiramente maior do que em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, indicando o predomínio de cargas negativas e a concentração salina inferior à do CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ nas camadas analisadas do solo.

Entre os resíduos, o nabo forrageiro foi o mais eficiente em aumentar o pH (Figura 1a,c) e os teores de Ca trocável (Figura 2c) e de Mg trocável (Figura 3c) na camada de 0-2,5 cm em relação aos resíduos de aveia e ervilhaca. Os teores de K disponível (Figura 3c) e carbono orgânico total (Figura 4a) aumentaram até 5,0 cm de profundidade, sem haver diferenciação entre os resíduos.

Uma provável causa da elevação do pH do solo pelos resíduos vegetais é a capacidade de neutralização

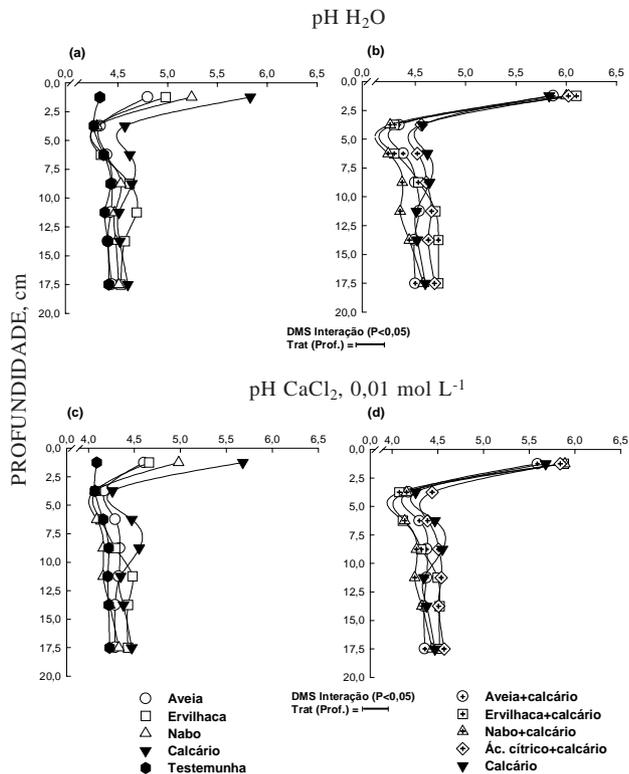


Figura 1. Valores dos atributos químicos no perfil do solo após 60 dias da aplicação superficial dos resíduos, isolados e junto com calcário, em colunas indeformadas, coletadas em área de plantio direto: pH em água (a) e (b) e pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (c) e (d).

