

Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto¹

Soil physical alterations with soil compaction induced by traffic of a tractor in no-tillage system

Carlos Arnaldo Streck² Dalvan José Reinert³ José Miguel Reichert³
Douglas Rodrigo Kaiser⁴

RESUMO

Com a intensa utilização de tecnologias voltadas à motomecanização das operações agrícolas, o processo de compactação do solo, causado pelo tráfego, é um fator limitante à obtenção de maior produtividade agrícola. Com o objetivo de avaliar o efeito do tráfego de máquinas na alteração das propriedades físicas do solo sob plantio direto, conduziu-se um experimento no ano de 2001, na UFSM (RS), aplicando-se níveis de tráfego na superfície de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico. Para isso, foi utilizada uma carregadora com massa de 10Mg, munida de pneus radiais com pressão interna de 0,35MPa e pressão de contato pneu/solo de 0,11MPa. Os tratamentos constaram de: T0 - sem compactação adicional; T1 - compactação adicional por tráfego em duas vezes de máquina com massa de 10Mg; T2 - compactação adicional por tráfego em quatro vezes de máquina com massa de 10Mg. Com os diferentes níveis de tráfego aplicados, observou-se redução na macroporosidade e porosidade total sem aumento para microporosidade. A densidade e a resistência à penetração se elevaram para os tratamentos com tráfego. A resistência à penetração foi o parâmetro físico que melhor evidenciou o efeito do número de passadas do rodado da máquina sobre o solo.

Palavras-chave: densidade, porosidade, resistência à penetração.

ABSTRACT

Soil compaction caused by traffic is a limiting factor to obtain high agricultural production. A study was carried out on experimental area of Soil Science Department, Federal University of Santa Maria, state of Rio Grande do Sul, Brazil, in a Typic HAPLUDALF with objectives of evaluating the effects of different traffic levels on soil physical alterations in no-tillage system. A front buck loader of 10Mg

weight with radial tires, 0.35MPa inflated, causing a tire/soil pressure of 0.11MPa were used to induce the compaction levels over all plot area. The treatments were: T0 - without additional compaction; T1 - compaction caused by double pass of 10Mg loader and; T3 - compaction caused by four passes of the 10Mg loader. The tractor traffic induced the reduction of total porosity and macroporosity, and the increase of microporosity, bulk density and soil resistance to penetration. The soil resistance to penetration was the measurement that better separated the traffic level effects on soil physical properties.

Key words: density, porosity, penetration, resistance.

INTRODUÇÃO

Com a modernização da agricultura, o peso das máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado. Esse processo não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo. Aliado a isso, ocorreu a adoção do sistema conservacionista de preparo do solo, onde o solo deixou de ser revolvido e a compactação presente deixou de ser aliviada pelo preparo nos cultivos sucessivos.

Os pneus usualmente utilizados nos tratores e colhedoras comercializadas no Brasil possuem a parte lateral do pneu rígida, sendo chamados de pneus de banda diagonal. Essa rigidez impede que o pneu se molde no solo de acordo com as

¹Parte do trabalho de dissertação apresentado à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pelo primeiro autor para obtenção do título de Mestre.

²Engenheiro Agrônomo, Mestre em Agronomia, Centro de Ciências Rurais (CCR) UFSM, Camobi, 97105-900, Santa Maria, RS. E-mail: streck@mail.ufsm.com.br Autor para correspondência.

³Engenheiro Agrônomo, PhD, Professor Titular, Departamento de Solos, CCR, UFSM.

⁴Acadêmico do Curso de Agronomia, UFSM, Bolsista do PIBIC.

irregularidades do terreno e, por isso, a sua área de contato fica reduzida, aumentando a pressão na superfície do solo (SILVA et al., 2000). Segundo FLOWERS & LAL (1998), a principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo do solo, semeadura, tratamentos culturais e colheita. HORN et al. (1995) acrescentam que não somente a pressão estática causa compactação, mas também forças dinâmicas causadas pela vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento.

