

SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO: ALTERAÇÕES NA ESTRUTURA DO SOLO E RENDIMENTO DAS CULTURAS⁽¹⁾

Michael Mazurana⁽²⁾, Renato Levien⁽³⁾, Jônatan Müller⁽²⁾ & Osmar Conte⁽⁴⁾

RESUMO

A introdução e intensificação no uso do sistema de semeadura direta no Brasil nas últimas décadas desenharam um novo cenário na agricultura brasileira, aumentando a preocupação com as características físicas dos solos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a implicação que diferentes sistemas de preparo de solo impõem sobre algumas características físicas de um Argissolo Vermelho inicialmente sob uso com campo natural. Cinco métodos de preparo de solo foram ensaiados: semeadura direta (SD), escarificação (E), semeadura direta com escarificação a cada dois anos (SDE2), escarificação com escarificador munido de rolo destorroador (ER) e escarificação seguida de gradagem (EG). Foram avaliados: densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, resistência mecânica do solo à penetração, infiltração de água no solo e rendimento das culturas. Os valores de densidade do solo, resistência mecânica do solo à penetração e microporosidade aumentaram em detrimento da diminuição da macroporosidade. A densidade do solo foi menor nos sistemas de preparo com maior grau de mobilização do solo, sendo os maiores valores observados para o sistema SD e os menores para o sistema EG. A taxa de infiltração de água apresentou-se maior no sistema ER, seguido pelos sistemas EG, SD e SDE2, ao passo que o rendimento das culturas foi maior nos sistemas com menor mobilização de solo.

Termos de indexação: densidade do solo, resistência mecânica à penetração, porosidade do solo.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 12 de maio de 2010 e aprovado em 11 de maio de 2011.

⁽²⁾ Mestrando do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). E-mails: michael.mazurana@gmail.com; jonatanmuller@hotmail.com

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, UFRGS. E-mail: renatole@ufrgs.br

⁽⁴⁾ Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS. E-mail: agriconte@gmail.com

SUMMARY: SOIL TILLAGE SYSTEMS: CHANGES IN SOIL STRUCTURE AND CROP RESPONSE

The introduction and intensification of no-tillage systems in Brazilian agriculture in recent decades have created a new scenario, increasing concerns about soil physical properties. The objective of this study was to assess the effects of different tillage systems on some physical properties of an Ultisol previously under native grassland. Five tillage methods were tested: no-tillage (NT), chiseling (Ch), no-tillage with chiseling every two years (NTCh2), chiseling using an equipment with a clod-breaking roller (ChR) and chiseling followed by disking (ChD). The bulk density, macroporosity, microporosity and total porosity, mechanical resistance to penetration, water infiltration into the soil and crop yields were evaluated. The values of soil bulk density, mechanical resistance to penetration and microporosity increased as macroporosity decreased. Soil bulk density was lower in tillage systems with higher levels of tillage/soil mobilization; highest values were observed in NT and the lowest in the ChD system. The water infiltration rate was highest in the ChR system, followed by the systems ChD, NT and NTCh2, while crop yields were higher in systems with less soil mobilization.

Index terms: soil bulk density, soil resistance to penetration, soil porosity.

INTRODUÇÃO

Com o advento do sistema de semeadura direta, muitos solos em uso com agricultura, com produção de grãos e, ou, com integração à pecuária passaram a apresentar problemas de compactação. Associado a isso está o não revolvimento do solo (com exceção da linha de semeadura), problemas oriundos dos processos de preparo de solo com máquinas de elevada massa e em condições de umidade do solo acima do ponto de friabilidade no momento das operações agrícolas, o que acaba por ultrapassar a capacidade de suporte de carga do solo, ocorrendo deformações plásticas. Assim, para crescimento e desenvolvimento, as plantas requerem quantidades adequadas de nutrientes, luz, O₂, CO₂, temperatura e água. Muitos desses fatores (exceto luz), mesmo ocorrendo no ambiente em quantidade desejada, podem não estar suprindo as plantas em decorrência de problemas de ordem física.

Métodos como preparo reduzido do solo, semeadura direta e escarificação esporádica em áreas de lavoura vêm sendo adotados em substituição aos preparos convencionais, no intuito de mitigar problemas de degradação do solo. Segundo Beutler et al. (2001) e Tavares Filho et al. (2001), o sistema de plantio direto tem provocado a compactação superficial do solo, que está associada ao tráfego de máquinas agrícolas e ao não revolvimento do solo. Em consequência, há aumento da resistência mecânica do solo e redução da macroporosidade (Streck et al., 2004), do tamanho e número de poros, bem como da difusão de gases (Taylor & Brar, 1991) e da disponibilidade de nutrientes e água, reduzindo, conseqüentemente, o crescimento e o desenvolvimento radicular das culturas (Tavares Filho et al., 2001; Silva et al., 2002).

Essas e outras alterações na estrutura do solo em razão das atividades agrícolas passaram a ser alvo de pesquisa por diversos autores (Barcelos et al., 1999; Camara & Klein, 2005a; Costa et al., 2006). Em

culturas anuais e até a profundidade de 0,20 m, Cardoso et al. (2006) identificaram maior redução da macroporosidade e porosidade total e aumento da resistência mecânica do solo à penetração, em vista da disposição do sistema radicular nessa camada. Em decorrência disso, aumentam as probabilidades de redução na absorção de nutrientes pelas raízes, o que pode alterar o bom desenvolvimento e rendimento das culturas.

