

ACIDIFICAÇÃO DE UM LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO⁽¹⁾

M. N. CIOTTA⁽²⁾, C. BAYER^(3, 5), P. R. ERNANI^(2, 5),
S. M. V. FONTOURA⁽⁴⁾, J. A. ALBUQUERQUE⁽²⁾ & C. WOBETO⁽⁴⁾

RESUMO

A acidificação do solo e a ciclagem de nutrientes são afetadas pelos sistemas de preparo de solo, com possíveis reflexos no desenvolvimento e rendimento das culturas. Neste estudo, avaliou-se o efeito da utilização, durante 21 anos, do sistema de plantio direto (PD) sobre características químicas das fases sólida e líquida de um Latossolo Bruno Aluminico (Guarapuava, PR), com ênfase nos componentes da acidez. No sistema PD, ocorreu uma acidificação da camada superficial do solo, evidenciada pelos menores valores de pH (2-10 cm) e maior concentração e saturação por Al (6-20 cm), em comparação ao solo em preparo convencional (PC). Por outro lado, os maiores teores de Ca, Mg, K, P disponível (Mehlich-1 e Resina), carbono orgânico total e em solução, bem como a maior saturação por bases no solo em PD, contribuíram para um rendimento acumulado (39 safras) das culturas 22 % superior ao obtido no PC.

Termos de Indexação: sistema de preparo de solo, característica química do solo, rendimento de culturas, solução do solo.

SUMMARY: *ACIDIFICATION OF A SOUTH BRAZILIAN OXISOL UNDER NO-TILLAGE*

Soil tillage affects soil acidification and nutrient cycling and possibly causes effects on crop development and yields. In this study, the long-term (21 yr) effect of the no-tillage system (NT) on soil chemical characteristics (solid phase and solution) was evaluated in a south Brazilian Oxisol (Guarapuava, Paraná State), focussing on acidity components. NT

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado apresentada pelo primeiro autor ao PPG-Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Recebido para publicação em setembro de 2001 e aprovado em julho de 2002.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). E-mail: prernani@cav.udesc.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). E-mail: cimelio.bayer@ufrgs.br

⁽⁴⁾ Pesquisador da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária – FAPA. Distrito de Entre Rios, CEP 85108-000 Guarapuava (PR). E-mail: sandrav@agraria.com.br

⁽⁵⁾ Bolsista CNPq.

caused an acidification process in the top soil layer, demonstrated by lower pH values (2-10 cm) and higher concentration and saturation values of Al (6-20 cm), in comparison to soil with conventional tillage (CT). However, the highest values of exchangeable and soil solution Ca, Mg and K, bases saturation, available P (Mehlich-1 and Resin), and total and soluble organic carbon in no-tilled soil off-set the negative effect of the soil acidification and contribute to a 22 % higher accumulated crop yield (39 harvests) than under conventionally tilled soil.

Index terms: soil tillage system, soil chemical characteristic, crop yields, soil solution.

INTRODUÇÃO

A acidificação do solo é um processo natural que pode ser acelerado ou intensificado em sistemas agrícolas, principalmente pela aplicação de fertilizantes de reação ácida. Dentre os sistemas de preparo, pode ocorrer uma diferenciação na intensidade e na localização da acidez no perfil de acordo com o revolvimento, ou não, do solo (Blevins et al., 1983; Oliveira & Pavan, 1996). No plantio direto, os fertilizantes são aplicados na linha de semeadura, na superfície do solo. Sendo assim, a dissolução dos fertilizantes fosfatados e a nitrificação dos nitrogenados amoniacais ou amídicos podem contribuir para a acidificação da camada superficial do solo, principalmente quando se consideram longos períodos de cultivo sem reaplicação de calcário, ou quando altas doses de fertilizantes são aplicadas (Blevins et al., 1983; Ernani et al., 2001). Por outro lado, o revolvimento do solo com aração e gradagens no preparo convencional dilui a acidez originada pelos fertilizantes em toda a camada arável.

Em solo sob plantio direto, também ocorre um acúmulo de matéria orgânica, sendo a magnitude desse efeito maior na camada superficial (Bayer & Bertol, 1999; Bayer et al., 2000a,b; Amado et al., 2001). O aumento de matéria orgânica em solos não revolvidos decorre da diminuição da taxa de decomposição microbiana da matéria orgânica no solo pela diminuição da temperatura, aeração, aumento da cobertura do solo, agregação e do não fracionamento e incorporação dos resíduos vegetais. A magnitude do incremento varia com o tipo de solo, condições climáticas e sistemas de cultura utilizados (Bayer et al., 2000a; Amado et al., 2001). Este aumento de matéria orgânica pode amenizar possíveis efeitos negativos da acidificação superficial em solos sob sistema plantio direto pela complexação de Al (Salet et al., 1999). Além disso, nesse sistema de plantio, o acúmulo de resíduos vegetais pode diminuir a toxidez de Al a partir da lixiviação de compostos orgânicos solúveis em água, os quais atuam na complexação do Al no solo (Miyazawa et al., 1993), além do efeito positivo da adição de Ca, Mg e K destes resíduos que podem contribuir para diminuir a atividade do Al em solução e, ou, aumentar a saturação por bases (Franchini et al., 1999).

O preparo do solo influi também na distribuição de nutrientes, como Ca, Mg, K e P, no perfil do solo (Eltz et al., 1989; Muzilli, 1983). No solo sob preparo convencional, é observada uma distribuição uniforme de todos os nutrientes na camada arável, enquanto, no plantio direto, percebe-se, normalmente, um acúmulo nos centímetros superficiais, decorrente da aplicação dos fertilizantes sobre a superfície, da mineralização dos nutrientes presentes nos resíduos vegetais na superfície do solo e da maior CTC dessas camadas em virtude dos maiores teores de matéria orgânica (Bayer & Bertol, 1999; De Maria et al., 1999). O acúmulo superficial de P normalmente é mais acentuado do que dos demais nutrientes por causa de sua baixa mobilidade no solo (Bayer & Mielniczuk, 1997).