Os sistemas de manejo do solo têm grande influência nas propriedades físicas do solo e estão relacionados com a compactação. O sistema de plantio direto é uma técnica eficiente no controle da erosão do solo, quando comparado com o sistema convencional (SEGANFREDO et al., 1997; BERTOL et al., 1997), porém alguns estudos indicam uma maior compactação no sistema de plantio direto (HAKANSSON & MEDVEDEV, 1995; KLEIN & BOLLER, 1995), provocada pelo efeito cumulativo do tráfego de máquinas e acomodação natural das partículas sólidas. Vários trabalhos indicam aumento no estado de compactação dos solos submetidos ao sistema plantio direto (HAKANSSON et al., 1988; REINERT, 1990; SILVA et al., 1997). Segundo TORMENA et al. (1998), no plantio direto a movimentação do solo é restrita à linha de semeadura, mas a ocorrência sistemática do tráfego causa compactação na camada superficial do solo.

Determinados solos têm maior capacidade de suportar cargas, são mais facilmente manejados após períodos de chuva e não têm limitações ao crescimento vegetal (REINERT, 1990). A diferenciação entre tipos de solo se deve aos diferentes estados de agregação, à textura, ao teor de água, à matéria orgânica e às tensões que o solo recebeu no passado (HORN & LEBERT, 1994). As características do solo que influenciam seu comportamento compressivo, são afetadas pelo manejo, tais como: matéria orgânica (STONE & EKWUE, 1995), estrutura (HORN et al., 1995), teor de água e densidade do solo (REINERT, 1990; DIAS JÚNIOR, 1994; KONDO & DIAS JÚNIOR, 1999; SILVA et al., 2002).

Pesquisas realizadas em várias regiões do País apontam alterações significativas nas propriedades físicas de alguns solos, em virtude do tráfego contínuo de máquinas pesadas, do não revolvimento do solo e do uso freqüente de equipamentos agrícolas em dias em que o nível de umidade é muito elevado. Essas alterações referem-se ao decréscimo da porosidade e da permeabilidade e ao aumento da compactação em relação às condições

originais (NOVAK et al., 1992). Segundo TAVARES FILHO et al. (1999), a estrutura do solo é modificada em função da compactação, sendo que os macroagregados são destruídos e o solo apresenta estrutura degradada, podendo impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular.

Em consequência da compactação, tem-se um aumento da resistência do solo e redução da porosidade, da continuidade de poros, da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água. Esse processo reduz o crescimento e o desenvolvimento radicular e aumenta as perdas de nitrogênio por desnitrificação, o consumo de combustível para preparar solos compactados e a erosão do solo pela menor infiltração de água (SOANE & OUWERKERK, 1994). Solos compactados podem contribuir também para o aquecimento global, por aumentarem a emissão de CO₂, CH₄ e N₂O do solo (HORN et al., 1995). Isso ocorre pelo aumento da densidade, redução do tamanho de poros, alto teor de água do solo e redução da aeração, que favorecem o aumento da anaerobiose.

Objetivou-se determinar o efeito de níveis de tráfego de máquinas na alteração das propriedades físicas de um solo franco-arenoso, e verificar quais as propriedades físicas mais afetadas pelos estados de compactação impostos pelo tráfego no plantio direto.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, no município de Santa Maria, região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul. O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico (EMBRAPA, 1999), com textura superficial franco-arenosa, contendo na camada de 0 a 30cm: 89g kg⁻¹ de argila, 297g kg⁻¹ de silte e 614g kg⁻¹ de areia, determinados pelo método da pipeta descrito em EMBRAPA (1979).

A área utilizada para o experimento vinha sendo cultivada há doze anos no sistema plantio direto com a sucessão cultural aveia preta (*Avena strigosa* Schieb)/soja (*Glycine max* L.). No momento da aplicação dos tratamentos, a área se encontrava cultivada com aveia preta que foi dessecada com herbicida à base de glifosate, permanecendo cerca de 2500kg de matéria seca na superfície.