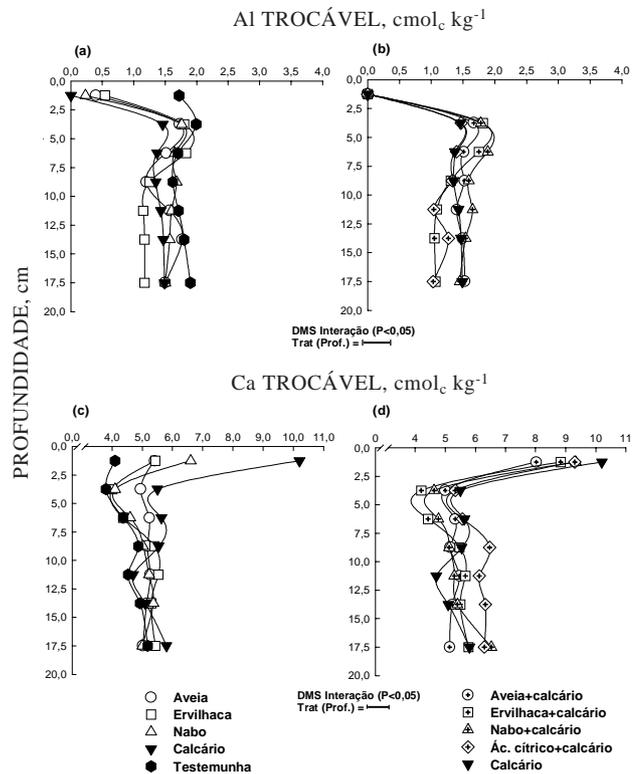


Figura 2 Valores dos atributos químicos no perfil do solo após 60 dias da aplicação superficial dos resíduos, isolados e junto com calcário, em colunas indeformadas, coletadas em área de plantio direto: alumínio trocável (a) e (b) e cálcio trocável (c) e (d).

de hidrogênio (CNH). A CNH é diferenciada entre os resíduos e envolve a reação de adsorção na superfície do material vegetal e a protonação de ácidos orgânicos com valores de pK entre o pH do solo e o pH 6,0 (Ritchie & Dolling, 1985). A ervilhaca apresenta os maiores valores de CNH, seguida pelo nabo forrageiro e aveia (Miyazawa et al., 1993). Outra causa da elevação do pH pelos resíduos vegetais é a reação de troca entre H e Al do solo pelos cátions Ca, Mg e K presentes nos resíduos (Hoyt & Turner, 1975).

No presente estudo, essa deve ter sido a principal causa para a maior elevação do pH no tratamento com resíduo de nabo forrageiro (Figura 1a,c), pois, além do pH, ele proporcionou maior teor de Ca (Figura 2c) e menor teor de Al (Figura 2a) na camada de 0-2,5 cm. O aumento do pH de solos ácidos com a adição de resíduos vegetais é um resultado relativamente comum (Hoyt & Turner, 1975; Hue & Amien, 1989; Miyazawa et al., 1993; Franchini et al., 1999a,b; Amaral et al., 2000).

Os aumentos de Ca e Mg trocáveis e de potássio disponível (Mehlich-1) foram relacionados com o teor desses cátions nos materiais aplicados, nos quais o nabo forrageiro apresentava o maior conteúdo, tanto

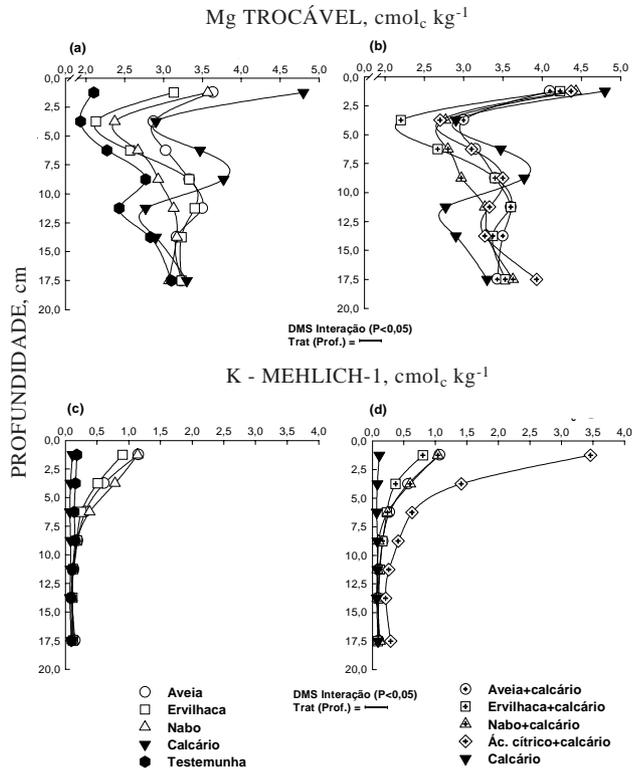


Figura 3. Valores dos atributos químicos no perfil do solo após 60 dias da aplicação superficial dos resíduos, isolados e junto com calcário, em colunas indeformadas, coletadas em área de plantio direto: magnésio trocável (a) e (b) e potássio disponível (Mehlich-1) (c) e (d).

