

Cultivares de soja sob plantio direto em Latossolo Vermelho compactado

Neyde Fabíola Balarezo Giarola^{1*}, Elizeu Luiz Brachtvogel², Silvano Fontaniva², Regina Alves Pereira² e Samuel Luiz Fioreze²

¹Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias e de Tecnologia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, 84030-900, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. ²Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: neydef@uepg.br

RESUMO. O processo de compactação pode modificar os atributos físicos do solo a ponto de limitar o potencial genético de desenvolvimento de culturas agrícolas ou de cultivares mais sensíveis. O objetivo deste trabalho foi avaliar, em Latossolo Vermelho Eutroférico típico, a resposta de parâmetros de produção de cultivares de soja (*Glycine max* L. Merrill) e atributos físicos do solo ao sistema plantio direto em condições de lavoura e com compactação adicional. O estudo foi conduzido na C-Vale Cooperativa Agroindustrial, em Palotina, Estado do Paraná. Foram avaliados dois tratamentos de solo: sistema plantio direto sem compactação adicional (SPD-C0) e sistema plantio direto com compactação adicional (PD-C1), e cinco cultivares de soja: (1) Coodetec 204, (2) Coodetec 215, (3) Monsoy 5942, (4) Embrapa 48 e (5) Spring. Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial 5 X 2. Os atributos de solo avaliados foram: densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade. Nas plantas, foram avaliadas as seguintes variáveis: fitomassa seca, altura de plantas, altura de inserção da primeira vagem, massa de mil grãos e produtividade. Os resultados demonstraram que as variáveis de produção das cultivares de soja não foram influenciadas pelos diferentes níveis de compactação do solo, e as diferenças observadas se deveram às características das próprias cultivares.

Palavras-chave: densidade do solo, porosidade do solo, *Glycine max* L. Merrill, compactação do solo.

ABSTRACT. Soybean cultivars under no-till on a compacted oxisol. The compaction process can promote changes in the physical attributes of soil, to the point of limiting the genetic potential for the development of more sensitive agricultural crops or cultivars. The goal of this study was to evaluate, on a clayed Red Latosol (Oxisol), the response of production parameters of different varieties of soybean (*Glycine max*) and physical attributes of soil under tillage farming, and with additional compression. The study was conducted at C-Valley Agroindustrial Cooperative, in Palotina (Paraná State). Two treatments of soil were evaluated: no-tillage without additional compaction (PD-C0) and no-tillage with additional compaction (PD-C1), and five varieties of soybeans: (1) Coodetec 204, (2) Coodetec 215, (3) Monsoy 5942, (4) Embrapa 48 and (5) Spring. A completely randomized experimental design in a 5 x 2 factorial scheme was adopted. The attributes of soil evaluated were: bulk density, total porosity, macro- and microporosity. In the plants, the following parameters were assessed: harvesting dates, plant height, height of insertion of the first pod, mass of one thousand grains and productivity. The results showed that the parameters for the production of soybean cultivars were not influenced by the different levels of soil compaction, and the differences observed were due to the characteristics of the cultivars themselves.

Key words: bulk density, soil porosity, *Glycine max* L. Merrill, soil compaction.

Introdução

No sistema plantio direto, o processo de compactação é tido como resultado do efeito cumulativo do tráfego de máquinas e da ausência de revolvimento (SILVA et al., 2000; STRECK et al., 2004; SECCO et al., 2004). A ocorrência e a intensidade da compactação dependem da sequência de culturas, do sistema de manejo e da umidade do

solo por ocasião do tráfego (BOIZARD et al., 2002).

Vários estudos demonstram que, em plantio direto, a compactação dos solos ocorre mais próxima da superfície e altera as propriedades físicas (TORMENA et al., 1998a; TAVARES FILHO et al., 2001). A compactação acarreta redução na qualidade física do solo para o crescimento das plantas em virtude das modificações deletérias na disponibilidade de água (TORMENA et al., 1998b),

o que afeta indiretamente a disponibilidade de nutrientes. Nessas situações, também ocorre aumento da resistência do solo à penetração de raízes, redução no volume total de poros e alteração da distribuição do tamanho de poros do solo (KLEIN; LIBARDI, 2002), com conseqüente redução da porosidade abaixo do mínimo necessário para a difusão de O₂ até as raízes (XU et al., 1992). Os solos compactados afetam o crescimento das raízes, com reflexos significativos na produtividade das culturas (BEUTLER; CENTURION, 2003). A baixa aeração induz a ramificação das raízes adventícias superficiais, tornando-as menos eficientes na absorção de água e nutrientes (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