Efeitos negativos oriundos da compactação do solo sobre o rendimento das culturas em condições de uso com lavoura são difíceis de serem mensurados, devido à dificuldade de isolar o fator compactação do solo. Forsythe & Huertas (1979) apontam que valores de resistência mecânica do solo à penetração acima de 2,1 MPa, com umidade na capacidade de campo (52 %), provocaram redução na produção de grãos, matéria seca e raízes na cultura do feijoeiro em solo de textura franco-argilosa. Secco (2003), estudando o efeito de estados de compactação em dois Latossolos Vermelhos (distrófico e distroférico), ambos sob sistema de plantio direto, verificou redução na produtividade de trigo de 18,35 e 34,05 %, para valores de resistência mecânica do solo à penetração de 2,65 e 3,26 MPa, respectivamente; na cultura do milho, somente no Latossolo Vermelho distroférico houve diminuição de 24,3 % para o mesmo nível de compactação, não sendo observada diferença significativa quando se cultivou soja nesses dois solos.

A prática da escarificação do solo tem sido indicada e empregada para solos que apresentam suspeitas de compactação, gerando benefícios imediatos com a ruptura das camadas adensadas ou compactadas (Botta et al., 2006), como redução da densidade, aumento da rugosidade superficial, condutividade hidráulica e taxa de infiltração de água no solo (Camara & Klein, 2005b). Esses autores acrescentam ainda a vantagem da diminuição das perdas de solo, visto que há incorporação considerável de resíduos à

sua superfície. Isso facilita a penetração das raízes e a infiltração de água também para as camadas mais profundas do solo. Da Silva et al. (2004), estudando atributos físicos de um Argissolo Vermelho sob diferentes preparos no armazenamento de água, mostraram que o revolvimento do solo não influenciou a porosidade e a distribuição no tamanho de poros, mas aumentou a condutividade hidráulica saturada em superfície.

Levien et al. (1990) apontam que o tipo e a época das operações de preparo do solo influenciam a taxa de infiltração, a velocidade da enxurrada, a capacidade de armazenamento de água e, por consequência, os riscos de erosão.

No entanto, a duração dos efeitos da escarificação não é bem conhecida. Camara & Klein (2005b) encontraram efeito remanescente do processo de escarificação no quesito rugosidade superficial transcorridos 12 meses, indicando que, durante esse período, o microrrelevo poderia estar incrementando a infiltração de água no solo. Mahl et al. (2004), avaliando força de tração, potência na barra de tração, consumo de combustível e capacidade de campo efetiva, não encontraram mais evidências do efeito da escarificação após 18 meses em um Nitossolo Vermelho.

Diante desses resultados, verifica-se a necessidade de mais estudos, em campo, quanto ao nível e, ou, estado de compactação que alteram o rendimento das culturas, bem como determinar a época e as práticas para realizar intervenções mecânicas na tentativa de mitigar os efeitos da compactação. As hipóteses concebidas neste estudo são as de que diferentes sistemas de preparo de solo apresentam efeitos diretos na sua porosidade e densidade e de que estes se refletem no desenvolvimento das plantas, no rendimento de grãos e na matéria seca das culturas.

O objetivo deste trabalho foi mensurar quantitativamente os efeitos ocasionados por diferentes sistemas de preparo de solo sobre a densidade do solo, a porosidade, a resistência mecânica do solo à penetração e a taxa de infiltração de água no solo de um Argissolo Vermelho-Amarelo textura média inicialmente sob condição de campo natural quando da implantação dos sistemas de preparo, há 10 anos, assim como o comportamento do rendimento de grãos e da matéria seca das culturas implantadas ao longo do período de condução do experimento.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Estação Experimental Agrônoma da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (latitude de 30° 05' S e longitude de 51° 40' W), sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura franco-argiloarenosa (54, 21 e 25 % de areia, silte e argila, respectivamente) (Lemos

& Santos, 1984). O clima do local se enquadra na classificação climática de Köppen como Cfa.

O delineamento foi inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos utilizados foram os métodos de preparo de solo, semeadura direta (SD), semeadura direta com escarificação a cada dois anos (SDE2), escarificação com escarificador munido de rolo destorroador (ER) e escarificação seguida de gradagem (EG). O sistema de preparo SDE2 substituiu, a partir da safra 2004/05, o sistema de preparo escarificação (E) implantado em 2000. O experimento foi implantado sobre a condição de campo natural no ano de 2000.

Parcelas (6 x 25 m) vêm sendo trabalhadas, procurando manter um sistema de sucessão de culturas tanto no período de inverno quanto no de verão, com espécies de poáceas, leguminosas e brássicas. Foram cultivados aveia-preta (*Avena strigosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), ervilhaca (*Vicia sativa*), trigo (*Triticum aestivum* L.), azevém (*Lolium multiflorum*), canola (*Brassica napus* L. var. Oleífera Moench), milho (*Zea mays*) e soja (*Glycine max* (L.)). Assim, a sequência de cultivos foi aveia-preta/soja, aveia-preta/milho, aveia-preta/soja, nabo forrageiro + aveia-preta/milho, trigo/soja, aveia-preta + ervilhaca/milho, aveia-preta + azevém/soja e canola/soja.

