

SEÇÃO VI - MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA

INTEGRAÇÃO LAVOURA E PECUÁRIA E OS ATRIBUTOS FÍSICOS DE SOLO MANEJADO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO⁽¹⁾

Silvio Tullio Spera⁽²⁾, Henrique Pereira dos Santos⁽³⁾, Renato Serena Fontaneli⁽⁴⁾ & Gilberto Omar Tomm⁽⁵⁾

RESUMO

Atributos físicos de solo foram avaliados num Latossolo Vermelho distrófico típico, em Passo Fundo, RS, dez anos após o estabelecimento (1993 a 2003) de cinco sistemas de produção integrando culturas produtoras de grãos, pastagens de inverno e forrageiras perenes: I) trigo/soja, aveia-branca/soja e ervilhaca/milho; II) trigo/soja, aveia-branca/soja e forrageiras anuais - aveia-preta + ervilhaca/milho; III) forrageiras perenes da estação fria - festuca + trevo-branco + trevo-vermelho + cornichão; IV) forrageiras perenes da estação quente - pensacola + aveia-preta + azevém + trevo-branco + trevo-vermelho + cornichão; e V) alfafa para feno, acrescentada em 1994, como tratamento adicional, com repetições em áreas contíguas ao experimento. Metade das áreas sob os sistemas III, IV e V retornou ao sistema I a partir do verão de 1996. As culturas, tanto de inverno como de verão, foram estabelecidas sob plantio direto. Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso com quatro repetições. Amostras de solo também foram coletadas em fragmento de floresta subtropical ao lado do experimento. O aumento da densidade do solo e da microporosidade, e a redução da porosidade total e da macroporosidade, devido aos distintos sistemas de produção de grãos com pastagens, não atingiram níveis capazes de promover degradação do solo. Os sistemas com pastagens perenes apresentaram menor densidade do solo e maior porosidade total e macroporosidade na camada 0-2 cm, em relação aos sistemas de produção de grãos ou produção de grãos com pastagens anuais.

Termos de indexação: rotação de culturas, integração lavoura-pecuária, densidade do solo, porosidade total.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em março de 2007 e aprovado em dezembro de 2008.

⁽²⁾ Pesquisador da Embrapa Trigo - Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. Caixa Postal 451, CEP 99001-970 Passo Fundo (RS). Doutorando em Agronomia na Universidade de Passo Fundo. E-mail: spera@cnpt.embrapa.br

⁽³⁾ Pesquisador da Embrapa Trigo. Bolsista CNPq-PQ. E-mail: hpsantos@cnpt.embrapa.br

⁽⁴⁾ Pesquisador da Embrapa Trigo, Professor Titular da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo. E-mail: renatof@cnpt.embrapa.br

⁽⁵⁾ Pesquisador da Embrapa Trigo. E-mail: tomm@cnpt.embrapa.br

SUMMARY: LIVESTOCK-CROP INTEGRATION EFFECTS ON PHYSICAL ATTRIBUTES OF A SOIL UNDER NO-TILL

Soil physical characteristics were evaluated of a typical dystrophic Red Latosol (Typic Haplorthox) located in Passo Fundo, State of Rio Grande do Sul, Brazil, after ten years (1993 to 2003) under mixed production systems. The effects of production systems integrating grain production with winter annual and perennial forages under no-tillage were assessed. Five mixed cropping systems were evaluated: I) wheat/soybean, white oat/soybean, and common vetch/corn; II) wheat/soybean, white oat/soybean, and annual forages (black oat + common vetch)/corn; III) perennial cool season forages (fescue + white clover + red clover + birdsfoot trefoil); and IV) perennial warm season forages (bahiagrass + black oat + rye grass + white clover + red clover + birdsfoot trefoil). System V) alfalfa as hay crop was established in an adjacent area in 1994. Half of the areas under the systems III, IV, and V returned to system I after the summer of 1996 (southern hemisphere). The crops, both summer and winter, were grown under no-till. The treatments were arranged in a randomized complete block design, with four replications. Soil core samples were also collected in a subtropical forest fragment adjacent to the experimental area. The variations in soil bulk density, total porosity, microporosity and macroporosity due to grain production systems with forages were not severe enough to cause soil degradation. The soil bulk density in the production systems with perennial forages was lower and total porosity and macroporosity, in the 0–2 cm layer, higher than in the production systems of grain or of grain with annual forages.

Index terms: crop rotation, ley farming, soil bulk density, total porosity.

INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul, há cerca de dez milhões de hectares ocupados com pastagens naturais, que, se manejados sob preparo convencional de solo, apresentam limitações edáficas para exploração de culturas anuais no processo de transição (Da Ros et al., 1997). Com o advento do sistema plantio direto, parte dessa área vem sendo convertida em culturas anuais (Oliveira et al., 2000).

As mobilizações de solo com o intuito de condicioná-lo ao estabelecimento de culturas, para integração lavoura-pecuária, desencadeiam reações integradas e em série nos processos biológicos, químicos e físicos (Sumner, 1992), que promovem alterações na estrutura da camada arável, tais como aumento na resistência à penetração e na densidade do solo, redução na macroporosidade, diminuição na taxa de infiltração e alterações morfológicas em raízes de plantas. A compactação de solo em sistema plantio direto tem sido observada na camada de 15 a 20 cm de profundidade, e não a partir da superfície do solo (Da Ros et al., 1997; Santos & Tomm, 1999; Albuquerque et al., 2001; Spera et al., 2007). Essa circunstância indica que a compactação é remanescente de mobilizações de solo por aração e gradagem praticadas antes da adoção do sistema plantio direto. Assim, esses efeitos não devem ser esperados em lavouras anuais manejadas sob sistema plantio direto em áreas anteriormente ocupadas com pastagem natural (Albuquerque et al., 1995).

O processo de transformação estrutural do solo é condicionado, em parte, pela atividade biológica, que

promove a mineralização da matéria orgânica estável do solo e é responsável pela estabilidade dos macroagregados, e, em parte, pela calagem, que apresenta ação dispersante de agregados (Jucksch, 1987). Esse conjunto de reações culmina com a dispersão do solo em microagregados e, ou, em partículas unitárias. Como consequência, há eluviação dos minerais de argila dispersos e rearranjo errático dessas partículas, o que altera a matriz sólida original mediante obstrução de poros e elevação da densidade de solo. De modo paralelo a essa série de reações, ocorrem também forças mecânicas oriundas do tráfego de máquinas agrícolas, que favorecem a aproximação de microagregados e, ou, de partículas unitárias dispersas, elevando a densidade do solo pela concentração de sólidos por unidade de volume (Anjos et al., 1994; Oliveira et al., 2000). Camadas compactadas promovem alterações na qualidade do solo, circunstância que pode interferir na produtividade das culturas (Albuquerque et al., 2001).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de sistemas de produção de grãos e de pastagens anuais de inverno e de pastagens perenes sob sistema plantio direto, após dez anos de cultivo, sobre as características físicas do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em campo experimental da Embrapa Trigo, situado no município de Passo Fundo, RS, (longitude 28 ° 15 ' S, latitude 52 ° 24 ' W e altitude 684 m), durante o período de

1993 a 2003, em Latossolo Vermelho distrófico típico de textura muito argilosa e de relevo suave ondulado. Os teores médios de argila, silte e areia na superfície são respectivamente 720, 130 e 150 g kg⁻¹. As culturas componentes dos sistemas de produção que precederam o experimento foram soja no verão e cevada ou trigo no inverno.

Três anos antes da instalação do experimento, foi efetuada aplicação de calcário dolomítico, com base no método SMP (pH 6,0). Em abril de 1993, procedeu-se à sua instalação com as culturas de inverno, cuja adubação foi efetuada conforme resultado de análise de solo e observando-se as recomendações para adubação no Rio Grande do Sul, da Comissão de Fertilidade do Solo (CFSRS/SC, 1989). Em setembro de 1999, as parcelas semeadas com alfafa (sistema V), que já haviam sido corrigidas em março de 1994 com 10 t ha⁻¹, foram novamente corrigidas com 6,0 t ha⁻¹ de calcário (PRNT 100 %), para elevar o pH para 6,5, aplicada metade antes da aração (arado de discos) e metade antecedendo a gradagem (grade de discos).

Os tratamentos consistiram em cinco sistemas de produção integrando culturas de grãos: aveia-branca (*Avena sativa* L.), milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* Merrill) e trigo (*Triticum aestivum* L.); forrageiras anuais de inverno, aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.), azevém (*Lolium multiflorum* L.) e ervilhaca (*Vicia sativa* L.); e forrageiras perenes, alfafa (*Medicago sativa* L.), cornichão (*Lotus corniculatus* L.), festuca (*Festuca arundinacea* Schred.), pensacola (*Paspalum notatum* Flugge), trevo-branco (*Trifolium repens* L.) e trevo-vermelho (*Trifolium pratense* L.), assim definidos: sistema I: trigo/soja, aveia-branca/soja e ervilhaca/milho; sistema II: trigo/soja, aveia-branca/soja e forrageiras anuais (aveia-preta + ervilhaca)/milho; sistema III: forrageiras perenes da estação fria (festuca + trevo-branco + trevo-vermelho + cornichão); sistema IV: forrageiras perenes da estação quente (pensacola + aveia-preta + azevém + trevo-branco + trevo-vermelho + cornichão); e sistema V: alfafa para feno, acrescentada como tratamento adicional, com repetição em áreas contíguas ao experimento. Antes da instalação dessas parcelas, em meados de 1999, foram efetuadas arações seguidas de gradagens para incorporação de calcário.