Em parcelas de 6 x 7m foram aplicados os tratamentos que se constituíram de três níveis de tráfego de máquina, induzindo diferentes estados de

compactação. Os tratamentos foram os seguintes: T0- sem compactação adicional; T1- compactação adicional por tráfego em duas vezes de máquina com massa de 10Mg; T2- compactação adicional por tráfego em quatro vezes de máquina com massa de 10Mg. A máquina trafegou por toda parcela (42m²) de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que a máquina trafegou variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego era sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes. O T0, sem compactação adicional, reflete o histórico das tensões sofridas durante os anos anteriores, principalmente pelas operações de semeadura e colheita.

A aplicação do tráfego foi feita quando o solo estava com umidade superior ao estado friável (avaliado qualitativamente no local), induzindo a um alto estado de compactação. A aplicação de tráfego de máquina em duas vezes no T1 e T2 foi feita quando o solo estava com umidade gravimétrica de 15%. Nessa umidade, o solo não suportou um número maior de passadas de máquina, pois na tentativa de fazê-lo ocorria o cisalhamento do solo, que não era de interesse para esse trabalho. Em função disso, a conclusão da aplicação do T2 (tráfego em quatro vezes) foi feita uma semana depois de ter recebido o tráfego em duas vezes, quando a umidade gravimétrica do solo atingiu 13%.

A máquina utilizada para compactar o solo foi uma carregadora com pneus radiais com pressão interna de 0,35MPa (50lb in⁻²), sendo a pressão exercida no solo de aproximadamente 0,11MPa. O valor da pressão de contato do rodado com o solo foi obtido pela relação entre a massa total da máquina e a área de contato dos pneus com o solo. A massa da máquina foi obtida pela pesagem em balança de plataforma. A área de contato do pneu com o solo foi estimada multiplicando-se a largura (38cm) pelo maior comprimento do pneu (59cm) em contato com o solo.

Para a determinação da densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo foram coletadas amostras indeformadas em anéis metálicos com 5,36cm de diâmetro e 3cm de altura, em seis profundidades (0 a 5, 5 a 10, 10 a 15, 15 a 20, 20 a 25 e 25 a 30cm). A determinação da densidade seguiu metodologia descrita em EMBRAPA (1979) e as porosidades foram determinadas conforme OLIVEIRA (1968).

A resistência do solo foi determinada até a profundidade de 40cm, usando-se um penetrômetro digital (marca Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer) de armazenamento eletrônico dos dados

e leituras realizadas a cada 0,15cm de profundidade, possuindo ponta cônica com ângulo de penetração de 30°. Simultaneamente à determinação da resistência à penetração fez-se a determinação da umidade do solo, pela utilização de TDR ("time domain reflectometry"; marca Soilmoisture Equipment, modelo 6050X1) calibrado para o solo em questão, possuindo hastes de 21 cm de comprimento inseridas diagonalmente no solo, a um ângulo tal que atingissem os intervalos de profundidade de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 20 e 20 a 40cm.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com oito repetições para todas as determinações. Utilizou-se teste de Duncan a 5% de probabilidade de erro para comparar médias de densidade e porosidades, para cada profundidade. Para comparar médias de resistência à penetração, utilizou-se o teste DMS a 5% de probabilidade de erro, para cada profundidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os níveis de tráfego resultaram em significativas alterações na densidade e porosidade do solo (Tabela 1). Observa-se, para a camada de 0 a 15cm, que a pressão aplicada no solo por tráfego em quatro vezes (T2) aumentou a densidade do solo em relação ao tratamento sem compactação adicional (T0), mas similares aos do tratamento com tráfego em duas vezes (T1). Observa-se também que a densidade para T0 e para T1 não foram diferentes até 15cm, possivelmente, devido à elevada densidade já presente em T0, indicando alto estado de compactação da área, refletindo o histórico das tensões sofridas pelo solo no passado. Isso corrobora com a afirmação de VIEIRA (1985), de que, no sistema plantio direto, a densidade apresenta maiores valores até aproximadamente 15cm de profundidade. A compactação adicional imposta pelo tráfego da máquina promoveu um aumento da densidade do solo até o dobro da profundidade em que foi detectada compactação para T0 (Tabela 1).