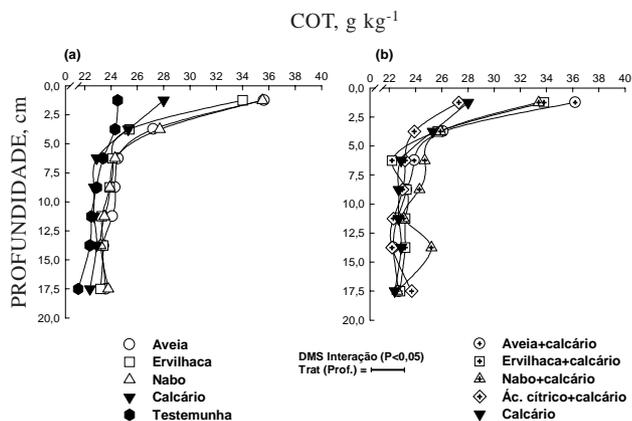


Figura 4. Valores de carbono orgânico total (COT) no perfil do solo, após 60 dias da aplicação superficial dos resíduos, isolados (a) e junto com calcário (b), em colunas indeformadas, coletadas em área de plantio direto.

de cálcio como de magnésio e potássio (Quadro 1). Mesmo com o teor total de potássio sendo maior nos resíduos, o cálcio e o magnésio foram os cátions predominantes na fase trocável do solo. Resultados

semelhantes foram obtidos por Amaral et al. (2000), que observaram efeitos do material vegetal adicionado ao solo, sem incorporação, somente até 3 cm de profundidade.

Comparando os valores dos atributos químicos obtidos pela aplicação dos resíduos com os valores encontrados pela aplicação isolada do calcário, observaram-se diferenças expressivas em favor do calcário somente na camada inicial (0-2,5 cm) para os valores de pH (Figura 1a,c) e os teores de cálcio (Figura 2) e magnésio (Figura 3a) trocáveis.

Quando o calcário foi aplicado junto com os resíduos, houve um pequeno acréscimo no pH, tanto em H_2O quanto em $CaCl_2$ 0,01 mol L^{-1} , somente na primeira camada, para todos os resíduos, não ocorrendo diferenças entre eles (Figura 1b,d). Nos tratamentos ervilhaca + calcário e ácido cítrico + calcário, embora a tendência de aumento de pH, principalmente nas três últimas camadas, o mesmo não foi significativo.

A aplicação de calcário junto com os resíduos aumentou os teores de cálcio e magnésio trocáveis na primeira camada em relação à testemunha, independentemente do tipo de resíduo, não diferindo, porém, do calcário isolado e do calcário + ácido cítrico (Figuras 2c,d e 3a,b). O acréscimo de cálcio e magnésio na camada de 0-2,5 cm, graças ao calcário nos tratamentos com resíduos, foi maior para a ervilhaca, seguindo-se o nabo forrageiro e a aveia. Os teores de potássio (Mehlich-1) mantiveram-se mais altos até à segunda camada (2,5-5,0 cm) em relação à aplicação isolada de calcário (Figura 3c,d).

No tratamento com ácido cítrico na forma de citrato de potássio, os valores de potássio foram superiores em todas as camadas em relação aos demais tratamentos (Figura 3d). No tratamento com calcário isolado, como não houve nenhuma fonte adicionada de potássio, os valores deste cátion foram muito semelhantes aos da testemunha.

Entre os resíduos, o nabo forrageiro proporcionou maior valor de cálcio na camada de 15,0 a 20 cm (Figura 2d), provavelmente pelo maior conteúdo de ácidos, cítrico e málico, indicando que pode ter ocorrido algum transporte desse cátion por um desses ligantes, embora esse efeito não tenha sido significativo ($P < 0,05$).