A partir do verão de 1996 até o inverno de 2000, metade das parcelas sob sistemas III, IV e V foi convertida em sistema I, retornando então aos respectivos sistemas originais. Um fragmento de floresta subtropical com araucárias, adjacente ao experimento, perpendicular a todos os blocos, também foi amostrado, porém sem repetição, apenas com o intuito de referenciar a condição estrutural original do solo. Todas as espécies, tanto de inverno como de verão, foram estabelecidas sob plantio direto. As forrageiras anuais de inverno e perenes foram pastejadas por bovinos mestiços de raças européias, duas e cinco vezes por ano, com carga animal equivalente a 10 a 15 UA ha⁻¹, por 12 h em cada pastejo.

No final da safra 2002/2003, foram coletadas amostras indeformadas de solo, duas por parcela, nas profundidades 0–2 e 10–15 cm, destinadas às análises físicas de solo. Na análise de densidade de solo e da porosidade total, foi usado o método do anel volumétrico. A microporosidade foi considerada o conteúdo volumétrico de água, equilibrada em mesa de tensão a 6 kPa, e a macroporosidade calculada por diferença entre a porosidade total e a microporosidade, de acordo com métodos descritos em Embrapa (Embrapa, 1997).

O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso, com quatro repetições. A área de cada parcela foi de 400 m². Os diversos sistemas de produção, integrando forrageiras anuais de inverno e forrageiras perenes com produção de grãos, foram comparados para cada atributo físico de solo estudado numa determinada profundidade de amostragem. As profundidades de amostragem de solo foram comparadas dentro de um mesmo sistema de produção. Todas as comparações foram realizadas por meio de contrastes de interesse não ortogonais de um conjunto de t-1 contrastes com um grau de liberdade, conforme Steel & Torrie (1980), para permitir que se enfatize o efeito ano (Cady, 1991). A significância dos contrastes foi dada pelo teste F, levando-se em conta o desdobramento dos graus de liberdade de tratamento. As médias de rendimento para as culturas de aveia-branca e trigo (inverno) e soja (verão) foram comparadas pelo teste F e os valores de rendimentos das culturas de aveia-branca, trigo e soja foram correlacionados com os valores de atributos físicos de solo mediante análise de correlação de Pearson (SAS, 2003).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alterações nos atributos físicos de solo

Os valores médios de densidade de solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade (Quadro 1) em todos os sistemas apresentaram melhorias do ponto de vista agronômico, em relação aos valores verificados dois anos antes, quando o experimento já contava com oito anos de duração (Spera et al., 2004). É possível que nesta fase de desenvolvimento do sistema plantio direto já estivesse ocorrendo marcante reestruturação de solo, conforme constatado por Costa et al. (2003), que observaram redução na compactação do solo após alguns anos de manejo sob sistema plantio direto, em consequência do aumento do nível de matéria orgânica na camada superficial. Assim, a utilização do sistema plantio direto em vários cultivos pode diminuir a densidade, devido ao acúmulo de resíduos vegetais na superfície, o que favorece a reestruturação do solo. De acordo com Marcolan & Anghinoni (2006), o uso do solo no sistema plantio direto por quatro anos após o revolvimento foi suficiente para o retorno da

Quadro 1. Densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade nas camadas de solo de 0–2 cm e 10–15 cm de profundidade, em cinco sistemas de manejo de solo e em floresta subtropical