A soja é considerada uma cultura sensível à compactação do solo. Em plantio direto, Johnson et al. (1990) demonstraram que a produção de soja foi 15% inferior ao plantio convencional, em que apenas ocorreu redução na altura de plantas. Ferreras et al. (2001) também observaram rendimento de soja 50% inferior no sistema plantio direto não-mobilizado, em relação àquele em que a escarificação era prática usual. Por outro lado, Secco et al. (2004) não observaram diferenças no rendimento de grãos da soja, quando compararam vários sistemas de cultivo e Queiroz-Voltan et al. (2000) constataram que não houve decréscimo proporcional na produtividade de grãos de soja em solo compactado, mesmo com a redução do crescimento vegetativo.

Estudos sobre o efeito da compactação dos solos sobre a produção da soja concentram-se em diferentes sistemas de manejo e desconsideram as diferenças que apresentam as variedades disponíveis no mercado. O objetivo deste trabalho foi avaliar, em Latossolo Vermelho eutroférico típico, a resposta de parâmetros de produção de diferentes cultivares de soja (*Glycine max* L. Merrill) e atributos físicos do solo ao sistema plantio direto em condições normais de lavoura e com compactação adicional.

Material e métodos

O experimento foi conduzido no campo experimental da C-VALE Cooperativa Agroindustrial, no município de Palotina, Estado do Paraná. O solo utilizado no estudo é produto da decomposição de basaltos da Formação Serra Geral e foi classificado como Latossolo Vermelho

eutroférico típico (EMBRAPA, 2006a), textura muito argilosa (78,81 g kg⁻¹ de areia, 105,40 g kg⁻¹ de silte e 815,79 g kg⁻¹ de argila), em relevo plano (0,01 m m⁻¹ de declividade). Os resultados da análise química do solo, efetuada antes da instalação do experimento (Tabela 1), demonstram o caráter eutrófico do mesmo em superfície e o potencial de fornecimento de macro e micronutrientes, mesmo em pH baixo. O sistema de produção adotado seguiu o padrão regional de produção, sendo realizadas adubações com fertilizantes minerais (NPK), segundo as recomendações técnicas para a cultura da soja (EMBRAPA, 2006b). Em todas as parcelas, realizou-se a adubação com 0,30 mg ha⁻¹ de fertilizante mineral na formulação 02-20-18 de N-P-K.

O modelo experimental utilizado foi o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 5 x 2 (cinco cultivares de soja e dois níveis de compactação de solo), em que cada unidade experimental (parcela) apresentava 18 m² de área total (3,0 x 6,0 m). Os tratamentos de solo estudados foram: sistema plantio direto contínuo sem compactação adicional (PD-C0) e sistema plantio direto com compactação adicional, efeito de quatro passadas sequenciais e sobrepostas do rodado de um trator com massa de 4,6 mg (pressão média sobre o solo em torno de 250 kPa), após irrigação com uma lâmina de água de 63 mm (PD-C1), com o intuito de promover um gradiente de compactação entre as duas áreas cultivadas. Esta metodologia foi adaptada daquela apresentada por Secco et al. (2004) em estudo realizado em campo, em Latossolo Vermelho argiloso do Estado do Rio Grande do Sul.

As cultivares utilizadas no experimento foram: (1) Coodetec 204, (2) Coodetec 215, (3) Monsoy 5942, (4) Embrapa 48 e (5) Spring. A semeadura da soja foi realizada com uma semeadora-adubadora com quatro linhas espaçadas em 0,45 m e o mecanismo de sulcamento do solo para a deposição do adubo e da semente foi o disco, para evitar o revolvimento da cama de semeadura. A semeadura foi realizada em meados de outubro, com 18 sementes por metro linear, as quais apresentavam poder germinativo mínimo de 90% e pureza varietal de 98%. Durante o desenvolvimento da cultura, foram efetuadas irrigações para manutenção da umidade do solo próxima da capacidade de campo.