Os resultados encontrados concordam com VOORHEES et al. (1978) e VOORHEES et al. (1986), os quais encontraram que as máquinas agrícolas com carga por eixo acima de 4,5Mg causaram aumento da densidade do solo e resistência à penetração do solo a profundidades até maiores que 30cm. A compactação abaixo da camada arável é função da carga total por eixo e a compactação em superfície é função da pressão de inflação dos pneus (SALIRE et al., 1994).

Os valores de porosidade total confirmam a observação anterior para a densidade do solo em que a compactação aprofundou-se mais com a aplicação de tráfego. Isso novamente vem a confirmar a presença

Tabela 1 - Densidade e porosidades do solo em profundidades de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a níveis de tráfego, Santa Maria, 2001.

Tratamentos	Profundidade (cm)					
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
Densidade (Mg m ⁻³)						
T0	1,59 b	1,77 b	1,72 b	1,67 c	1,65 b	1,63 b
T1	1,72 ab	1,80 ab	1,78 ab	1,75 b	1,74 a	1,70 a
T2	1,74 a	1,83 a	1,85 a	1,81 a	1,78 a	1,74 a
Porosidade total (m ³ m ⁻³)						
T0	0,37 a	0,32 a	0,33 a	0,33 a	0,34 a	0,35 a
T1	0,34 a	0,30 ab	0,31 a	0,29 b	0,31 b	0,33 ab
T2	0,32 a	0,30 b	0,31 a	0,29 ab	0,30 b	0,30 b
Microporosidade (m ³ m ⁻³)						
T0	0,27 a	0,26 a	0,25 a	0,25 a	0,26 a	0,26 a
T1	0,28 a	0,25 a	0,25 a	0,24 a	0,26 a	0,26 a
T2	0,27 a	0,25 a	0,25 a	0,25 a	0,25 a	0,25 a
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)						
T0	0,09 a	0,06 a	0,07 a	0,08 a	0,08 a	0,09 a
T1	0,06 b	0,05 a	0,06 a	0,05 b	0,05 b	0,06 ab
T2	0,05 b	0,05 a	0,06 a	0,05 b	0,05 b	0,05 b

T0- sem compactação adicional; T1- compactação adicional por tráfego de máquina em duas vezes; T2- compactação adicional por tráfego de máquina em quatro vezes. Médias na coluna seguidas de mesma letra não diferem pelo teste Duncan a 5% de probabilidade de erro.

de maior estado de compactação na camada de 5 a 10 cm. Para as profundidades maiores, observou-se a tendência do decréscimo da porosidade total para os tratamentos trafegados (T1 e T2) em relação ao não trafegado (T0). Esses resultados concordam com a afirmação de HILLEL (1998) de que a compactação diminui a porosidade total além de diminuir o tamanho e a continuidade de poros.

A microporosidade não foi alterada pelo tráfego de máquinas em nenhuma das profundidades.

A macroporosidade teve redução nos primeiros 5cm de profundidade para os tratamentos que sofreram compactação adicional pelo tráfego. Dos 5 aos 15cm, a compactação adicional de T1 e T2 não provocou redução da macroporosidade em relação a T0, indicando que essa camada de solo já tinha sofrido tensões pelo tráfego sistemático que recebeu ao longo dos anos no sistema de plantio direto, fato que pode ser observado pelos valores de densidade. Para profundidades maiores que 15cm, a macroporosidade foi reduzida nos tratamentos com tráfego (T1 e T2) em relação a T0.

Os dados mostram que, ao aumentar o estado de compactação do solo, ocorre uma redução da porosidade total e macroporosidade sem aumento na microporosidade (Tabela 1). BOENI (2000), trabalhando com Latossolo Vermelho e Argissolo

Vermelho trafegado por trator com diferentes pressões de inflação nos pneus, encontrou redução da porosidade total e aumento da microporosidade com aumento da pressão de inflação nos pneus para o primeiro solo, e aumento da microporosidade com redução da macroporosidade sem diferença para pressão de inflação no segundo solo. No entanto, os resultados deste trabalho confirmam com a generalização apresentada por HILLEL (1982), o qual afirma que com aumento do estado de compactação, ocorrem reduções significativas principalmente no volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados.