As maiores concentrações de P no solo em plantio direto e a maior saturação por bases, resultante da maior concentração de Ca, Mg e K trocáveis no solo e, possivelmente, da complexação de Al pela matéria orgânica podem minimizar possíveis efeitos negativos da acidificação superficial do solo.

Este estudo objetivou avaliar o efeito da utilização, durante 21 anos, do sistema plantio direto sobre as características químicas da fase sólida e da solução de um Latossolo Bruno Alumínico, com ênfase nos componentes da acidez. O efeito do plantio direto sobre as características químicas do solo foi avaliado em comparação ao solo em preparo convencional, e o rendimento das culturas de soja, milho, trigo, cevada e aveia branca, num total de 39 safras, foi utilizado como um indicador fitotécnico da qualidade química do solo nos dois sistemas de preparo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Campo Experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), em Guarapuava (PR). Utilizou-se um Latossolo Bruno Alumínico câmbico textura argilosa (610 g kg⁻¹ de argila, 320 g kg⁻¹ de silte, e 70 g kg⁻¹ de areia) e mineralogia da fração argila predominantemente gibbsítica (Costa, 2001).

Originalmente, a área consistia de campo nativo e foi arada, pela primeira vez, em 1950, cultivando-se trigo e arroz durante 12 anos. De 1962 a 1968, a área foi utilizada com pastagem melhorada para gado leiteiro, com trevo branco (*Trifolium repens*) e gramíneas de inverno (Jaster et al., 1993). Nos anos seguintes, até 1978, o solo foi cultivado na sucessão trigo/soja (*Triticum aestivum*/*Glicine max*) em preparo convencional, com aração e gradagens.

Na instalação do experimento, o solo (0-20 cm) apresentava $\text{pH-H}_2\text{O} = 5,5$, teores trocáveis ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) de $\text{Al} = 0,15$, $\text{Ca} + \text{Mg} = 5,7$, e $\text{K} = 0,25$, saturação por Al de 2,5 %, carbono orgânico de 28 g kg^{-1} e P disponível (Mehlich-1) de $5,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (Eltz et al., 1989; Jaster et al., 1993). Como primeira cultura do experimento, cultivou-se soja na primavera-verão de 1978, a partir da correção da fertilidade do solo com $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário e 300 kg ha^{-1} de escória de Thomas, fertilizante que contém 19 % de P_2O_5 e, por tratar-se de um resíduo da indústria siderúrgica, contém vários nutrientes em composição variada.

O experimento consistiu de cinco combinações (inverno/verão) dos sistemas de preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e escarificação (ESC): PC-PC, PC-PD, PD-PC, PD-PD, e Esc-PD, aplicadas em parcelas experimentais de $12 \times 100 \text{ m}$. Entretanto, neste estudo, somente foram avaliadas as combinações PC-PC e PD-PD, as quais permitem avaliar o efeito acumulado dos sistemas de preparo sobre as características químicas do solo durante o longo período experimental (1978-1999). O sistema PC consistiu numa aração com arado de discos na profundidade de até 20 cm, e duas gradagens, sendo uma com grade niveladora e a outra com grade de dentes. O PD foi realizado com máquinas semeadora-adubadoras adaptadas para plantio direto. A distribuição dos tratamentos em campo seguiu o delineamento de blocos ao acaso, com três repetições.

No período de 1978-1985, cultivou-se a sucessão trigo/soja e, de 1986 a 1999, utilizou-se um sistema de rotação de culturas envolvendo aveia branca (*Avena sativa*), trigo, cevada (*Hordeum vulgare*), ervilhaca peluda (*Vicia vilosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), soja e milho (*Zea mays*). Realizou-se uma mesma adubação para toda a área experimental, a qual foi baseada na cultura e nos valores médios das análises de solo nos sistemas de preparo. Em média, a adubação na base consistiu, em kg ha^{-1} , de 24 de N , 90 de P_2O_5 e 60 de K_2O , para o milho; 16 de N , 60 de P_2O_5 e 40 de K_2O , para o trigo; 15 de N , 75 de P_2O_5 e 75 de K_2O , para a cevada, e 6 de N , 30 de P_2O_5 e de K_2O , para a aveia, utilizando-se fórmulas comerciais. A adubação nitrogenada em cobertura consistiu da aplicação de quantidades de uréia equivalentes a 150 kg ha^{-1} de N no milho, 40 de N no trigo, 30 de N na cevada e

30 de N na aveia. As doses e o manejo da adubação seguiram as recomendações de CFRS/SC (1985, 1995).

Amostras de solo foram coletadas, em abril de 1999, com auxílio de espátula, em trincheiras de 50 cm de profundidade. A amostragem foi efetuada nas camadas de 0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm, sendo as amostras, após secas em estufa a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, moídas e passadas em peneira com malha de 2 mm.