Tabela 1. Atributos químicos para a camada 0,0-0,10 m do Latossolo Vermelho eutroférico típico.

pH	MO	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	T	S	V	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³			----- cmol _c dm ⁻³ -----					%	----- mg dm ⁻³ -----			
4,90	21,53	27,10	0,86	6,98	1,11	0,00	5,76	14,71	8,95	60,84	6,36	6,14	31,10	264,00

Após 70 dias da aplicação dos tratamentos, foram coletadas, em cada parcela experimental, cinco amostras indeformadas de solo em anéis cilíndricos de aço inox (100 cm³), no centro da camada 0,0-0,10 m de profundidade. Nestas amostras, foram determinadas: a densidade do solo, a porosidade total, a macro e a microporosidade. Para a determinação do teor de água e da densidade do solo, conforme Blake e Hartge (1986), as amostras foram secadas em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$, por 24h. A porosidade total foi calculada como sendo o teor de água do solo saturado. A quantificação dos valores de macroporosidade (poros $\geq 50 \mu\text{m}$) e microporosidade (poros $< 50 \mu\text{m}$) foi obtida submetendo todas as amostras saturadas ao potencial de -0,006 MPa (DEXTER, 1988), utilizando a mesa de tensão. Macroporos foram estimados como a diferença entre o teor de água do solo saturado e o teor de água do solo após a aplicação do potencial de -0,006 MPa. O volume de microporos foi estimado como sendo o teor de água retido no potencial de -0,006 MPa.

Para a avaliação das variáveis de produção, foram utilizadas todas as plantas das duas linhas centrais de cada parcela. As seguintes variáveis foram determinadas: fitomassa seca, altura de plantas, altura da inserção da primeira vagem, massa de mil grãos e produtividade. A fitomassa seca foi avaliada aos 30 dias após a emergência das plantas. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando significativa, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As comparações entre os tratamentos para a densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade foram realizadas pelo teste *t* para amostras independentes, conforme Hatcher e Stepanski (1997).

Resultados e discussão

Os valores médios da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macro (Ma) e microporosidade (Mi) para os tratamentos de solo são apresentados na Tabela 2. A Ds apresentou um coeficiente de variação similar aos descritos por Tormena et al. (1998b) e Giarola et al. (2007), e a amplitude de variação da Ds coincide com os valores obtidos por Assouline et al. (1997) em solo similar.

A compactação promovida pela passagem do trator na superfície do solo incrementou a média de densidade do solo (Ds), que atingiu valores de até 1,51 mg m⁻³. No estado de compactação PD-C1, como a Ds média foi superior a 1,45 mg m⁻³, este solo pode ser considerado compactado (REINERT et al., 2001). A energia aplicada promoveu o rearranjo das partículas primárias e dos agregados e gerou um arranjo mais compacto (Tabela 2).

Tabela 2. Densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade do Latossolo Vermelho em plantio direto sem compactação adicional (PD-C0) e com compactação adicional (PD-C1).

Estado de Compactação	Média ¹	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	C.V. (%)
Densidade do Solo (mg m ⁻³)					
PD-C0	1,38 a	0,058	1,27	1,48	4,19
PD-C1	1,45 a	0,034	1,40	1,51	2,37
Porosidade Total (dm ³ dm ⁻³)					
PD-C0	0,522 b	0,02136	0,485	0,575	4,52
PD-C1	0,486 b	0,0122	0,457	0,504	2,50
Macroporosidade (dm ³ dm ⁻³)					
PD-C0	0,082 a	0,0248	0,032	0,128	30,43
PD-C1	0,041 b	0,0131	0,025	0,066	2,50
Microporosidade (dm ³ dm ⁻³)					
PD-C0	0,440 a	0,0156	0,420	0,466	3,55
PD-C1	0,445 a	0,0117	0,421	0,463	31,69

¹Valores médios seguidos por letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas (Tukey) entre os tratamentos no mesmo horizonte ($p < 0,05$).

A redução dos teores de matéria orgânica, comum nas áreas cultivadas, pode ter contribuído e interagido com o tráfego para aumentar a densidade do solo. Giarola et al. (2007) já haviam observado redução dos teores de matéria orgânica no mesmo Latossolo Vermelho sob floresta preservada (47,97 g dm⁻³), em relação às áreas cultivadas em sistema plantio direto (21,53 g dm⁻³), e, por sua vez, acréscimo de Ds de 1,07 mg m⁻³ para 1,45 mg m⁻³ na área sob floresta e em cultivo, respectivamente, para a camada 0,0-0,10 m de profundidade.