Nos preparos de solo, semeadura, tratos culturais e colheita da área foram utilizadas sempre as mesmas máquinas. Para tracionar os equipamentos, foi utilizado um trator John Deere modelo 5600, 4 x 2 com TDA, com potência no motor de 53 kW, massa total de 3.835 kg (1.530 kg sobre eixo dianteiro e 2.305 kg sobre eixo traseiro), com pneus traseiros 18.4-30 R1 e dianteiros 12.4-24 R1 com pressão de inflação de 95 e 110 kPa, respectivamente. No preparo do solo foram usados um escarificador marca JAN, modelo Jumbo-Matic, de arrasto, composto por cinco hastes espaçadas de 0,5 m, com ponteiras estreitas (0,075 m de largura) com ângulo de ataque da ponteira em relação ao solo de 18°, equipado com rolo destorroador e discos para corte da palha; e uma grade niveladora de 36 discos, em tandem. Na aplicação de produtos e tratos culturais foi utilizado um pulverizador de barras tratorizado e montado com capacidade para 400 L de calda e largura útil de 9,5 m, o qual é operado lateralmente às parcelas. Para semeadura das culturas foi utilizada uma semeadora-adubadora múltipla (precisão e fluxo contínuo), marca Vence Tudo, modelo AS 11500, montada em sistema hidráulico de três pontos do trator, com massa de 810 e 1.110 kg quando configurada para semeadura das culturas de inverno e verão, respectivamente.

Para trilha das amostras foi utilizada uma trilhadora estacionária e, para colheita das culturas nas parcelas, uma colheitadeira autopropelida de grãos, marca SLC-John Deere, modelo 1165, com massa em ordem de marcha de 7.200 kg (sendo 2.250 kg no eixo traseiro e 4.950 kg no eixo dianteiro), com pneus

dianteiros 18.4-30 R1 e traseiros 10.5/80-18 com pressão de inflação de 138 e 200 kPa, respectivamente.

A correção e a fertilização do solo das parcelas para cada cultivo foram baseadas no Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CFSRS/SC, 2004). Para quantificação da produção em cada tratamento, foram colhidas quatro linhas de 20 m de comprimento para as culturas de verão, totalizando 36 m² por parcela. Para as culturas hibernais foram realizadas duas amostragens por parcela em área de 0,24 m². Tanto as amostras de grãos quanto as de matéria seca da parte aérea das culturas foram secas em estufa a 105 °C. Para a massa de grãos o tempo de secagem foi de 72 h, sendo eles posteriormente pesados, possibilitando assim a correção do peso para a umidade de referência de 13 %, ao passo que, para a matéria seca da parte aérea, a massa foi sendo pesada periodicamente até atingir peso constante.

Para determinação da infiltração de água no solo, foi utilizado o método dos cilindros concêntricos equipados com boia, descrito por Cauduro & Durfman (1986).

A determinação da densidade do solo (DS), macro e microporosidade foi realizada com cilindros de aço inoxidável de 0,05 m de altura e 0,084 m de diâmetro, com amostras coletadas nas camadas de 0,03–0,12, 0,12–0,20 e 0,20–0,30 m em cada tratamento para cada repetição, seguindo método descrito pela Embrapa (1997). No entanto, no ano de 2006, apenas os tratamentos SD e EG foram avaliados.

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi determinada em maio de 2008, com um penetrômetro dotado de sistema eletrônico de medição e aquisição dos dados de força aplicado à respectiva profundidade no solo. As características construtivas do equipamento estão de acordo com a norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004). Foram realizadas 30 avaliações transversalmente em cada parcela, até a profundidade de 0,4 m. A umidade do solo foi determinada por meio da coleta de solo com trado do tipo caneca até a profundidade de 0,4 m, o qual foi seco em estufa a 105 °C até atingir peso constante (Embrapa, 1997), para posterior análise dos dados de RP.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A DS apresentou variação entre os sistemas de manejo do solo no período de avaliação (Quadro 1). Valores maiores de DS foram observados nos sistemas de preparo de solo onde o revolvimento é menor, restrito apenas à linha de semeadura, como a SD. Nas avaliações efetuadas em 2001 a DS no manejo SD apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) dos demais sistemas, enquanto em 2006 a DS no tratamento SD diferiu significativamente do tratamento EG. Além disso, no ano de 2001 o sistema E não diferiu do sistema ER, e sim dos demais.

Quadro 1. Densidade do solo na camada de 0,03–0,12 m, em três épocas de avaliação, nos sistemas de preparo conservacionistas de solo

Tratamento	2001	2006	2008
	Mg m ⁻³		
SD	1,63 a	1,57 a	1,49 a
E ⁽¹⁾ /SDE2 ⁽²⁾	1,46 b	----	1,45 ab
ER	1,48 bc	----	1,30 bc
EG	1,42 c	1,39 b	1,15 c

⁽¹⁾ Escarificado até 2003. ⁽²⁾ Substituiu o tratamento E a partir de 2004/2005. Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si a 5 % pelo teste de Tukey. SD: Semeadura direta; E: Escarificação; SDE2: Semeadura direta com escarificação a cada 2 anos; ER: Escarificação com escarificador munido de rolo destorroador; EG: Escarificação seguida de gradagem.