Avaliaram-se algumas características químicas da fase sólida e líquida do solo. Na fase sólida, foram determinados $\text{pH-H}_2\text{O}$, pH-SMP , Ca , Mg , Al e K trocáveis, P e carbono orgânico total (COT). Cálcio, Mg e Al foram extraídos com solução de KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e determinados por espectrofotometria de plasma (ICP); K trocável foi extraído com solução de ácidos diluídos (Mehlich-1) e determinado por fotometria de chama; P foi extraído pelos métodos de Mehlich-1 e da resina trocadora de íons e determinado por colorimetria, e o COT foi determinado por digestão sulfocrômica, conforme procedimentos descritos em Tedesco et al. (1995). Os teores de $\text{H} + \text{Al}$ foram calculados a partir dos valores de pH-SMP , segundo a equação proposta por Escosteguy & Bissani (1999). Os resultados de COT foram corrigidos pela densidade do solo, sendo expressos na relação massa/volume. Calcularam-se a CTC efetiva e a CTC a $\text{pH} 7,0$, as quais foram utilizadas no cálculo da saturação por Al (m %) e da saturação por bases (V %), respectivamente.

Para extrair a fração líquida do solo, foram agitadas amostras de 50 g de solo com 50 mL de água destilada, durante 15 minutos. Após uma noite em repouso, as suspensões foram transferidas para um frasco de kitazato acoplado a uma bomba de vácuo. Colocou-se uma folha de papel filtro na base do funil e obteve-se a fração líquida após a aplicação de vácuo (Franchini et al., 1999). Cabe salientar que esse método não extrai a verdadeira solução do solo, mas quantifica os nutrientes solúveis numa relação solo:água destilada de 1:1, simulando, com certa aproximação, a composição da solução do solo. A fração líquida, no decorrer do texto denominada solução do solo, foi analisada em relação ao pH , condutividade elétrica, concentração de Ca , Mg , K , P e carbono orgânico solúvel (COS). Cálcio e Mg foram determinados por espectrofotometria de plasma, K por fotometria de chama e P pelo método descrito por Murphy & Riley (1962). O COS foi analisado por digestão sulfocrômica, pelo uso de uma curva-padrão de glicose (Salet et al., 1999).

O rendimento das culturas foi avaliado em 39 safras (1978-1999), e expresso numa umidade média de 13 %. Apenas a ervilhaca e o nabo forrageiro não foram avaliados quanto à produção de grãos, pois estas espécies foram utilizadas na cobertura do solo e fornecimento de N para o milho

em sucessão. A colheita das culturas foi realizada com automotriz numa área útil de 800 m² (8 x 100 m), a qual representa a área da parcela experimental, excluindo-se 2 m de cada lado como bordadura. A grande área útil avaliada contribuiu para a obtenção de baixos coeficientes de variação (6 a 15 %) dos resultados de rendimento de grãos.

O efeito dos preparos sobre as características químicas do solo foi analisado estatisticamente por meio da análise de variância, sendo a diferença entre as médias de tratamentos avaliada pelo teste de Tukey, a 5 %. O rendimento médio das culturas não foi submetido à análise estatística, uma vez que não se dispõe dos resultados das repetições experimentais dos tratamentos na fase inicial do experimento (1978-1987). A relação entre variáveis de solo foi avaliada pela significância dos coeficientes de regressão polinomial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Acidez ativa e condutividade elétrica

Houve uma acidificação na camada superficial do solo em PD, evidenciada pelos valores de pH de 0,2 a 0,4 unidades menores na camada de 2-10 cm (Figura 1a), em comparação ao solo em PC. O pH no solo em PD aumentou de 4,7 para 5,1 com a profundidade, enquanto no solo em PC o pH foi 5,0 e praticamente não variou nos primeiros 30 cm (Figura 1a). A acidificação em PD provavelmente está relacionada com o aumento da concentração eletrolítica, evidenciado pela maior condutividade elétrica (Figura 1c), e com a aplicação de fertilizantes de reação ácida, que, ao não serem incorporados, concentram na superfície do solo o efeito ácido da nitrificação do amônio (Blevins et al., 1983) e da dissolução dos fosfatos solúveis de cálcio (Ernani et al., 2001). O pH da solução do solo também foi menor no sistema PD em comparação ao PC (Figura 1b).

A acidificação até à profundidade de 10 cm é um reflexo do longo período (1978 a 1999) em que o solo vem sendo cultivado sem calagem. Embora essas reações também ocorram no PC, como a camada de solo até 20 ou 30 cm neste sistema é mobilizada anualmente pelas arações e gradagens, maior quantidade de solo atua no tamponamento da acidez. Menores valores de pH na camada de 0-5 e 5-10 cm do solo em PD do que em PC também foram observados por Pottker & Ben (1998) e por Blevins et al. (1983). Entretanto, autores, tais como: Muzilli (1983), Sidiras & Pavan (1985) e Lal et al. (1994), não verificaram diferença nos valores de pH entre o sistema plantio direto e o preparo convencional, o que pode estar relacionado, possivelmente, com o maior poder tampão da acidez dos solos estudados por esses autores, menor lixiviação de bases decorrente de menor precipitação pluviométrica e