O incremento da Ds nas áreas cultivadas em plantio direto promoveu redução da porosidade total, basicamente da macroporosidade, atingindo níveis inferiores a 0,10 dm³ dm⁻³ (Tabela 2), considerados limitantes ao crescimento de raízes. Estudos realizados por Beutler et al. (2001), sobre o efeito de sistemas de preparo nos atributos físicos do solo, verificaram, similarmente, que o aumento da Ds promoveu redução da porosidade total e da macroporosidade do solo, sem que ocorresse modificações no volume de microporos. Os poros de menor diâmetro apresentariam maior resistência à deformação em relação aos macroporos, além de maior capacidade de suporte de carga (ANKENY et al., 1990). As modificações seriam mais severas, a ponto de alterarem a microporosidade do solo, na linha de passagem dos tratores (BEUTLER et al., 2003).

Tanto em casa-de-vegetação (ROSOLEM et al., 1994; QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000) como em condições de campo (MERTEN; MIELNICZUK, 1991), a presença de camadas compactadas limita o crescimento de raízes e, conseqüentemente, o rendimento das culturas. Em sistema plantio direto, camadas compactadas pelo efeito do tráfego e pela não-mobilização do solo, em função da ausência de preparo, têm sido observadas, comumente, na camada 0,0-0,10 m de profundidade, o que promove

a concentração da maior parte das raízes das plantas dentro desse limite. Em condições de menor disponibilidade de água, o menor volume de solo explorado pelas plantas limitaria a expressão de todo o potencial genético da soja em termos de produtividade (BEUTLER; CENTURION, 2004).

Para avaliar uma possível resposta das plantas de soja à compactação imposta artificialmente, foram avaliados os componentes de produção de plantas, apresentados na Tabela 3. Os parâmetros altura de inserção da primeira vagem e produtividade não foram afetados pelos diferentes estados de compactação do solo e cultivares avaliadas. O parâmetro altura de planta foi influenciado apenas pelas cultivares, enquanto a massa de mil grãos dependeu das cultivares e do estado de compactação do solo. Para a fitomassa seca, a interação entre os fatores foi significativa ($p < 0,05$) (Tabela 3). Esses resultados corroboram aqueles obtidos por Beutler e Centurion (2003), que observaram que a altura das plantas de soja foi pouco alterada pelos níveis de resistência do solo à penetração estabelecidos em experimento. O maior grau de compactação de um Latossolo sob plantio direto também não influenciou a produtividade da soja em experimento conduzido por Secco et al. (2004).

Os valores médios de fitomassa seca, altura de plantas e massa de mil grãos para as cultivares de soja, nos dois estados de compactação do solo, são apresentados na Tabela 4. As cultivares apresentaram diferenças no sistema PD-C0, destacando-se a cultivar Coodetec 204 com maior média (2,78 g planta⁻¹), superior e diferente estatisticamente da Spring (1,82 g), porém ambas similares às demais cultivares. No sistema PD-C1, as cultivares Coodetec 204 e Spring apresentaram, respectivamente, a menor e a maior produção de fitomassa entre as cultivares analisadas, mas não houve diferença estatística entre as mesmas. Isso pode indicar que algumas cultivares apresentaram crescimento inicial diferenciado nos diferentes estados de compactação do solo.

Tabela 3. Quadrados médios e grau de significância das variáveis de produção avaliadas para as diferentes cultivares de soja, nos dois estados de compactação do solo.

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios				
		Fitomassa ¹	Alt. planta ²	Alt. vagem ³	Massa de mil grãos ⁴	Produtividade ⁵
Estado de compactação	1	0,0009 ^{ns}	92,4500 ^{ns}	4,0500 ^{ns}	240,7486*	505,01246 ^{ns}
Cultivar	4	0,0661 ^{ns}	177,4250*	0,5750 ^{ns}	1060,8066**	421,5408 ^{ns}
Estado de compactação x Cultivar	4	0,2968*	28,3250 ^{ns}	0,6750 ^{ns}	30,2546 ^{ns}	12,07908 ^{ns}
Resíduo	10	0,0733	39,9500	3,5500	37,7167	126,724645
Total	19	0,4372	338,1500	8,8500	1369,5300	1065,3670
Média geral		2,15	66,55	9,15	102,21	56,30
CV (%)		12,58	9,50	20,59	6,01	19,99

¹Fitomassa seca, em gramas planta⁻¹; ²Altura de planta, em centímetros; ³Altura da inserção da primeira vagem, em centímetros; ⁴Massa seca de mil grãos, em gramas; ⁵Produtividade, em sacas por hectare; * significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey; ns: não-significativo.