A resistência do solo à penetração foi sensível ao tráfego de máquinas aplicado (Figura 1). Verifica-se que a resistência à penetração para o T2 foi superior à T1 e T0 até a profundidade de 28cm. A partir dessa profundidade, T2 diferiu significativamente de T1, mas não mais de T0. Esse último tratamento sofreu uma elevação da resistência à penetração atribuída a redução da umidade nessa profundidade. Na profundidade de 40cm, nenhum dos tratamentos diferiu entre si.

O tratamento com tráfego em duas vezes, só diferiu significativamente do solo com compactação adicional até os 8cm de profundidade. É possível que a pressão exercida pelo tráfego em duas vezes com

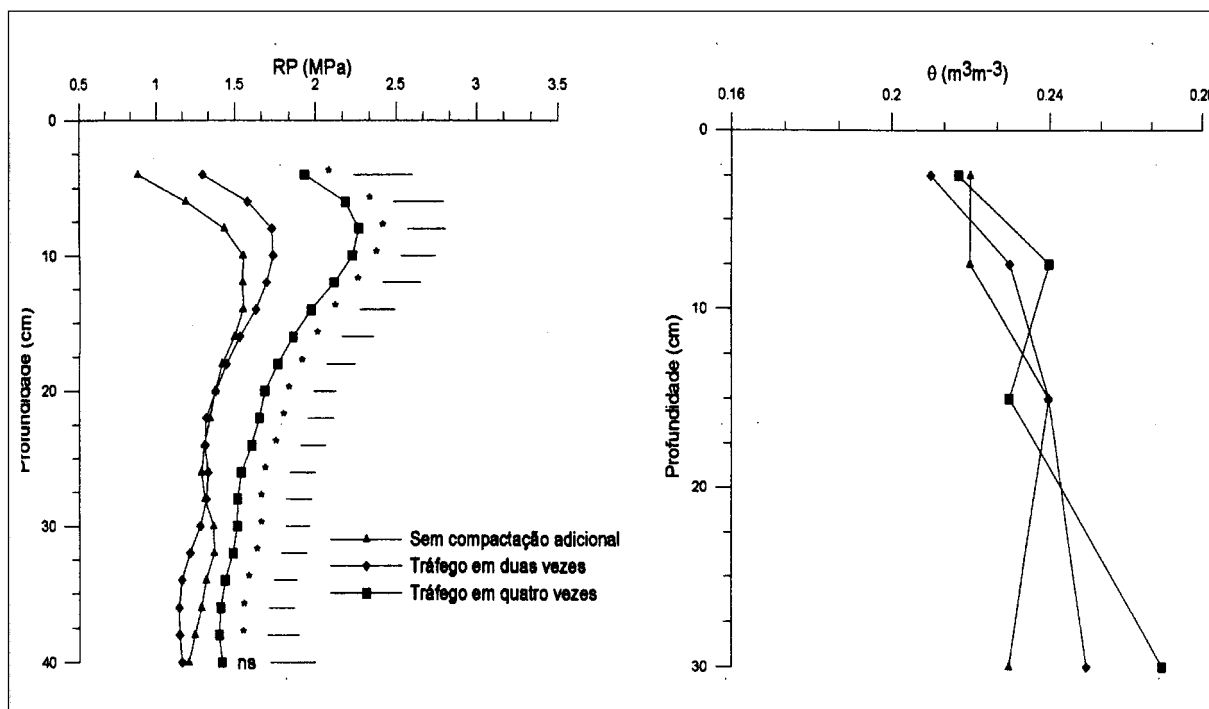


Figura 1 – Resistência do solo (RP) e umidade volumétrica (θ), determinada com TDR no momento da avaliação da resistência à penetração de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a três níveis de tráfego de máquina com massa de 10 Mg. Barras horizontais em (RP) comparam os valores de resistência à penetração, para cada profundidade, pelo teste DMS (5%).

máquina de 10Mg, não tenha atuado em maior profundidade, devido à compactação existente entre 8 e 15cm, o que ocasionou um confinamento na camada superficial de 8cm. Resultados semelhantes foram obtidos por TORMENA et al. (1998), que observaram que o uso de arado de discos e aivecas foram mais suscetíveis à compactação do solo pelo tráfego, devido ao efeito do confinamento causado por camadas compactadas abaixo da camada arável.