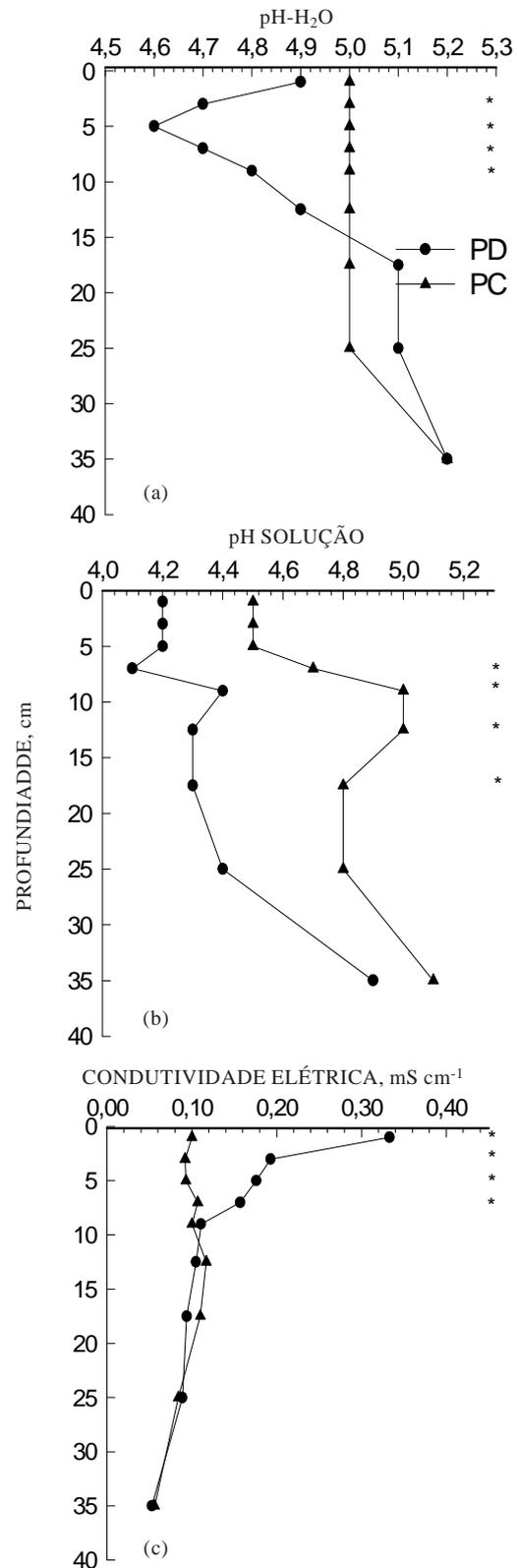


Figura 1. Valores de (a) pH-H₂O, (b) pH da solução e (c) condutividade elétrica no perfil de um Latossolo Bruno Aluminico submetido, durante 21 anos, aos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). * significativo pelo teste de Tukey a 5 %.

menor aplicação de fertilizantes com reação ácida sobre o solo, dentre outros fatores.

Carbono orgânico total e solúvel

O solo em PD apresentou maiores teores de carbono orgânico total (COT) nas camadas superficiais até 6 cm (Figura 2a), em comparação ao PC. Na profundidade de 0-2 cm, a concentração de COT no sistema PD foi 35 % superior à do PC, e os teores diminuíram gradativamente a partir da superfície, de 46 g dm⁻³, na camada de 0-2 cm, para 17 g dm⁻³, na camada de 30-40 cm. Esse acentuado gradiente de concentração não ocorreu no PC, onde o COT foi uniforme na camada de 0-20 cm (média 34 g dm⁻³), e diminuiu para 24 g dm⁻³ abaixo de 20 cm. A manutenção de maiores teores de COT no solo sob PD resulta da não-mobilização do solo, onde os resíduos vegetais permanecem sobre a superfície, ocasionando uma lenta decomposição e acumulação (De Maria et al., 1999; Bayer et al., 2000a,b). Por outro lado, o revolvimento do solo no PC favorece a decomposição microbiana da matéria orgânica, por aumentar a aeração e a temperatura, bem como o fracionamento e mistura dos resíduos vegetais com o solo. Além disso, a quebra de agregados, neste último sistema, expõe a matéria orgânica protegida fisicamente no interior de agregados ao ataque microbiano (Beare et al., 1994; Six et al., 2000).

Os teores de carbono orgânico solúvel (COS, mg dm⁻³) apresentaram uma relação significativa com os teores de COT (g dm⁻³) do solo ($COS = -34,25 + 3,11COT$, $r^2 = 0,68$, $P < 0,01$), sendo os maiores teores verificados nas camadas superficiais do solo em PD (~116 mg dm⁻³ de 0-2 cm até ~82 mg dm⁻³ de 8-10 cm), em comparação ao solo em PC, o qual apresentou um teor médio de ~60 mg dm⁻³, praticamente uniforme em profundidade (Figura 2b).

Cátions trocáveis e solúveis

Houve um gradiente na concentração das bases trocáveis a partir da superfície do solo em PD, enquanto o solo em PC apresentou concentrações praticamente uniformes no perfil do solo. No solo em PD, as concentrações de Ca e Mg trocáveis foram maiores até 4 e 6 cm, respectivamente, em comparação às do PC (Quadro 1). Nestes dois sistemas de preparo de solo, os valores de Ca atingiram 3,11 e 1,73 cmol_c kg⁻¹, e os de Mg 0,87 e 0,47 cmol_c kg⁻¹, respectivamente, na média destas camadas. Na camada de 0-2 cm, os teores de Ca e Mg no PD chegaram a ser aproximadamente duas vezes maiores do que os do PC.

Os teores de K foram maiores na superfície do solo (0-2 cm) em PD. Todavia, dos 10 aos 30 cm, maiores teores deste nutriente ocorreram no solo em PC (Quadro 1). À semelhança do que ocorreu com o Ca e Mg, em PC os teores de K trocável não diferiram entre profundidades em toda camada de