Tabela 4. Valores médios de fitomassa seca (g), altura de plantas (cm) e massa de mil grãos (g) para as cultivares de soja no Latossolo Vermelho eutroférico sob plantio direto sem compactação adicional (PD-C0) e com compactação adicional (PD-C1).

Cultivares de Soja	Variáveis ¹			
	Fitomassa seca (g planta ⁻¹)*		Alt. plantas (cm)*	Massa de mil grãos (g)**
	PD-C1	PD-C0	-----	-----
COODETEC 204	1,93 aB	2,78 aA	73,75 a	92,65 b
COODETEC 215	2,22 aA	2,14 abA	73,00 a	90,93 b
MONSOY 5942	2,07 aA	2,07 abA	64,50 ab	123,20 a
EMBRAPA 48	2,13 aA	1,91 abA	63,25 ab	87,95 b
SPRING	2,45 aA	1,82 bB	58,25 b	116,30 a
Médias	2,16	2,15	66,55	102,21 ²
DMS (1%)	1,1754	1,1754	19,4042	18,8541
DMS (5%)	0,8905	0,8905	14,6954	14,2787

¹Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente. Letras minúsculas referem-se à coluna e letras maiúsculas referem-se à linha para o mesmo parâmetro. *significativo a 5% de probabilidade, **significativo a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey; DMS: diferença máxima significativa a 1% e 5% de probabilidade. ²As médias para os dois estados de compactação diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade.

As plantas apresentam diferentes respostas à resistência do solo à penetração, variando entre culturas e cultivares. Resultados do desenvolvimento das plantas de soja em diferentes condições de compactação do solo também foram dependentes da cultivar em trabalho realizado por Queiroz-Voltan et al. (2000), que verificaram maior comprimento de raiz, altura da planta, peso da matéria seca do caule e da folha, sendo a média dessas variáveis maior na cultivar IAC-8, em relação à IAC-14, quando submetidas à compactação. A diferença significativa na altura de plantas, entre as cultivares Coodetec 204, Coodetec 215 e Spring, e igual na Monsoy e Embrapa 48 (Tabela 4) deveu-se às características das próprias cultivares, pois também é determinada por fatores genéticos.

Para a massa de mil grãos, as cultivares Monsoy 5942 e Spring foram superiores às demais (Tabela 4). Essa diferença pode ser característica inerente a cada cultivar, porque a produtividade não seguiu a mesma ordem da massa de mil grãos, ou seja, não diferiu estatisticamente (Tabela 2). Neste caso, a menor massa de grãos pode ser compensada pelo maior número de vagens e/ou de grãos por planta.

Para a massa de mil grãos nos tratamentos PD-C0 e PD-C1, as médias foram de 98,74 e 105,68 g, respectivamente, e estatisticamente diferentes ($p < 0,05$; DMS = 6,1175). No entanto, a produtividade das cultivares não diferiu para os dois estados de compactação do solo (Tabela 3). Tais resultados corroboram os obtidos por Queiroz-Voltan et al. (2000) e Johnson et al. (1990) ao observarem que, mesmo com redução no crescimento vegetativo, não ocorreu decréscimo proporcional na produtividade de grãos. Lima et al. (2006) também não observaram diminuição na produtividade da soja em plantio direto, entre estados de compactação impostos a Latossolo e Argissolo Vermelho, respectivamente.

A falta de resposta da compactação adicional do solo sobre a maior parte dos parâmetros de produção indica que, nas condições em que o experimento foi conduzido, não ocorreram alterações nos atributos físicos do solo de influência direta sobre o crescimento das plantas, a ponto de interferirem no movimento de água, ar e nutrientes no solo e, por sua vez, da absorção desses últimos pelas raízes, de modo similar ao observado por Queiroz-Voltan et al. (2000). Embora a D_s média das áreas estudadas tenha sido superior à D_s crítica ao crescimento das plantas, indicada por Tormena et al. (1998b) e Klein e Libardi (2000) ($D_{sc} = 1,28 \text{ mg m}^{-3}$) para solos de classe textural similar, a compactação do solo não influenciou os parâmetros de produção da soja porque o experimento foi mantido sob irrigação. A manutenção da umidade ao longo do ciclo da cultura controlou o incremento da resistência do solo à penetração e, por conseguinte, o efeito direto dela no crescimento das raízes.