Comportamento similar foi observado no ano de 2008, quando o sistema SD apresentou diferença significativa em relação aos sistemas ER e EG e o sistema SDE2 diferiu estatisticamente apenas do sistema EG. Esses dados corroboram trabalhos de Tormena et al. (1998) e Rojas & Jong van Lier (1999), os quais também observaram maior densidade superficial do solo sob SD em relação ao preparo convencional – fato atribuído à compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas.

Analisando a DS no período de 2001 a 2008, observa-se tendência de redução nos valores absolutos, que variaram de 1 a 20 % entre os sistemas de preparo, sendo a menor e a maior variação absoluta observadas nos sistemas de preparo E/SDE2 e EG, respectivamente. Essa redução pode estar associada à atuação dos diferentes sistemas radiculares das culturas que exploram as camadas do solo. Elas, quando senescem, deixam no solo espaços ocupados pelas raízes, contribuindo para o aumento da porosidade total e, conseqüentemente, reduzindo a DS. Além disso, a palha e as raízes das plantas serão transformadas em matéria orgânica, que, associada à fração mineral do solo, atua na estruturação do solo e conseqüente redução da DS. No entanto, Bayer et al. (2000) afirmam que solos com textura franco-argiloarenosa conferem menor poder de ligação dos componentes orgânicos com os constituintes coloidais minerais, resultando em menor proteção física, facilitando assim sua decomposição microbiana.

A distribuição de tamanho de poros não apresentou diferença significativa em profundidade para a macroporosidade no sistema SD (Quadro 2). Esses dados concordam com os de Camara & Klein (2005b), que, estudando o método de escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água em um Latossolo Vermelho, apontam não haver diferença na porosidade total e na macroporosidade em profundidade entre os manejos plantio direto e

Quadro 2. Macroporosidade, microporosidade, porosidade total (P_t) e densidade do solo (DS) em diferentes profundidades e sistemas de preparo de solo avaliados em 2008

Tratamento	Macroporosidade	Microporosidade	P_t	DS
0,03–0,12 m				
SD	0,16 Aa	0,27 Aa	0,43 Aa	1,49 Aa
SDE2	0,18 Aab	0,25 Bab	0,43 Aa	1,45 Cab
ER	0,25 Abc	0,23 Bbc	0,48 Aa	1,30 Cbc
EG	0,28 Ac	0,21 Cc	0,49 Aa	1,15 Cc
CV (%)	26,0	10,7	7,00	11,5
0,12–0,20 m				
SD	0,10 Aa	0,28 Aa	0,38 Aa	1,66 Aa
SDE2	0,12 Ba	0,27 ABab	0,39 Aa	1,58 Bab
ER	0,20 Bb	0,25 ABbc	0,45 Ab	1,47 Bbc
EG	0,19 Bb	0,23 Bc	0,42 Aab	1,38 Bc
CV (%)	32,7	8,61	7,71	8,06
0,20–0,30 m				
SD	0,09 Aa	0,29 Aa	0,38 Aa	1,63 Aa
SDE2	0,08 Ba	0,30 Aa	0,39 Aa	1,70 Aa
ER	0,11 Ca	0,27 Aa	0,38 Ba	1,60 Aa
EG	0,11 Ca	0,28 Aa	0,39 Ba	1,62 Aa
CV (%)	15,4	4,53	1,50	2,66

Letras maiúsculas iguais na coluna comparam diferentes profundidades dentro de cada sistema de preparo, e letras minúsculas na coluna comparam os diferentes sistemas dentro de uma mesma profundidade. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). SD: Semeadura direta; SDE2: Semeadura direta com escarificação a cada 2 anos; ER: Escarificação com escarificador munido de rolo destorroador; EG: Escarificação seguida de gradagem; CV: Coeficiente de variação.

plântio direto escarificado, com exceção da profundidade de 2,5 cm. A macroporosidade no sistema SDE2 diferiu significativamente entre a camada de 0,03–0,12 m e as demais, enquanto para os sistemas ER e EG houve diferença significativa na macroporosidade em todas as camadas avaliadas.

Quando analisadas as camadas de 0,03–0,12 e 0,12–0,20 m, o sistema SD não diferiu significativamente do sistema SDE2, e sim dos demais. Este diferiu significativamente dos sistemas EG e ER nas camadas de 0,03–0,12 e 0,12–0,20 m, respectivamente (Quadro 2).

Observa-se que não houve diferença significativa entre as variáveis analisadas para os diferentes sistemas de preparo na camada de 0,20–0,30 m (Quadro 2). A macroporosidade apresentou valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0,20–0,30 m para os sistemas de preparo SD e SDE2 (Quadro 2), podendo esse valor ser considerado como limite crítico restritivo para o crescimento e a produtividade das culturas (Glinski & Liepic, 1990), os quais apresentam valores-limite de macroporosidade para a cultura do trigo desde $0,021$ até $0,145 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A microporosidade não mostrou diferença significativa para o sistema de preparo SD entre as diferentes camadas. No entanto, observou-se elevação dela à medida que a macroporosidade apresentou tendência contrária (Quadro 2). Os sistemas SDE2 e ER diferiram significativamente entre as camadas de

0,03–0,12 e 0,20–0,30 m, ao passo que o sistema EG apresentou diferença significativa entre os valores de microporosidade em todas as camadas.