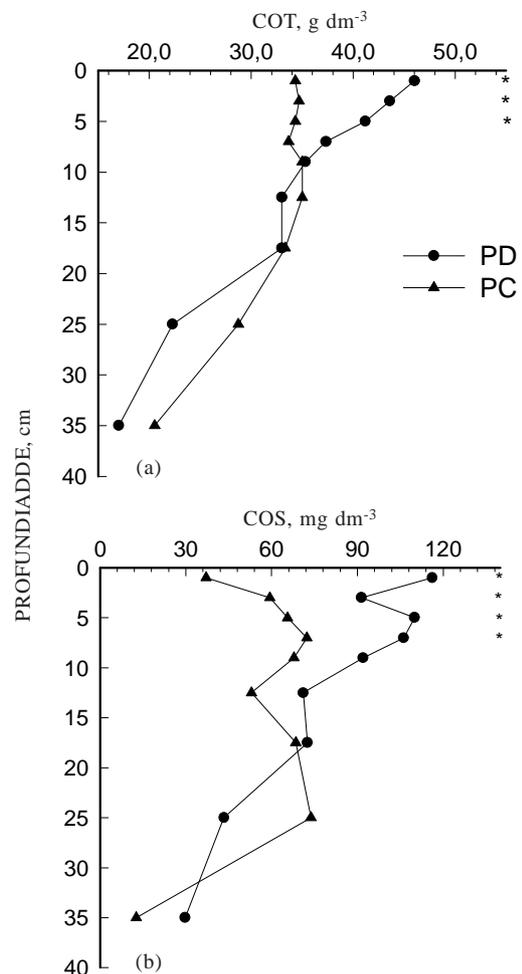


Figura 2. Teores de (a) carbono orgânico total (COT), (b) carbono orgânico solúvel (COS) no perfil de um Latossolo Bruno Alumínico submetido, durante 21 anos, aos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). * significativo pelo teste de Tukey a 5 %.

incorporação dos fertilizantes (0-20 cm), porém se concentrou na superfície do PD. Uma vez que o experimento não recebia calcário há 21 anos, o maior acúmulo das bases trocáveis na camada superficial no solo em PD resultou da ciclagem dos nutrientes contidos nos resíduos vegetais mantidos sobre o solo e da aplicação de fertilizantes sobre o solo, basicamente, fertilizantes potássicos, e fosfatos solúveis, estes por conter Ca em sua composição. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Eltz et al. (1989), aos sete anos da instalação deste experimento, por outros autores (Pavan et al., 1984; Ismail et al., 1994; Oliveira & Pavan, 1996), em condições edafoclimáticas distintas.

A saturação por bases (V %) do solo foi inferior a 50 % em ambos os sistemas de preparo (Quadro 1). No solo em PC, a V % foi uniforme em profundidade, apresentando um valor médio ponderado de 26 %. No solo em PD, a V % alcançou valores de 44 e 31 %

Quadro 1. Concentração de Ca, Mg e K trocáveis e solúveis e saturação por bases de um Latossolo Bruno Aluminoso submetido, durante 21 anos, aos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD)

Profundidade	Ca		Mg		K		Saturação por base	
	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD
cm	Trocável, cmol.kg^{-1}						%	
0-2	1,68 abB	3,55 aA	0,48 aB	1,19 aA	0,29 aB	0,74 aA	25 aB	44 aA
2-4	1,78 abB	2,67 bA	0,46 aB	0,80 bA	0,28 abA	0,37 bA	26 aB	31 aA
4-6	1,78 abA	2,07 cA	0,46 aB	0,63 bcA	0,27 abA	0,26 bcA	26 aA	27 bcdA
6-8	1,78 abA	1,77 cdA	0,45 aA	0,56 cA	0,28 abA	0,19 cdA	25 aA	22 cdA
8-10	1,82 aA	1,53 cdA	0,46 aA	0,51 cA	0,29 aB	0,14 cdB	26 aA	21 dA
10-15	1,83 aA	1,59 cdA	0,49 aA	0,47 cA	0,31 aA	0,14 cdB	27 aA	20 dB
15-20	1,85 aA	1,72 cdA	0,48 aA	0,49 cA	0,25 abA	0,13 cdB	27 aA	23 cdA
20-30	1,82 aA	1,41 dB	0,47 aA	0,52 cA	0,24 abA	0,10 dB	26 aA	26 bcdA
30-40	1,24 bA	1,36 dB	0,42 aA	0,55 cA	0,15 bA	0,09 dA	25 aA	29 bcA
	Solução, mmol.dm^{-3}							
0-2	0,34 aB	1,10 aA	0,15 aB	0,58 aA	0,20 aB	0,71 aA		
2-4	0,27 aB	0,65 bA	0,12 aB	0,29 bA	0,18 aB	0,34 bA		
4-6	0,27 aB	0,61 bcA	0,12 aB	0,26 bcA	0,18 aB	0,24 cA		
6-8	0,35 aB	0,57 bcdA	0,15 aB	0,24 bcdA	0,19 aA	0,15 cdA		
8-10	0,29 aA	0,36 cdeA	0,12 aA	0,15 bcdA	0,19 aA	0,11 deB		
10-15	0,22 aA	0,35 deA	0,10 aA	0,13 cdA	0,21 aA	0,09 deB		
15-20	0,22 aA	0,29 eA	0,10 aA	0,11 cdA	0,18 aA	0,07 deB		
20-30	0,27 aA	0,27 eA	0,09 aA	0,11 dA	0,14 aA	0,06 eB		
30-40	0,11 aA	0,19 eA	0,05 aA	0,10 dA	0,08 aA	0,04 eA		

Letras maiúsculas comparam sistemas de preparo dentro da mesma profundidade. Letras minúsculas comparam profundidade dentro de cada sistema de preparo. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

nas camadas de 0-2 e 2-4 cm, respectivamente, diminuindo para um valor médio ponderado de 24 % na camada de 4-40 cm. Os maiores valores de V % na superfície do solo em PD refletem os maiores teores de Ca, Mg e K trocáveis nessa camada.

Os teores de Ca, Mg e K na solução do solo apresentaram a mesma tendência de seus teores trocáveis (Quadro 1 e Figura 3). Na camada de 0-8 cm, o solo em PD apresentou maiores teores de Ca e Mg solúveis do que o solo em PC, tendo o Ca variado, em média, de 0,73 a 0,31 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, e o Mg, de 0,34 a 0,14 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, no PD e PC. Da mesma forma, os teores de K da solução do solo (0-6 cm) em PD foram aproximadamente 2,5 vezes maiores do que no solo em PC (0,43 e 0,18 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$); todavia, abaixo dos 8 cm, ocorreu o inverso, com teores médios de 0,17 e 0,80 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, resultado do menor teor de K trocável na camada subsuperficial do solo em PD.