| Atributo físico | Densidade | | Porosidade total | | Microporosidade | | Macroporosidade | |
|-------------------|---------------------|----------|------------------|----------|--------------------------------|----------|-----------------|----------|
| | 0–2 cm | 10–15 cm | 0–2 cm | 10–15 cm | 0–2 cm | 10–15 cm | 0–2 cm | 10–15 cm |
| Camada do solo | kg dm ⁻³ | | | | m ³ m ⁻³ | | | |
| Sistema de manejo | | | | | | | | |
| I | 1,31 | 1,41 | 0,524 | 0,440 | 0,429 | 0,375 | 0,095 | 0,065 |
| II | 1,25 | 1,45 | 0,540 | 0,410 | 0,405 | 0,355 | 0,129 | 0,053 |
| III | 1,12 | 1,37 | 0,583 | 0,442 | 0,414 | 0,371 | 0,168 | 0,078 |
| IV | 1,08 | 1,40 | 0,576 | 0,430 | 0,388 | 0,355 | 0,188 | 0,068 |
| V | 1,17 | 1,28 | 0,578 | 0,483 | 0,445 | 0,413 | 0,134 | 0,070 |
| Floresta | 0,92 | 1,18 | 0,589 | 0,471 | 0,392 | 0,399 | 0,197 | 0,071 |
| CV (%) | 10,8 | 6,9 | 6,8 | 6,7 | 9,3 | 8,3 | 35,7 | 29,5 |

Sistema I: trigo/soja, aveia-branca/soja e ervilhaca/milho; sistema II: trigo/soja, aveia-branca/soja e forrageiras anuais/milho; sistema III: forrageiras perenes da estação fria; sistema IV: forrageiras perenes da estação quente; e sistema V: alfafa para feno.

densidade do solo, de porosidade total, de microporosidade e da macroporosidade à condição original, uma vez que eles não se diferenciaram do sistema plantio direto de oito e 12 anos.

O sistema I destinou-se exclusivamente à produção de grãos (trigo/soja, aveia-branca/soja e ervilhaca/milho), desde 1993, e não apresentou diferença nos atributos físicos quando comparado com o sistema II (trigo/soja, aveia-branca/soja e pastagem de aveia + ervilhaca/milho), que consiste de pastagens anuais e lavoura de produção de grãos. Provavelmente, a cultura de milho produzindo significativa soma de biomassa seca deixada na superfície, nos dois sistemas, foi um dos causadores de menor densidade no solo entre eles. Deve ser levado em conta que o sistema II foi pastejado duas vezes durante cada inverno em todo esse período. Considerando-se que a densidade de solo tem sido um dos atributos mais usados na avaliação do estado estrutural do solo (Bertol et al., 1998; Andreola et al., 2000; Albuquerque et al., 2001; Spera et al., 2004, 2006), e comparando as densidades encontradas nos quatro primeiros sistemas estudados, pode-se constatar que a compactação de solo da camada superficial não foi severa, uma vez que os valores observados mantiveram-se abaixo de um valor considerado como limitante para os latossolos argilosos do Rio Grande do Sul, que, de acordo com Klein & Câmara (2007), situa-se em torno de 1,40 kg dm⁻³, valor este para os solos da região, nos quais o intervalo hídrico ótimo, isto é a faixa de umidade e aeração do solo não limitante é crítica, para resistência à penetração entre 2 e 3 MPa. Albuquerque et al. (1995), trabalhando com sistemas de produção de grãos para trigo, observaram que o sistema (a) trigo/soja propiciou maior densidade de solo e menor porosidade total na camada 1,0–8,6 cm que os sistemas (b) trigo/soja, aveia-preta + ervilhaca/milho e aveia-preta/soja e (c) aveia-preta/soja, aveia-preta/soja e trigo/soja.

O sistema V foi submetido ao revolvimento de solo em 1999 e apresentou pouca alteração nos valores dos atributos físicos do solo, em comparação aos resultados obtidos dois anos antes. Resultados que permitiram conclusões semelhantes para densidade de solo foram obtidos por Albuquerque et al. (2001) e por Bertol et al. (2004), que estudaram sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas em Latossolo Vermelho do Rio Grande do Sul, envolvendo culturas produtoras de grãos e pastagens. De acordo com Bertol et al. (2004), o efeito do sistema de cultivo (rotação de culturas ou sistemas de produção de grãos) está sendo mais lento do que o efeito de sistemas de manejo de solo em modificar a densidade do solo, em relação ao campo nativo. Portanto, para que tal efeito se manifeste, é provável que seja necessário realizar o experimento por período mais longo.

De acordo com Bertol et al. (2000), maior compactação é observada a partir dos 10 cm de profundidade em manejo mediante preparo convencional de solo, em contraste com a compactação relativamente uniforme em toda a profundidade estudada no plantio direto. Esse processo pode ser atribuído ao tráfego de máquinas (Anjos et al., 1994) e ao pisoteio por animais (Albuquerque et al., 2001). Derpsch et al. (1986), Albuquerque et al. (2001) e Bertol et al. (2004) observaram que, em plantio direto, a densidade de solo é maior na camada superficial e decresce nas maiores profundidades, e que a porosidade total comporta-se de modo inverso, visto que são atributos dependentes entre si.