Em cada camada analisada, os sistemas de preparo apresentaram diferenças quanto à microporosidade; o sistema SD não diferiu significativamente do sistema SDE2 em nenhuma das camadas analisadas. Para as camadas de 0,03–0,12 e 0,12–0,20 m, os sistemas de manejo SD e SDE2 diferiram do sistema EG, e o sistema SD diferiu também do sistema ER (Quadro 2). Já para os manejos ER e EG, a porosidade total para a camada de 0,20–0,30 m foi inferior em relação às demais.

A porosidade total (P_t) não mostrou diferença significativa entre as camadas para os sistemas de preparo SD e SDE2 (Quadro 2). No entanto, a camada de 0,20–0,30 m diferiu das demais para os sistemas de preparo ER e EG.

Não houve diferença significativa para a porosidade total entre sistemas de preparo para as camadas de 0,03–0,12 e 0,20–0,30 m (Quadro 2), e sim para a camada de 0,12–0,20 m. Nesta, o sistema de preparo ER diferiu dos sistemas SD e SDE2, apresentando o maior valor de porosidade total. Mesmo não diferindo significativamente, o incremento da porosidade total nos sistemas ER e EG deveu-se ao aumento no volume de macroporos, uma vez que o de microporos foi diminuído pela escarificação, o que corrobora os resultados obtidos por Hamilton-Manns et al. (2002).

Em relação à DS, observou-se aumento à medida que aumenta a profundidade do solo, não havendo diferença significativa entre camadas para o solo sob sistema SD, enquanto que os demais sistemas de preparo apresentaram diferenças (Quadro 2).

Considerando as variações entre os manejos, dentro de cada camada, observa-se não haver diferenças na DS entre os sistemas de manejo SD e SDE2 em nenhuma das camadas, confirmando os dados obtidos por Vieira & Klein (2007) e contrapondo-se aos de Camara & Klein (2005a), que analisaram essa característica em sistemas de plantio direto e plantio direto escarificado sobre um Latossolo Vermelho. Entretanto, o sistema SD diferiu significativamente dos sistemas ER e EG para as camadas de 0,03–0,12 e 0,12–0,20 m. Da mesma forma, o sistema SDE2 diferiu significativamente do sistema de manejo EG, para as camadas de 0,03–0,12 e 0,12–0,20 m (Quadro 2), contrapondo-se aos resultados obtidos por Da Silva et al. (2006). Já para a camada de 0,20–0,30 m não foram observadas diferenças significativas na DS em nenhum dos sistemas de preparo de solo.

A RP avaliada em maio de 2008, após oito anos de início do experimento, apresentou aumento em profundidade independentemente do sistema de preparo de solo (Figura 1). Esse comportamento deve-se ao fato de que, dos fatores físicos que alteram a RP (densidade do solo, textura, umidade), o primeiro apresentou aumento no mesmo sentido da RP (Figura 2). A textura característica desse tipo de solo aponta para maior presença de partículas de quartzo, e o conteúdo de água no solo no momento da avaliação não diferiu entre manejos ($0,16 \pm 0,02 \text{ kg kg}^{-1}$), tampouco em profundidade, pois apresentou o mesmo valor e variação observados entre os manejos.

Os sistemas de preparo SD e SDE2 apresentaram valores de RP próximos até 0,1 m de profundidade e, a partir desta, valores distintos (Figura 1). O

comportamento observado no sistema SDE2 provavelmente deve-se a três fatores principais: menor capacidade de suporte de carga logo após o processo de escarificação, comparativamente ao sistema SD, devido ao aumento da macroporosidade; histórico de tensões sofridas desde a última escarificação; e adensamento natural devido à ausência de revolvimento. Hamza & Anderson (2005) afirmam que a escarificação torna o solo mais vulnerável à deformação pelo tráfego de máquinas agrícolas, de tal forma que a recompactação tem sido observada após um (Chan et al., 2006) ou dois tráfegos (Veiga et al., 2007), corroborando os fatores apontados.

Em profundidades maiores do que 0,10 m o sistema SD apresentou os maiores valores de RP, sendo observados valores de 2,3 MPa entre a camada 0,13 a 0,20 m, decrescendo e mantendo-se constante até 0,30 m e sofrendo nova elevação abaixo disso (Figura 1). O comportamento observado na camada de 0,13 a 0,20 m pode estar associado ao acúmulo de tensões transmitidas pelos rodados do trator e da colhedora. Esses resultados corroboram com os obtidos por Silva (2003) e Genro Junior et al. (2004), que atribuíram o maior grau de compactação observado a 0,10–0,15 m de profundidade em áreas sob semeadura direta à concentração das tensões aplicadas pelos rodados das máquinas nessa camada.

Da mesma forma, Hillel (1982) assinala que as tensões aplicadas pelos rodados tendem a se concentrar a uma profundidade equivalente a 1/3 a 1/5 da largura dos pneus. Como os pneus do trator e da colhedora utilizados neste trabalho apresentavam 0,47 m de largura, a maior compactação deveria ser observada na camada de 0,09–0,15 m, o que acabou se confirmando.

As variações da RP observada abaixo de 0,20 m são atribuídas ao aumento da densidade do solo (Quadro 2). Esse aumento deve-se ao arranjo das partículas que compõem a matriz do solo, visto que, segundo Mapfumo & Chanasyk (1998), a diminuição da RP com incremento da umidade é mais pronunciada para solos argilosos, comparativamente aos arenosos.