Apesar das maiores concentrações de bases trocáveis, de maneira geral, o solo em PD apresentou maior concentração e saturação por Al em comparação ao solo em PC (Figura 4a,b). A concentração de Al variou com a profundidade no PD, tendo na camada superficial (0-2 cm) ocorrido a menor concentração (0,81 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) relativamente à camada de 6 a 20 cm (1,54 a 1,32 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$). Por

sua vez, o revolvimento do solo no sistema PC promoveu uma distribuição mais uniforme dos teores de Al trocável no perfil.

É possível que a matéria orgânica tenha contribuído na complexação de Al nas camadas superficiais do solo em PD, como sugerido pela regressão múltipla que relaciona as concentrações de Al trocável e as concentrações de COT e pH do solo ($\text{Al trocável} = 11,295 - 0,168 \text{COT} - 1,95 \text{pH}$, $r^2 = 0,58$, $P < 0,01$). Além da complexação pela matéria orgânica, a maior concentração de bases na solução contribuiu para diminuir a atividade do Al na solução do solo sob PD, diminuindo o seu potencial de toxidez para as plantas (Salet et al., 1999).

P disponível e P solúvel

A concentração de P no solo foi maior até 10 cm de profundidade no solo em PD, em comparação ao solo em PC (Quadro 2). Nesta camada, a concentração de P no solo em PD, determinada pelo método de Mehlich-1, foi, aproximadamente, quatro vezes maior (16 mg dm^{-3}) do que no solo em PC (3,5 mg dm^{-3}). A não incorporação do fertilizante ao solo no sistema PD diminui o contato solo-fertilizante e, conseqüentemente, a intensidade das reações de adsorção do fosfato. Acredita-se que esse fator seja responsável, em grande parte, pelos maiores teores de P

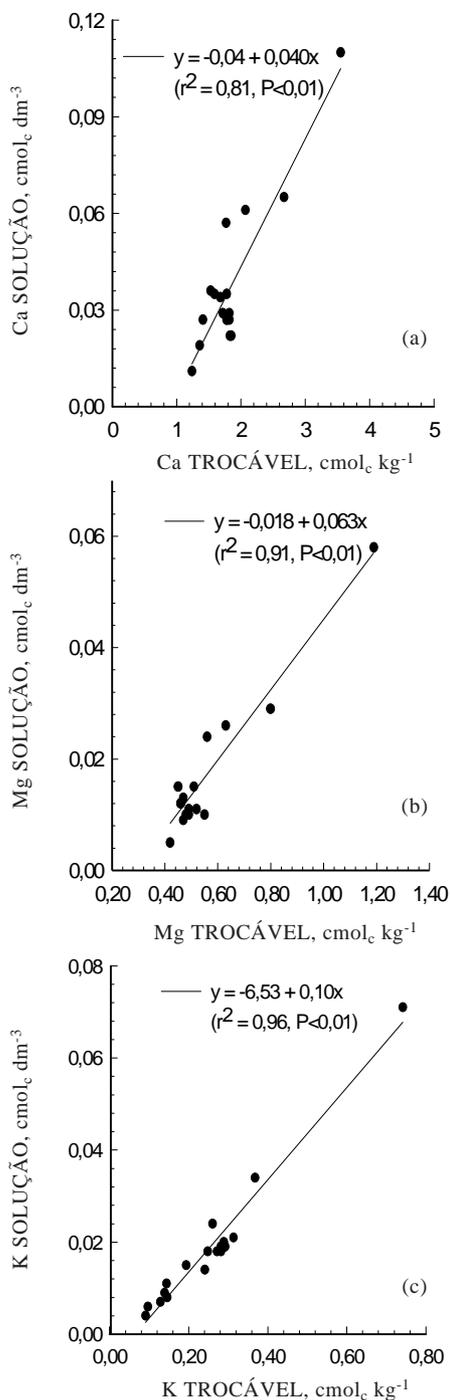


Figura 3. Relação entre os teores de (a) Ca, (b) Mg e (c) K trocáveis e em solução no perfil de um Latossolo Bruno Aluminico.

disponível no solo em PD, principalmente neste solo argiloso e com mineralogia predominantemente gibbsítica. Por sua vez, no solo em PC, a incorporação dos adubos fosfatados com arações e gradagens, além de intensificar as reações de adsorção, promoveu maior distribuição de P em todo o perfil (0-40 cm).

Normalmente, o acúmulo de P ocorre nos primeiros centímetros superficiais do solo em PD