Os valores de cálcio, determinados no tratamento ácido cítrico + calcário, também permitem supor um efeito do ácido cítrico no transporte de cálcio em profundidade. Os efeitos não foram mais pronunciados, provavelmente por causa da preferência do ácido cítrico em formar complexo com o alumínio. É possível que, com nabo forrageiro, tenha ocorrido mais o efeito do ácido málico no transporte de cálcio do que o ácido cítrico, porque, se fosse o ácido cítrico, efeitos mais significativos no alumínio deveriam ter ocorrido, fato que só

aconteceu na primeira camada (Figura 2b). A constante de estabilidade do ácido málico + alumínio (4,6) é menor do que a do ácido cítrico + alumínio (8,0), o que pode favorecer a complexação do ácido málico com o cálcio. O transporte de cálcio-ligante para camada subsuperficial do solo ocorre quando a constante de estabilidade do complexo é maior que a constante de estabilidade do cálcio-solo e a constante alumínio-ligante menor que a do alumínio-solo. Neste caso, o complexo cálcio-ligante é suficientemente estável, para impedir a adsorção de cálcio no solo, mas também não é suficientemente forte, para trocar com o alumínio do solo (Miyazawa et al., 2000).

Os efeitos verificados no presente estudo não ocorreram com a mesma magnitude dos observados por Miyazawa et al. (1993), Franchini et al. (1999a,b), Ziglio et al. (1999) e Franchini et al. (2001), em que a aplicação de resíduos vegetais determinou a neutralização da acidez e transporte de cálcio e magnésio até 25 cm de profundidade. A provável diferença entre os trabalhos decorre do fato de que esses autores utilizaram amostras de solos com estrutura deformada (secos e moídos), doses de resíduos elevadas (até 80 Mg ha⁻¹) e incorporadas ao solo, ou, ainda, a utilização direta de extratos vegetais em solos com teor de matéria orgânica muito baixo (7,1 g kg⁻¹) e teor de argila baixo (210 g kg⁻¹) e, em alguns casos, foram utilizadas amostras do horizonte B. Assim, existem poucas informações na literatura brasileira sobre a magnitude dos efeitos dos resíduos vegetais, quando mantidos na superfície do solo sob sistema plantio direto, aplicados em quantidades usualmente produzidas nas lavouras (aproximadamente 6 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca).

Apesar do pouco efeito dos resíduos utilizados na ação do calcário na profundidade do solo, eles proporcionaram aumentos significativos de carbono orgânico total (Figura 4a e 4b). Os aumentos podem ser relacionados com o conteúdo de carbono nos resíduos (Quadro 1). Estrutura, agregação, capacidade de retenção de água, porosidade e infiltração de água são características beneficiadas pelo incremento de carbono no solo. Desta forma, a manutenção dos resíduos na superfície do solo apresenta vários aspectos positivos para a continuidade do sistema plantio direto.

CONCLUSÕES

1. O uso da cromatografia líquida permitiu identificar os ácidos orgânicos de baixo peso molecular nos resíduos vegetais utilizados. Na aveia preta, houve predomínio do ácido transaconítico; na ervilhaca, predominou o ácido málico e, no nabo forrageiro, os ácidos, cítrico e málico.

2. Não foi detectado nenhum tipo de ácido orgânico de baixo peso molecular, tanto na solução percolada quanto na solução do solo estudado.

3. Os resíduos vegetais não tiveram efeito na correção da acidez do solo em profundidade; seus efeitos restringiram-se à camada de 0-2,5 cm.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ildegardis Bertol, do Centro de Ciências Agroveterinárias de Lages da UDESC, por disponibilizar a área experimental para a coleta das amostras de solo utilizadas no presente trabalho.