A magnitude dos valores de RP nos sistemas ER e EG foi menor que a observada nos demais sistemas entre as camadas de 0,10 a 0,30 m, porém apresentou comportamento similar nesta camada para esses sistemas (Figura 1). Na profundidade de 0,10 m a RP foi de 0,75 MPa, valor 100 % menor que o observado nos sistemas SD e SDE2 na mesma profundidade. Resultado semelhante foi observado na profundidade de 0,20 m, onde a RP foi de 1,1 MPa para os sistemas ER e EG, valor 90 e 54 %, respectivamente, menor que o observado nos sistemas SD e SDE2. Abaixo de 0,2 m há tendência de os valores de RP nos sistemas ER e EG se igualarem aos dos sistemas SD e SDE2, identificados com maior clareza a partir de 0,32 m (Figura 1).

O efeito da escarificação anual teve reflexos na redução não somente na RP, mas também na



Figura 1. Resistência mecânica do solo à penetração nos diferentes sistemas de preparo do solo. SD: Semeadura direta; SDE2: Semeadura direta com escarificação a cada 2 anos; ER: Escarificação com escarificador munido de rolo destorroador; EG: Escarificação seguida de gradagem.

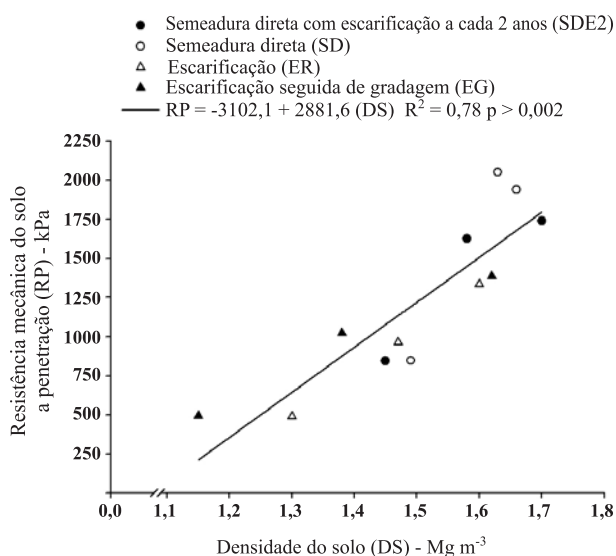


Figura 2. Relação entre resistência mecânica do solo à penetração (RP) e a densidade do solo (DS) até a profundidade de 0,30 m, considerando todos os manejos do solo.

densidade e distribuição no tamanho de poros (Quadro 2). Esses resultados corroboram com os obtidos por Botta et al. (2006) e Veiga et al. (2007), que mostram diminuição nos valores de RP pela escarificação, redução na densidade (Hamilton-Manns et al., 2002) e distribuição do tamanho de poros, com aumento na proporção de macroporos (Hamilton-Manns et al., 2002) e redução na proporção de microporos.

A taxa inicial de infiltração de água no solo foi alterada pelo manejo, enquanto a taxa final aparenta ser regida pelas características físico-hídricas do solo (Figura 3). O sistema ER apresentou uma taxa inicial de infiltração de água 1,1, igual e 2 vezes e, taxa final de, aproximadamente, 1,4, 1,4 e 1,7 vezes maior que as dos sistemas EG, SD e SDE2, respectivamente. Os sistemas SD, SDE2, ER e EG apresentaram taxa final de infiltração de 26,5; 22,2; 38,5; e 27,8 mm h⁻¹, respectivamente. Essa maior taxa de infiltração observada nos sistemas que sofrem escarificação anual está associada à maior macroporosidade (Quadro 2), menor densidade e umidade inicial do solo, bem como a caminhos preferenciais produzidos pelas hastes do escarificador no solo. Esses dados corroboram os de Camara & Klein (2005b), que obtiveram taxa final de infiltração de água em Latossolo sob sistema de plantio direto de 26,49 mm h⁻¹, e os de Castro et al. (1986), que, avaliando o efeito de diferentes sistemas de preparo de solo na infiltração de água, obtiveram valor de 32,5 mm h⁻¹ em sistema escarificado.

O sistema SDE2 apresentou a menor taxa inicial e final de infiltração de água no solo, comparado aos demais sistemas, contrapondo-se aos resultados obtidos por Camara & Klein (2005b) e Vieira & Klein (2007). A explicação para esse comportamento é de que a

perturbação no solo causada pelo processo de escarificação bianual afeta negativamente a geometria do sistema poroso, tornando-o mais sinuoso, não permitindo sua estabilidade, dificultando assim a movimentação da água no solo. Além disso, a umidade inicial do solo nesses sistemas foi maior que nos sistemas ER e EG – fator que rege o movimento inicial da água em solos não saturados. Por outro lado, o sistema SD apresenta sistema poroso mais rígido e estável, o que permite movimento livre da água no perfil. Assim, a infiltração de água nos sistemas ER e EG seria beneficiada pelo processo mecânico de mobilização do solo pela haste do escarificador e não por aumentar a macroporosidade intra-agregados, e sim entre agregados.

Fatores associados a propriedades físicas, manejo do solo e método utilizado (Levien et al., 2000; Bertol et al., 2001) alteram a magnitude da taxa de infiltração de água no solo. Segundo esses autores, a taxa de infiltração de água no solo determinada pelo método dos cilindros concêntricos superestima em cerca de 5 a 10 vezes, em relação à que ocorre sob chuva, em decorrência da carga hidráulica propiciada pela lâmina de água sobre o solo e da não formação de selamento superficial.