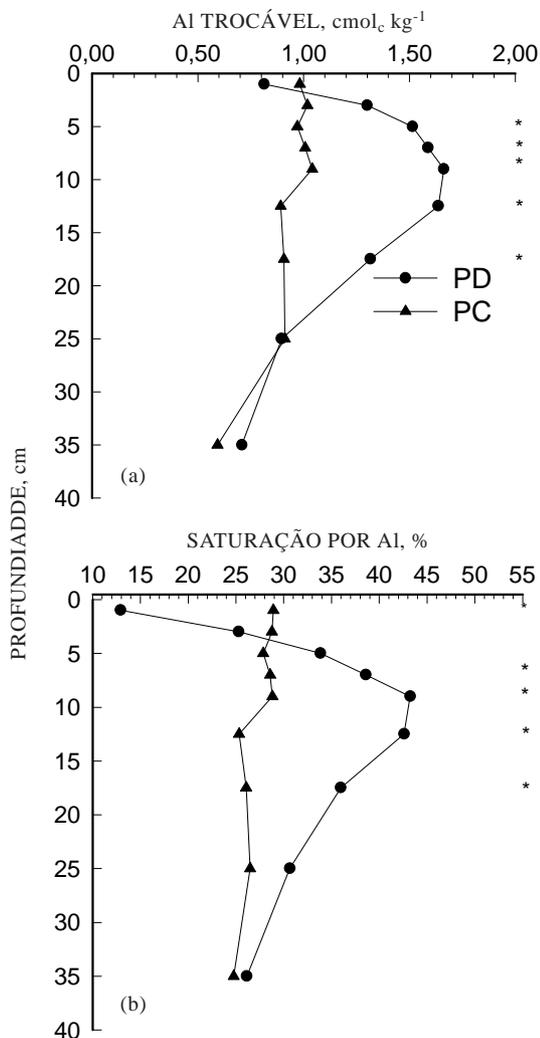


Figura 4. Valores de (a) Al trocável e (b) saturação por Al no perfil de um Latossolo Bruno Aluminico submetido, durante 21 anos, aos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). * significativo pelo teste de Tukey a 5 %.

(Bayer & Mielniczuk, 1997; Burle et al., 1997). Entretanto, no presente experimento, o acúmulo de P no solo em PD ocorreu até 10 cm de profundidade, o que pode ser atribuído ao longo período experimental (21 anos). Em áreas sob longo período em PD, a adição sucessiva de fertilizantes fosfatados, associada à intensa atividade microbiana na camada superficial do solo coberto por resíduos vegetais, pode favorecer a descida deste nutriente pelo movimento de compostos orgânicos de P no perfil do solo (Dick, 1983). Também pode ter contribuído para o aumento de P até 10 cm no solo sob PD o uso de semeadora-adubadora de linhas no inverno e verão, em todas as safras, possivelmente promovendo uma incorporação parcial dos fertilizantes a uma profundidade de aproximadamente 8 cm. Esse efeito referente à incorporação mecânica dos fertilizantes ratifica os

Quadro 2. Valores de P disponível (Mehlich-1 e resina) e na solução (P solúvel) de um Latossolo Bruno Aluminico submetido, durante 21 anos, aos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD)

Profundidade	P Mehlich-1		P resina		P solúvel	
	PC	PD	PC	PD	PC	PD
cm	mg kg ⁻¹				µg dm ⁻³	
0-2	4,2 aB	14,5 aA	5,6 aB	21,0 aA	6,0 aB	27,0 aA
2-4	3,9 aB	14,5 aA	6,7 aB	21,0 aA	8,0 aB	25,0 abA
4-6	3,8 aB	16,6 aA	6,4 aB	21,8 aA	5,0 aB	23,0 abA
6-8	4,0 aB	19,1 aA	6,5 aB	28,0 aA	7,0 aB	24,0 abA
8-10	4,0 aB	14,6 aA	7,6 aB	20,5 aA	15 aB	28,0 aA
10-15	4,4 aA	7,3 bA	6,4 aA	9,6 bA	8,0 aB	16,0 abA
15-20	3,8 aA	4,4 bA	6,6 aA	4,5 bcA	7,0 aB	24,0 abA
20-30	4,4 aA	1,2 bA	5,4 aA	0,4 cA	11,0 aA	17,0 abA
30-40	1,2 aA	1,6 bA	1,6 aA	0,8 cA	8,0 aA	14,0 bA

Letras maiúsculas comparam sistemas de preparo dentro da mesma profundidade. Letras minúsculas comparam profundidade dentro de cada sistema de preparo. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

resultados de Eltz et al. (1989), que, aos sete anos de condução deste mesmo experimento, encontraram maiores concentrações de P no solo em PD (33 mg dm⁻³) do que no PC (7 mg dm⁻³) até 8 cm de profundidade.

Em relação aos diferentes métodos de análise de P utilizados, houve grande correlação entre as concentrações de P determinadas pelo método de Mehlich-1 e pelo método da resina ($r^2 = 0,98$, $P < 0,01$). Na solução do solo, a concentração de P também foi maior no PD do que no PC, sendo a diferença verificada até à profundidade de 20 cm. Na média da camada de 0-20 cm, a concentração de P solúvel no solo sob PC foi de 8,1 µg dm⁻³, enquanto no PD foi de 23,9 µg dm⁻³. A maior concentração deste elemento em solução reflete também a sua menor adsorção química em solos não revolvidos, seja o nutriente proveniente de fertilizantes minerais, seja da decomposição dos resíduos vegetais na superfície do solo.

Rendimento de culturas

No período de 1978-2000, foram avaliadas 39 safras, das quais 18 foram de soja, quatro de milho, sete de trigo, sete de cevada e três de aveia branca (grãos) (Quadro 3). A soja produziu 42 % mais no sistema PD em comparação ao PC. O milho apresentou a mesma tendência da soja, com uma diferença de 22 %. Nas culturas de inverno, a diferença de rendimento entre os sistemas de preparo foi menor do que no verão, sendo os acréscimos no sistema PD de aproximadamente 6 % no trigo, 7 % na cevada e 9 % na aveia branca, em comparação ao PC. Eltz et al. (1989), ao final de sete anos de condução deste experimento, já observaram superioridade no rendimento acumulado de grãos em 22 % no sistema PD em comparação ao PC.