Nos sistemas estudados, houve diminuição dos macroporos e microporos na continuidade do plantio direto nas camadas 0–2 e 10–15 cm (Quadros 1 e 2), provavelmente em decorrência do pisoteio animal. Segundo Bertol et al. (2000), os menores volumes de macroporos e porosidade total, com consequente aumento no volume de microporos na superfície do

solo, no plantio direto, podem ser devidos à pressão exercida no solo pelo manejo efetuado durante os cultivos, bem como a consolidação natural do solo em função da ausência de preparo nesse sistema de manejo. No trabalho de Bertol et al. (2000), houve aumento da densidade do solo nas camadas 0–2,5 e 2,5–5 cm. Em virtude disso, pode ocorrer redução da taxa de infiltração de água no solo. Isso indica que, em plantio direto, pode haver perda de água por erosão hídrica, quando submetido à chuva de grande volume, principalmente se o solo já estiver úmido e, ou, se a cobertura do solo não for suficiente para controlar o escoamento, podendo apresentar, também, perdas de solo, conforme constatado por Schink et al. (2000). Da Ros et al. (1997), estudando sistemas de manejo de solo em Latossolo Vermelho distrófico típico, durante cinco anos, observaram, em solos sob preparo convencional com aração e gradagem, em comparação ao plantio direto, maior porosidade total em duas camadas: 0–7 e 7–14 cm. Anjos et al. (1994), estudando diferentes sistemas de manejo de solo e floresta, não encontraram diferenças entre os tratamentos para porosidade total na camada 0–20 cm. No estudo realizado por Silva et al. (2000), o pisoteio animal teve pequeno efeito sobre a densidade do solo, o que pode ser atribuído à manutenção de resíduo vegetal na superfície do solo, em torno de 1,0 t ha⁻¹ de biomassa seca, que proporcionou razoável cobertura do solo, rápido rebrote e crescimento da pastagem. Em virtude disso, o impacto da pata do animal não se dava diretamente sobre o solo, mas sobre o resíduo vegetal.

Em floresta natural (F) e sob plantio direto (sistemas I, II, III e IV), quando o solo permanece coberto por material vegetal todo o período, seria esperado que houvesse intensa atividade biológica, resultando em produtos que contribuem para formação e estabilização de agregados. A diminuição da porosidade total

da camada superficial em relação à camada mais abaixo (Quadros 1 e 3) indica degradação da estrutura do solo, inclusive pela formação de “pé-de-arado” (ou pé-de-grade). No sistema V, o “pé-de-arado” pode ter sido desfeito pela aração efetuada até a profundidade de 20 cm. No geral, nos solos cultivados da Região Sul do Brasil, o “pé-de-arado”, tem sido observado em camadas de 10 a 15 cm de profundidade (Denardin & Kochhann, 1993).

A maior microporosidade encontrada no sistema V (Quadros 1 e 2) pode ser resultado das alterações estruturais promovidas pelo revolvimento de solo que desestabilizaram a agregação, porém Albuquerque et al. (1995), Andreola et al. (2000) e Costa et al. (2003), trabalhando com sistemas de manejo de solo que incluíam rotação de culturas, não encontraram diferenças entre tratamentos para microporosidade nas camadas superficiais e subsuperficiais.

O aumento dos macroporos em sistema plantio direto torna-o mais importante do ponto de vista de manejo para conservação de solo. Andreola et al. (2000), trabalhando com cobertura de solo, afirmam que o aumento de volume nos macroporos melhorou a aeração e a infiltração de água no solo. Albuquerque et al. (1995), estudando sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas, não encontraram diferenças entre os valores de macroporosidade dos tratamentos estudados.

Maiores valores de macroporosidade nas camadas superficiais (Quadros 1 e 3) refletem influência da matéria orgânica na estruturação de solos (Dexter, 1991), e isto pode explicar por que a densidade de solo foi menor na camada superficial do que na mais profunda, enquanto, para porosidade total e microporosidade, ocorreu o inverso.

Neste estudo, a maior densidade do solo e a menor porosidade total verificadas na camada 10–15 cm

Quadro 2. Significâncias dos contrastes entre sistemas de manejo de solo em cada um dos atributos físicos de solo avaliados

| Atributo físico | Densidade | | Porosidade total | | Microporosidade | | Macroporosidade | |
|-------------------------------|-----------|----------|------------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | 0–2 cm | 10–15 cm | 0–2 cm | 10–15 cm | 0–2 cm | 10–15 cm | 0–2 cm | 10–15 cm |
| Sistema de rotação/integração | | | | | | | | |
| I vs II | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| I vs III | ** | ns | ** | ns | ns | ns | ** | ns |
| I vs IV | ** | ns | ** | ns | * | ns | ** | ns |
| I vs V | * | ** | ** | ** | ns | * | ns | ns |
| II vs III | * | ns | * | * | ns | ns | ns | * |
| II vs IV | ** | ns | * | ns | ns | ns | * | ns |
| II vs V | ns | ** | * | ** | * | * | ns | ns |
| III vs IV | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| III vs V | ns | ns | ns | ** | ns | ** | ns | ns |
| IV vs V | ns | * | ns | ** | ** | ** | * | ns |