LITERATURA CITADA

- AMARAL, A.S.; SPADER, V.; ANGHINONI, I & MEURER, E.J. Resíduos vegetais na superfície do solo afetam a acidez do solo e a eficiência do herbicida flumetsulam. *Ci. Rural*, 30:789-794, 2000.
- AMARAL, A.S. Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de calcário na superfície. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 107p. (Tese de doutorado)
- ANGHINONI, I.; AMARAL, A.S. & DESCHAMPS, F.C. Recuperação de ácidos alifáticos de baixo peso molecular na solução do solo utilizando-se cromatografia líquida. In: REUNIÃO SULBRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., Porto Alegre, 2002. Resumos Expandidos. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. CD-ROM
- BISSANI, C.A. Effects of root-derived organic acids on metal speciation in soil solution and bioavailability. Madison, University of Wisconsin, 2000. 146p. (Tese de Doutorado)
- ELKHATIB, E.A.; HERN, J.L. & STALEY, T.E. A rapid centrifugation method for obtaining soil solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:578-583, 1987.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 247p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FRANCHINI, J.C.; GONZALEZ-VILA, F.J.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, M.A. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. *Plant Soil*, 231:55-63, 2001.
- FRANCHINI, J.C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, M.A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:533-542, 1999a.

- FRANCHINI, J.C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:2267-2276, 1999b.
- FRANCHINI, J.C.; ARRUDA, I.C.; CAMPO, C.B.H.; GAUDÊNCIO, C.A. & TORRE, E. Composição orgânica da fração hidrossolúvel de adubos verdes. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ECOLOGIA QUÍMICA, 1., Curitiba, 1999. Anais. Curitiba, Sociedade Brasileira de Química, 1999c. p.71.
- HOYT, P.B. & TURNER, R.C. Effect of organic materials added to very acid soils on pH, aluminum, exchangeable NH_4 , and crop yields. *Soil Sci.*, 119:227-237, 1975.
- HUE, N.V. & AMIEN, I. Aluminum detoxification with green manures. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 20:1499-1511, 1989.
- HUE, N.V.; CRADDOCK, G.R. & ADAMS, F. Effect of organic acids on aluminum toxicity in sub-soils. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 50:28-34, 1986.
- JONES, D.I.H. & HAYWARD, M.V. The effect of pepsin pretreatment of herbage on the prediction of dry matter digestibility for solubility in fungal cellulase solution. *J. Sci. Food Agric.*, 26:711-718, 1975.
- JONES, D.L. Organic acids in the rhizosphere - a critical review. *Plant Soil*, 205:25-44, 1998.
- JONES, D.L.; PRABOWO, A.M. & KOCHIAN, L.V. Aluminum organic acid interactions in acid soils: II. Influence of solid phase sorption on organic acid-Al complexation and Al-rhizotoxicity. *Plant Soil*, 182:229-237, 1996.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & CHIERICE, G.O. Determinação de alumínio em soluções puras contendo ácidos orgânicos e em solo com eletrodo seletivo de fluoreto. *Química Nova*, 15:286-290, 1992.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & FRANCHINI, J.C. Resíduos vegetais: influência na química de solos ácidos. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, Ponta Grossa, 2000. Anais. Ponta Grossa, Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2000. p.82-94.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:411-416, 1993.
- PEARSON, R.G. Acids and Bases. *Science*, 151:172-177, 1966.
- POHLMAN, A.A. & McCOLL, J.G. Soluble organics from forest litter and their role in metal dissolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:265-271, 1988.
- RITCHIE, G.S.P. & DOLLING, P.J. The role of organic matter in soil acidification. *Aust. Soil Res.*, 23:569-576, 1985.
- SOUZA, R.O. Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 164p. (Tese de Doutorado)
- 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. 174 p. (Boletim Técnico, 5)
- van SOEST, P.J. & WINE, R.H. Use of detergent in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. *J. Assoc. Official Anal. Chem.*, 50:50-55, 1967.
- WOLT, J.D. Soil solution chemistry. New York, John Wiley & Sons, 1994. 345p.
- ZIGLIO, C.M.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, M.A. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. *Braz. Arch. Biol. Tech.*, 42:257-262, 1999.