Como a resistência do solo é função da umidade e da densidade do solo (BUSSCHER et al., 1997) e os níveis de umidade do solo foram mantidos próximos da capacidade de campo, não ocorreu incremento da resistência a ponto de esta atingir níveis limitantes ou impeditivos ao crescimento das raízes, muito embora a D_s tenha atingido níveis suficientes para o solo ser considerado compactado. A ausência de baixos níveis de umidade do solo não contribuiu para o aumento da resistência do solo à penetração das raízes (CARDOSO et al., 2006; CÂMARA; KLEIN, 2005). Tardieu (1994) também verificou que, num mesmo nível de resistência à penetração, os efeitos da resistência são menos pronunciados quando há maior conteúdo de água. A maior relação dos atributos físicos com a produção de grãos em menores conteúdos de água no solo é mencionada por Dexter (1987) ao verificar que, em baixos conteúdos de água no solo, valores de RP de 1 MPa podem restringir o crescimento de raízes e, em solos mais úmidos, pode haver crescimento radicular em valores de RP superiores a 4 MPa.

Conclusão

Em sistema plantio direto, as variáveis de produção fitomassa seca, massa de mil grãos e altura de plantas, avaliados nas cultivares de soja Coodetec 204, Coodetec 215, Monsoy 5942, Embrapa 48 e Spring, não foram influenciados pela compactação adicional do solo; as diferenças foram determinadas pelas características das próprias cultivares.

Referências

- ANKENY, M. D.; KASPAR, T. C.; HORTON, R. Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 3, p. 837-840, 1990.
- ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 391-398, 1997.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 7, p. 849-856, 2003.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 581-588, 2004.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; GARCIA ROQUE, C.; SOUZA, Z. M. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, v. 8, n. 3, p. 242-249, 2003.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.
- BOIZARD, H.; RICHARD, G.; ROGER-ESTRADE, J.; DURR, C.; BOIFFIN, J. Cumulative effects of cropping system on the structure of the tilled layer in Northern France. **Soil and Tillage Research**, v. 64, n. 1-2, p. 149-164, 2002.
- BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, v. 43, n. 2, p. 205-217, 1997.
- CÂMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 813-819, 2005.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', 1997.

- 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. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 493-501, 2006.
- DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, v. 98, n. 3, p. 303-312, 1987.
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 11, n. 3-4, p. 199-238, 1988.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006a.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologia de produção de soja: Paraná - 2007**. Londrina: Embrapa Soja, 2006b. (Sistemas de produção, n. 10).
- FERRERAS, L. A.; BATTISTA, J. J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parâmetros físicos del suelo em condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 161-170, 2001.
- GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A. C. Degradação física de um latossolo vermelho utilizado para a produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 863-873, 2007.
- HATCHER, L.; STEPANSKI, E. J. **A step-by-step approach to using the SAS system for univariate and multivariate statistics**. Cary: SAS Institute Inc., 1997.
- JOHNSON, J. E.; VOORHEES, W. B.; NELSON, W. W.; RANDALL, G. W. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 5, p. 973-979, 1990.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 857-867, 2002.
- KLEIN, V.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, p. 959-964, 2000.
- LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; GUBIANI, P. I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1172-1178, 2006.
- MERTEN, G. H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 2, p. 369-374, 1991.
- QUEIROZ-VOLTAN, R. G.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 5, p. 929-938, 2000.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; CERETTA, C. A. (Org.). **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Palloti, 2001. v. 1, p. 114-133.
- ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, v. 53, n. 2, p. 259-266, 1994.
- SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedade física de um Latossolo submetido a sistema de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 797-804, 2004.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 5, p. 795-801, 2000.
- 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. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.
- TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction: towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, v. 30, n. 2-4, p. 217-243, 1994.
- 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 725-730, 2001.
- TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998a.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998b.
- XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 6, p. 1743-1750, 1992.

Received on February 15, 2008.

Accepted on May 13, 2008.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.