Sistema I: trigo/soja, aveia-branca/soja e ervilhaca/milho; sistema II: trigo/soja, aveia-branca/soja e forrageiras anuais/milho; sistema III: forrageiras perenes da estação fria; sistema IV: forrageiras perenes da estação quente; e sistema V: alfafa para feno.
ns, *, **: não-significativo e significativo a 5 e 1 %.

Quadro 3. Significâncias dos contrastes entre as camadas de solo de 0-2 e 10-15 cm de profundidade, de sistemas de manejo de solo e floresta em cada um dos atributos físicos de solo avaliados

| Atributo físico | Densidade | Porosidade total | Microporosidade | Macroporosidade |
|-------------------|-----------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Sistema de manejo | | Entre camadas de solo | | |
| Sistema I | * | ** | ** | ** |
| Sistema II | ** | ** | ** | ** |
| Sistema III | ** | ** | ns | ** |
| Sistema IV | ** | ** | ns | ** |
| Sistema V | ns | ** | ns | ** |

Sistema I: trigo/soja, aveia-branca/soja e ervilhaca/milho; sistema II: trigo/soja, aveia-branca/soja e forrageiras anuais/milho; sistema III: forrageiras perenes da estação fria; sistema IV: forrageiras perenes da estação quente; e sistema V: alfafa para feno. ns, *, **: não-significativo e significativo a 5 e 1 %.

(Quadros 1 e 3) podem ser atribuídas à camada compactada residual resultante de preparo de solo anteriores com aração e gradagem. O tipo de manejo do solo tem sido considerado como promotor de compactação do solo mais importante do que o trânsito de máquinas (tratores com semeadoras e pulverizadores e colhedoras automatizadas) ou do pisoteio animal (Bertol et al., 2004; Marcolan & Anghinoni, 2006).

Relação entre efeitos de sistemas de produção e atributos físicos do solo

Os atributos físicos do solo avaliados são interdependentes, e os efeitos do manejo de solo sobre um deles podem afetar os demais. No sistema IV (trigo/soja, ervilhaca/milho e aveia-branca/soja após forrageiras perenes de estação quente), foram constatadas menor valor de densidade do solo e microporosidade, maior valor de macroporosidade, e ainda maior variação de densidade do solo da camada 0-2 para a camada 10-15 cm (Quadro 1). Para esses atributos, os valores desse sistema de produção mantiveram-se relativamente próximos dos valores obtidos na floresta subtropical porém, nessa avaliação, a floresta subtropical não foi comparada estatisticamente por não haver repetição na amostragem.

Na comparação dos resultados deste trabalho e do realizado dois anos antes (Spera et al., 2004), constatou-se aumento do valor da macroporosidade em todos os sistemas estudados. De acordo com Andreola et al. (2000), uma das mais prováveis razões para o aumento de macroporos em relação aos microporos, na camada 10-15 cm, é o efeito das raízes da cultura do milho. Segundo Dexter (1991), as raízes do milho, ao penetrarem, comprimem as partículas do solo, e com a morte e decomposição formam os bioporos, que contribuem para o aumento da macroporosidade.

No período de 1993 a 1996, as semeaduras, os tratamentos fitossanitários e de colheita, e os tratamentos sem inclusão de pastagens foram mais intensos que nos tratamentos com forrageiras tanto anuais de inverno e perenes de estação fria ou de

estação quente. Porém, isso não repercutiu negativamente no rendimento de grãos de milho nos sistemas estudados.

Nos tratamentos II, III e IV (de 1996 a 2000), o pisoteio pelo gado durante oito anos não contínuos aparentemente não alterou os atributos físicos de solo o suficiente para promover prejuízos ao rendimento de grãos das culturas, porém os animais foram retirados quando o solo estava muito úmido. Trein et al. (1991) observaram severa compactação do solo na camada 0-7,5 cm após pastejo por 40 h, com 200 cabeças por hectare. Neste estudo, a cada ano, o pastejo ocorreu por duas ou três vezes no inverno, e três ou quatro vezes no verão, com duração de no máximo dois dias em cada pastejo e com dez a quinze animais. Depois da retirada dos animais da área, foi feito um intervalo de 40-60 dias, de modo a permitir rebrota das forrageiras de inverno antes do estabelecimento das culturas de verão. Oliveira et al. (2000) e Macedo (2001) relataram que, em sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, o rendimento de grãos das culturas anuais após pastagem tendia a ser maior que na ausência de rotação com pastagem.