A produção das plantas submetidas aos diferentes sistemas de preparo é apresentada no quadro 3. O período de avaliação foi dividido em duas partes: antes da substituição do sistema E pelo SDE2 (2001/2005) e após a substituição (2005/2009). Não houve diferença significativa para nenhuma das variáveis analisadas em nenhum sistema de preparo, creditando-se esse fenômeno ao elevado coeficiente de variação ocasionado por tratar-se de diferentes culturas submetidas a regimes hídricos distintos (períodos de estiagem que levaram à queda de produção).

Entretanto, mesmo não havendo diferença significativa, observou-se rendimento 6,8 e 16 % maior

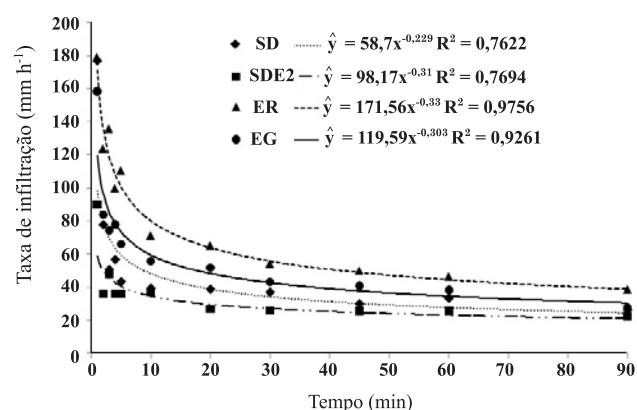


Figura 3. Taxa de infiltração de água nos diferentes sistemas de preparo de solo. SD: Semeadura direta; SDE2: Semeadura direta com escarificação a cada 2 anos; ER: Escarificação com escarificador munido de rolo destorroador; EG: Escarificação seguida de gradagem.

no sistema SD em relação aos demais para o período de 2001/05, ao passo que para o período de 2005/09 o maior rendimento foi observado no sistema SDE2, o qual apresentou rendimento 6,3, 20,7 e 28 % maior que o dos sistemas SD, ER e EG, respectivamente (Quadro 3).

Comportamento similar foi observado para produção de matéria seca da parte aérea. Esse maior rendimento pode estar associado a maior capacidade de armazenamento d'água (maior microporosidade – Quadro 2) e disponibilidade hídrica em períodos de estiagem, ciclagem de nutrientes entre cultivos, menor perda de carbono por oxidação e, conseqüentemente, maior teor de matéria orgânica, aumentando a capacidade de troca de cátions do solo sob esse sistema de preparo. O processo de escarificação anual não promoveu incremento de rendimento pelas culturas (Quadro 3), o que corrobora trabalhos envolvendo culturas como soja, feijão e trigo (Levien, 1999; Hamilton-Manns et al., 2002; Klein & Camara, 2007). A hipótese para esse comportamento relaciona-se ao baixo grau de compactação observado na área escarificada (Figura 1), visto que se procurou manter uniformes os níveis de nutrientes. Em condições de solos soltos e muito porosos, Veen et al. (1992) apontaram que em lavoura de milho o contato solo-raiz é prejudicado, dificultando assim a absorção de água e nutrientes. Debiassi et al. (2008), estudando a capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno, verificaram que a quantidade de biomassa produzida nos tratamentos onde foi realizada escarificação foi aproximadamente 25 e 33 % inferior à semeadura direta, respectivamente, para a aveia-preta e o nabo forrageiro.

Quadro 3. Rendimento médio de grãos e matéria seca da parte aérea acumulados nos diferentes sistemas de preparo de solo no período de 2001 a 2009

Safr	Rendimento				CV
	SD	SDE 2	ER	EG	
	Mg ha ⁻¹				%
2001/05	11,7 ^{ns}	—	10,9	9,80	27,8
CV (%)	34,0	—	20,0	26,0	—
2005/09	10,4 ^{ns}	11,1	8,80	8,00	64,0
CV (%)	52,2	66,1	58,1	79,4	—
	Matéria seca (parte aérea)				
2001/05	43,6 ^{ns}	—	41,0	41,3	38,2
CV (%)	35,1	—	42,0	37,6	—
2005/09	22,5 ^{ns}	23,2	20,0	17,3	44,3
CV (%)	34,7	47,2	40,5	55,2	—

ns: não significativo a $p < 0,05$ pelo teste de Tukey. SD: Semeadura direta; SDE2: Semeadura direta com escarificação a cada 2 anos; ER: Escarificação com escarificador munido de rolo destorroador; EG: Escarificação seguida de gradagem.

CONCLUSÕES

1. Os sistemas de preparo do solo interferiram na densidade, na porosidade, na resistência mecânica à penetração e na infiltração de água no solo.
2. A densidade do solo reduziu ao longo dos anos à medida que aumentou a sua mobilização, apresentando aumento em profundidade.
3. A resistência mecânica do solo à penetração aumentou com a profundidade, mas reduziu com o aumento da mobilização do solo.
4. A infiltração de água no solo foi alterada pelas práticas de manejo do solo e por características físicas; os sistemas que sofrem escarificação anual mostraram maior infiltração, ao passo que o processo de escarificação bianual apresentou a menor infiltração de água.
5. Mesmo não havendo diferença significativa no rendimento de grãos e matéria seca da parte aérea das plantas, observou-se tendência de maiores valores dessas variáveis nos manejos com menor revolvimento de solo, os quais demandam menor gasto energético ao sistema produtivo.