Quadro 3. Rendimento médio de culturas de inverno e verão nos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD)

Cultura	Nº safras	Rendimento		
		PC	PD	PD/PC
Mg ha ⁻¹				
Soja	18	1,44	2,06	1,42
Milho	4	6,75	8,25	1,22
Trigo	7	2,23	2,36	1,06
Cevada	7	1,93	2,07	1,07
Aveia	3	2,13	2,33	1,09
Total	39	-	-	1,22

Rendimento de grãos não foi submetido à análise estatística por não se dispor de resultados referentes às repetições experimentais do período inicial deste experimento (1978-1987).

O rendimento das culturas foi interpretado como um indicador fitotécnico das alterações químicas do solo em PD. Nesse sentido, o maior rendimento das culturas no sistema PD revela que o possível efeito negativo da acidificação do solo, evidenciado pelos menores valores de pH e maior concentração e saturação por Al nas camadas superficiais do solo neste sistema conservacionista de preparo, tenha sido compensado pela maior concentração de bases trocáveis, saturação por bases, disponibilidade de fósforo e por maiores concentrações de COT e COS no solo, determinando, desta forma, um ambiente químico mais favorável ao estabelecimento e desenvolvimento vegetal, em comparação ao solo em PC. A não-ocorrência de fatores físicos do solo restritivos ao desenvolvimento vegetal, bem como as menores temperaturas do solo no verão e o maior

conteúdo de água no solo em PD (Costa, 2001), pode ter contribuído para que as melhorias na qualidade química do solo determinassem maiores rendimentos das culturas neste sistema conservacionista de manejo do solo, em comparação ao PC.

CONCLUSÕES

1. Em plantio direto, ocorreu acidificação na camada superficial do solo, evidenciada pelos menores valores de pH e maior concentração e saturação por Al, em comparação ao solo em preparo convencional.

2. As maiores concentrações de Ca, Mg, K e de P na fase sólida e na solução, bem como os maiores teores de carbono orgânico total e solúvel, atuam na minimização do efeito negativo da acidificação do solo em plantio direto, contribuindo para a obtenção de maiores ou equivalentes rendimentos das culturas neste sistema conservacionista de manejo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Eng^o-Agr^o Sr. Franz Jaster, pela instalação e acompanhamento do experimento na sua fase inicial, salientando a visão privilegiada deste profissional, cuja iniciativa pioneira trouxe grande contribuição para o avanço do entendimento e adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo no Sul do Brasil.

LITERATURA CITADA

- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F. & BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:189-197, 2001.
- BEARE, M.H.; CABRERA, M.L.; HENDRIX, P.F. & COLEMAN, D.C. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 787-795, 1994.
- BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de culturas. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:105-112, 1997.
- BAYER, C. & BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo Húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:687-694 1999.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & CERETTA, C.A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil Till. Res.*, 53:95-104, 2000a.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 54:101-109, 2000b.
- BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; SMITH, M.S.; FRYE, W.W. & CORNELIUS, P.L. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. *Soil Till. Res.*, 3:135-146, 1983.
- BURLE, M.L.; MIELNICZUK, J. & FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics with emphasis on soil acidification. *Plant Soil*, 190:309-316, 1997.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – CFRS/SC. Passo Fundo, RS. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 2.ed. Passo Fundo, SBSC-Núcleo Regional Sul/EMBRAPA-CNPT, 1985. 128p.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – CFRS/SC. Passo Fundo, RS. Recomendações de adubação e calagem para o estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, SBSC-Núcleo Regional Sul/EMBRAPA-CNPT, 1995. 224p.
- COSTA, F.S. Propriedades físicas e produtividade de culturas de um Latossolo Bruno sob sistemas de manejo do solo em experimento de longa duração. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2001. 98p. (Tese de Mestrado)
- DE MARIA, I.C.; NNABUDE, P.C. & CASTRO, O.M. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferralsol in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 51:71-79, 1999.
- DICK, W. Organic carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:102-107, 1983.
- ELTZ, F.L.F.; PEIXOTO, R.T.G. & JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:259-267, 1989.
- ERNANI, P.R.; STECKLING, C. & BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:939-946, 2001.
- ESCOSTEGUY, P.A. & BISSANI, C.A. Estimativa de H + Al pelo pH SMP em solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:175-179, 1999.
- 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, 1999.
- ISMAIL, I.; BLEVINS, R.L. & FRYE, W.W. Long-term no-tillage on soil properties and continuous corn yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:193-198, 1994.
- JASTER, F.; ELTZ, F.L.F.; FERNANDES, F.F.; MERTEN, G.H.; GAUDÊNCIO, C.A. & OLIVEIRA, M.C.N. Rendimento de grãos em diferentes sistemas de preparo e manejo de solos. Londrina, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1993. 37p. (Boletim Técnico)
- LAL, R.; MAHBOUBI, A.A. & FAUSEY, N.R. Long-term tillage and rotation effects on properties of a central Ohio soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:517-522, 1994.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & CALEGARI, A. efeito de material vegetal na acidez do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:411-416, 1993.

- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27:31-36, 1962.
- MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:95-102, 1983.
- OLIVEIRA, E.L. & PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. *Soil Till. Res.*, 38:47-57, 1996.
- PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATI, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, and magnesium and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:33-38, 1984.
- POTTKER, D. & BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:589-597, 1998.
- SALET, R.; ANGHINONI, I. & KOCHHANN, R.A. Atividade do Alumínio na solução do solo do sistema plantio direto. *R. Cient. Unicruz*, 1:9-13, 1999.
- SANTOS, H.P. & TOMM, G.O. Estudo da fertilidade do solo sob quatro sistemas de rotação de culturas envolvendo trigo em plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:407-414, 1996.
- SIDIRAS, N. & PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. *R. Bras. Ci. Solo*, 9:249-254, 1985.
- SIX, J.; ELLIOT, E.T. & PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.*, 32:2099-2103, 2000.
- TEDESCO, M.J.; GIANELO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5)