Efeito da biomassa de forrageiras nos atributos físicos

Nos sistemas III e IV, as pastagens perenes de estação fria e de estação quente forneceram cerca de 7.500 kg ha⁻¹ de biomassa seca, dos quais, após consumo pelo gado, restaram como resíduos, no final da estação, 1.350 kg ha⁻¹. No sistema II, o cultivo, no inverno, de aveia-preta consorciada com ervilhaca forneceu aproximadamente 5.400 kg ha⁻¹ de biomassa seca (Santos et al., 2002).

As quantidades de biomassa seca produzidas pelas pastagens anuais e perenes, de verão e de inverno, poderiam ser consideradas elevadas, caso fossem incorporadas ao solo e não consumidas pelo gado ou cortadas para silagem ou feno. Bertol et al. (1998) observaram, em solo sob pastagens, degradação nos

atributos físicos relacionados à porosidade do solo. Assim, os sistemas de produção que integram grãos e pastagens apresentam reduzido potencial de fornecimento de palha, insuficiente para promover recuperação da estrutura do solo. Algum efeito melhorador da estrutura do solo seria advindo somente da diversificação de sistemas radiculares, típicos de pastagens consorciadas, que poderiam propiciar aumento da porosidade do solo (Hamblin, 1985).

O uso intenso do solo em sistemas de produção dirigidos para alta produção ou uso intensivo do solo promove elevada retirada de nutrientes e, ou, decomposição de palha. Os nutrientes podem ser repostos mediante adubações, enquanto a palha, que é a principal fonte de matéria orgânica, componente responsável pela estruturação física do solo, não tem sido adequadamente repostos nesses sistemas.

Efeitos no rendimento de culturas

Os rendimentos das culturas de inverno (na safra 2002) e de verão (safra 2002/2003) foram comparados dentro de cada tratamento. As médias de rendimento para as culturas de aveia-branca e trigo (inverno) e soja (verão) não foram diferentes entre os sistemas, em cada cultura (Quadro 4). Porém, como houve variações de rendimentos entre as parcelas com coeficientes de variação elevados, cujos valores de rendimentos oscilaram de 302 a 1.281 kg ha⁻¹ para aveia-branca, 1.633 a 3.136 kg ha⁻¹ para trigo, e 2.223 a 3.421 kg ha⁻¹ para soja, foram calculadas correlações entre os valores de atributos físicos de solo e dos rendimentos de culturas em cada parcela. Não se verificou correlação significativa entre os valores de densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade e os de rendimentos de culturas de aveia-branca, trigo e soja (dados não apresentados).

Quadro 4. Rendimentos de grãos de aveia-branca, trigo (safra 2002) e soja (safra 2002/2003) em sistemas de manejo de solo

| Sistema | kg ha ⁻¹ | | |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Aveia-branca | Trigo | Soja |
| Sistema I | 686 ^{ns} | 2.040 ^{ns} | 2.928 ^{ns} |
| Sistema II | 979 | 2.216 | 2.867 |
| Sistema III | 813 | 2.524 | 2.950 |
| Sistema IV | 933 | 2.639 | 2.867 |
| Sistema V | 805 | 2.510 | 3.022 |
| Média geral | 843 | 2.386 | 2.927 |
| CV (%) | 32,6 | 20,7 | 9,4 |

Sistema I: trigo/soja, aveia-branca/soja e ervilhaca/milho; sistema II: trigo/soja, aveia-branca/soja e forrageiras anuais/milho; sistema III: forrageiras perenes da estação fria; sistema IV: forrageiras perenes da estação quente; e sistema V: alfafa para feno.

CONCLUSÕES

1. A densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade sofreram alterações devidas aos sistemas de produção de grãos com pastagens a que o solo foi submetido, entretanto essas alterações não atingiram níveis que indiquem degradação do solo.

2. Os sistemas que incluíram pastagens perenes apresentaram menor densidade do solo e maior porosidade total e macroporosidade na camada 0–2 cm que os sistemas compostos por lavoura anual ou lavouras e pastagens anuais.