LITERATURA CITADA

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE. Soil cone penetrometer – ASAE S313.3. Saint Joseph, 2004.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & MARTIN-NETO, L. Efeitos de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO². R. Bras. Ci. Solo, 24:599-607, 2000.
- BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A. & DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. R. Bras. Ci. Solo, 23:35-43, 1999.
- BERTOL, I.; BEUTLERM F.F.; LEITE, D. & BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo de solo. Sci. Agric., 58:555-560, 2001.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C. & PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. R. Bras. Ci. Solo, 25:167-177, 2001.
- BOTTA, G.F.; JORAJURIA, D.; BALBUENA, R.; RESSIA, M.; FERRERO, C.; ROSSATO, H. & TOURN, M. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. Soil Tillage Res., 1:164-172, 2006.
- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. C. Rural, 35:813-819, 2005a.

- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. R. Bras. Ci. Solo, 29:789-796, 2005b.
- CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F. & GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. Pesq. Agropec. Bras., 41:493-501, 2006.
- CASTRO, O.M.; LOMBARDI NETO, F.; VIEIRA, S.R. & DECHEN, S.C.F. Sistemas convencionais e reduzidos de preparo do solo e as perdas por erosão. R. Bras. Ci. Solo, 10:167-171, 1986.
- CAUDURO, F.A & DORFMAN, R. Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem. Porto Alegre, PRONI: IPH-UFRGS, 1986. 216p.
- CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R.C.; DEAR, B.S. & PEOPLES, M.B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. Soil Tillage Res., 89:13-21, 2006.
- COSTA, E.A.; GOEDERT, W.J. & DE SOUSA, D.M.G. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. Pesq. Agropec. Bras., 41:1185-1191, 2006.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - CFSRS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo/Embrapa, 2004. 331p.
- DA SILVA, M.A.S.; MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. C. Rural, 35:544-552, 2004.
- DA SILVA, M.A.S.; MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; ROSA, J.D.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 30:329-337, 2006.
- DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CONTE, O. & MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. R. Bras. Ci. Solo, 32:2629-2637, 2008. (Numero Especial)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Manual de métodos e análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- FORSYTHE, W.M. & HUERTAS, A. Effect of soil penetration resistance on the growth and yield of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) 27-R variety. Turrialba, 29:293-298, 1979.
- GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. R. Bras. Ci. Solo, 28:477-484, 2004.
- GLINSKI, J. & LIEPIC, J. Soil physical conditions and plant roots. Florida: CRC, 1990. 250p.
- HAMILTON-MANNS, M.; ROSS, C.W.; HORNE, D.J. & BAKER, C.J. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degraded soil. Soil Tillage Res., 68:109-119, 2002.
- HAMZA, M.A. & ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil Tillage Res., 82:121-145, 2005.
- HILLEL, D. Introduction to soil physics. New York, Academic Press, 1982. 364p.
- KLEIN, V.A. & CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. R. Bras. Ci. Solo, 31:221-227, 2007.
- LEMOES, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 2.ed. Campinas, SBCE/SNLCS, 1984. 45p.
- LEVIEN, R.; COGO, N.P. & ROCKENBACH, C.A. Erosão na cultura do milho em diferentes sistemas de cultivo anterior e métodos de preparo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 14:73-80, 1990.
- LEVIEN, R.; JONG VAN LIER, Q. & ALVES, A.G.C. Influence of surface crust on water infiltration rates measured by a rotating-boom rainfall simulator and a double-cylinder device. R. Bras. Ci. Solo, 24:479-486, 2000.
- LEVIEN, R. Condições de cobertura e método de manejo do solo para a implantação da cultura do milho (*Zea mays* L.). Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 1999. 305f. (Tese de Doutorado)
- MAHL, D.; GAMERO, C.A.; BENEZ, S.H.; FURLANI, C.E.A. & SILVA, A.R.B. Demanda energética e eficiência da distribuição de sementes de milho sob variação de velocidade e condição de solo. Eng. Agríc., 24:150-157, 2004.
- MAPFUMO, E. & CHANASYK, D.S. Guidelines for safety trafficking and cultivation, and resistance – density - moisture relations of three disturbed soils from Alberta. Soil Tillage Res., 46:193-202, 1998.
- ROJAS, C.A.L. & JONG VAN LIER, Q. Alterações físicas e hídricas de um podzólico em função de sistemas de preparo. Pesq. Agropec. Gaúcha, 5:105-115, 1999.
- SECCO, D. Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 108p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, V.R. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 171p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. & IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L. & FOLONI, J.S.S. Qualidade física do solo: Métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal, Funep, 2002. p.1-18.

- STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ci. Rural*, 34:755-760, 2004.
- TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F. & FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:725-730, 2001.
- TAYLOR, H.M. & BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. *Soil Tillage Res.*, 19:111-119, 1991.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998.
- VEEN, B.W.; van NOORDWIJD, M.; DE WILLIGEN, P.; BOONE, F.R. & KOOISTRA, M.J. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. *Plant Soil*, 139:131-138, 1992.
- VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil Tillage Res.*, 92:104-113, 2007.
- VIEIRA, M.L. & KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1271-1280, 2007.