A resistência mecânica do solo à penetração foi a propriedade física que melhor evidenciou o efeito do número de vezes de tráfego da máquina sobre o solo. Observa-se que quatro vezes diferiram dos tratamentos com tráfego em duas vezes e sem tráfego, até os 28cm de profundidade.

Observa-se um valor máximo de resistência à penetração para todos os tratamentos na faixa dos 6 aos 14cm de profundidade (Figura 1). A resistência à penetração nessa camada para T2 apresentou valores acima de 2MPa, mesmo numa condição de alta umidade como a que foi feita a avaliação o que pode criar uma situação desfavorável às plantas. TAYLOR et al. (1966) e NESMITH (1987) encontraram o valor de 2MPa como sendo impeditivo ao crescimento de raízes no solo.

Uma consideração importante a ser feita é o incremento da resistência à penetração no tratamento com tráfego de máquina em quatro vezes a profundidades superiores que a camada superficial do solo. Essa compactação, abaixo dos 20cm de profundidade, é de difícil remoção e o uso de práticas mecânicas com esse fim é dispendioso. Assim, como salientam HAKANSSON & MEDVEDEV (1995), a principal medida para minimizar a compactação do subsolo seria limitar a carga no eixo e/ou restringir as operações de campo a períodos secos.

CONCLUSÕES

A aplicação de tráfego sobre o solo aumentou a densidade e a resistência do solo à penetração, reduziu a porosidade total e a macroporosidade e não afetou a microporosidade. A resistência à penetração foi a propriedade física que melhor evidenciou o efeito do número de tráfego do rodado da máquina sobre o solo. Evidenciou-se o efeito do confinamento da pressão aplicada na superfície do solo pelo tráfego de máquina em duas vezes, em função de uma camada compactada pré-existente localizada entre 8 e 15cm profundidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.409-418, 1997.
- BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. 2000. 111f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114f. Tese (Doutorado em Solos e Culturas) - East Lansing State University.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 1999. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. n.p.
- FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a molic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.48, p.21-35, 1998.
- HAKANSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p.239-282, 1988.
- HAKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.85-97, 1995.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego : Academic, 1998. 757p.
- HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. San Diego : Academic, 1982. 264p.
- HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam : Elsevier, 1994. p.45-69.
- HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.23-36, 1995.
- KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.3, p.395-398, 1995.
- KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.211-218, 1999.
- NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultisol. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.51, p.183-186, 1987.
- NOVAK, L.R. et al. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro Álico, em dois níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, p.1587-1595, 1992.
- OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.197-200, 1968.
- REINERT, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typical hapludalf**. 1990. 128f. Tese (Doutorado em Solos e Culturas) - Michigan State University.
- SALIRE, E.V.; HAMMEN, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.31, p.235-248, 1994.
- SEGANFREDO, M.L.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.287-291, 1997.
- SILVA, A.P. da; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, p.877-883, 1997.
- 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**, Santa Maria, v.30, n.5, p.795-801, 2000.
- SILVA, V.R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002.
- SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam : Elsevier, 1994. 660p.
- STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils affected by the incorporation of peat. **J Agric Eng Res**, v.60, p.15-24, 1995.
- TAVARES FILHO, J. et al. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.393-399, 1999.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, Jr J.J. Soil Strength-root penetration relations for medium- to coarse - textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22. p.301-309, 1998.
- VIEIRA, M.J. Comportamento físico de solos em plantio direto. In.: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO, 1985, Ponta Grossa, PR. **Anais...** Ponta Grossa: Fundação ABC, 1985. p.75-85.
- VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W.; RANDALL, G.W. Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, p.428-433, 1986.
- VOORHEES, W.B.; SENST, C.G.; NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.42, p.344-349, 1978.