3. O pisoteio pelo gado alterou os atributos físicos de solo, mas não em intensidade suficiente para degradar o solo.

4. As diferenças nos valores dos atributos físicos do solo não foram correlacionadas às diferenças nos rendimentos das culturas avaliadas.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: Efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. R. Bras. Ci. Solo, 19:15-119, 1995.
- ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L. & ENDER M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. R. Bras. Ci. Solo, 25:717-723, 2001.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L.M. & OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e ou mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. R. Bras. Ci. Solo, 24:857-865, 2000.
- ANJOS, J.T.; UBERTI, A.A.A.; VIZZOTTO, V.J.; LEITE, G.B. & KRIEGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 18:139-145, 1994.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JR., W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. R. Bras. Ci. Solo, 28:155-163, 2004.
- BERTOL, I.; GOMES, K.E.; DENARDIN, R.B.N.; MACHADO, L.A.Z. & MARASCHIN, G.E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. Pesq. Agropec. Bras., 33:779-786, 1998.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M. REIS, E.F. & DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo tipo de manejo do solo. Ci. Rural, 30:91-95, 2000.
- CADY, F.B. Experimental design and data management of rotation experiments. Agron. J., 83:50-56, 1991.

- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - CFSRS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 2.ed. Passo Fundo, SBCS - Núcleo Regional Sul/ Embrapa/CNPT, 1989. 128p.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FOUTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:527-535, 2003.
- DA ROS, C.O.; SECCO, D.; FIORIN, J.E.; PETRERE, C.; CADORE, M.A. & PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: Efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:241-247, 1997.
- DENARDIN, J.E. & KOCHHANN, R.A. Requisitos para a implementação e a manutenção do sistema plantio direto. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. Plantio direto no Brasil. Passo Fundo, 1993. p.19-27.
- DERPSCH, R.; SIDIRAS, N. & ROTH, C.H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.*, 8:253-263, 1986.
- DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. *Soil Till. Res.*, 20:87-100, 1991.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Brasília, 1997. 212p. (Embrapa Solos. Documentos, 1)
- HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake. *Adv. Agron.*, 38:95-158, 1985.
- JUCKSCH, I. Calagem e dispersão de argila em amostra de um latossolo vermelho-escuro. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1987. 37p. (Tese de Mestrado).
- KLEIN, V.A. & CAMARA, R.K. Rendimento de soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:221-227, 2007.
- MACEDO, M.C.M. Integração lavoura-pecuária: alternativa para sustentabilidade da produção animal. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 18., Piracicaba, 2001. Anais. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001. p.257-283.
- MARCOLAN, A.L. & ANGHINONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. *Ci. Rural*, 30:259-265, 1999.
- OLIVEIRA, E.; MEDEIROS, G.B.; MARUN, F.; OLIVEIRA, J.C.; SÁ, J.P.G.; COLOSSI F^o, A.; KRANZ, W.M.; SILVA JR., N.F.; ABRAHÃO, J.J.S.; GUERINI, V.L. & MARTIN, G.L. Recuperação de pastagens no noroeste do Paraná: bases para o plantio direto e integração lavoura e pecuária. Londrina, IAPAR, 2000. 96p. (IAPAR. Informe de Pesquisa, 134)
- SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; BAIER, A.C. & TOMM, G.O. Principais ferrageiras para integração lavoura-pecuária, sob plantio direto, nas regiões Planalto e Missões do Rio Grande do Sul. Passo Fundo, Embrapa Trigo, 2002. 142p.
- SANTOS, H.P. & TOMM, G.O. Rotação de culturas para trigo, após quatro anos: Efeitos na fertilidade do solo em plantio direto. *Ci. Rural*, 29:259-265, 1999.
- SAS INSTITUTE. SAS system for Microsoft Windows version 8.2. Cary, Statistical Analysis Systems, 2003.
- SCHINCK, J.; BERTOL, J.; BATISTELA, O. & BALBINOT, JR., A.A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmido aluminico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo de solo: I perdas de solo e água. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:427-436, 2000.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:191-199, 2000.
- SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; TOMM, G.O. & KOCHHANN, R.A. Efeito de sistemas de manejo em atributos físicos do solo. *Pesq. Agropec. Gaúcha*, 13:61-68, 2007.
- SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S. & TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solos e na produtividade. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:533-542, 2004.
- SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S. & TOMM, G.O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. *Ci. Rural*, 36:1193-1200, 2006.
- STEEL, G.D. & TORRIE, J.H. Principles and procedures of statistics: A biometrical approach. 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1980. 633p.
- SUMNER, M.E. Uso atual do gesso no mundo em solos ácidos. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., Uberaba, 1992. Anais. Uberaba, IBRAFOS, 1992. p.7-40
- TREIN, C.R.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:105-111, 1991.