



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Pim Petean, Leonardo; Tormena, Cássio Antonio; Alves, Sérgio José
INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO SOB PLANTIO
DIRETO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 34, núm. 5, 2010, pp. 1515-1526
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180215650004>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO SOB PLANTIO DIRETO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA⁽¹⁾

Leonardo Pim Petean⁽²⁾, Cássio Antonio Tormena⁽³⁾ & Sérgio José Alves⁽⁴⁾

RESUMO

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é considerado um moderno indicador da qualidade física do solo para o crescimento e desenvolvimento das plantas. O objetivo deste estudo foi determinar o IHO para avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. A área de estudo é constituída de um sistema de integração lavoura-pecuária com cultivo de soja no verão e aveia (*Avena strigosa* Schreb) + azevém (*Lolium multiflorum* Lam) no inverno, manejado com diferentes alturas de pastejo: 7, 14, 21 e 28 cm de altura e testemunha sem pastejo. Foram retiradas amostras indeformadas nas camadas de 0–7,5 e 7,5–15 cm, nas quais foram determinadas a densidade do solo (Ds), as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração e estimado o IHO. A densidade do solo crítica (Dsc) foi tomada como aquela em que o IHO = 0. Independentemente dos tratamentos, foi constatado que com o aumento da densidade do solo são necessários maiores teores de água para que a resistência do solo à penetração não seja maior que 2,5 MPa, bem como menores teores de água, para que a aeração do solo não se torne limitante. Nos tratamentos com 21 e 28 cm de altura de pastejo, verificou-se maior amplitude do IHO em relação à testemunha, sugerindo que a integração lavoura-pecuária cria um ambiente físico positivo no solo, desde que se mantenha uma carga animal adequada para evitar o sobrepastejo das áreas. No tratamento com 7 cm, a degradação física do solo é muita elevada na camada superficial e certamente predispõe as culturas a estresses de resistência sob secamento do solo e de aeração com elevados teores de água sob períodos prolongados. Verificou-se

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Recebido para publicação em dezembro de 2009 e aprovado em agosto de 2010.

⁽²⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá – PGA/UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). E-mail: leonardopim@hotmail.com

⁽³⁾ Professor Associado do Departamento de Agronomia, UEM. Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

⁽⁴⁾ Pesquisador do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR). Caixa Postal 481, CEP 86001-970 Londrina (PR). E-mail: sj@iapar.br

redução progressiva da proporção de amostras com valores de $D_s > D_{sc}$ do tratamento com 7 cm para a testemunha, indicando que o pisoteio excessivo dos animais resulta numa perda da qualidade física do solo na camada de 0–7,5 cm do tratamento com 7 cm. Para manter qualidade física do solo adequada sob pastejo de aveia e azevém no inverno, na camada de 0–7,5 cm, a altura de pastejo deve ser mantida acima de 21 cm da superfície do solo.

Termos de indexação: qualidade física do solo, densidade do solo, resistência do solo à penetração, estrutura do solo, água disponível.

SUMMARY: LEAST LIMITING WATER RANGE OF A DYSTROFERRIC RED LATOSOL UNDER NO-TILLAGE IN AN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM

*The least limiting water range (LLWR) is considered a modern indicator of soil physical quality for plant growth. The aim of this study was to determine the LLWR for assessing the soil physical quality of a dystroferric Red Latosol (Oxisol) under no-tillage in a crop-livestock integration system. In the crop-livestock integration system of the study area, soybean was planted in the summer and oat (*Avena strigosa* Schreb) plus ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam) in the winter with different pasture heights during grazing: 7, 14, 21, and 28 cm, and an ungrazed control. Undisturbed soils samples were taken from the layers 0–7.5 and 7.5–15 cm, in which the soil bulk density (Bd), soil water retention and soil resistance to penetration curves were determined, to then calculate the LLWR. The critical soil bulk density (B_{dc}) was determined for $LLWR=0$. Regardless of the treatments, it was found that an increase of the soil bulk density requires an increase of soil water contents to maintain soil penetration resistance below 2.5 MPa and a decrease in soil water to ensure adequate soil aeration, mainly in the 0–7.5 cm layer. In the treatments with grazing heights of 21 and 28 cm, the magnitude of LLWR was greater than in the control, suggesting that crop-livestock integration creates a positive soil physical environment, provided that an appropriate stocking is maintained to prevent overgrazing. In the 7 cm treatment, the soil physical degradation was very high in the 0–7.5 cm layer, and certainly predisposes the crops to stress resistance to soil drying and to reduced aeration under prolonged conditions of high soil moisture. A progressive reduction in the proportion of samples with greater bulk density values than the critical density of the 7 cm treatment toward the control was verified, indicating that the treatment effect of excessive animal trampling resulted in a loss of soil physical quality in the 0–7.5 cm soil layer. The grazing height of oat and ryegrass pasture should be maintained above 21 cm to ensure adequate physical soil quality in the 0–7.5 cm soil layer.*

Index terms: soil physical quality, bulk density, penetration resistance, soil structure, available water.

INTRODUÇÃO

O sistema de integração lavoura-pecuária (SILP) é uma alternativa que vem atraindo grande interesse dos agricultores nas regiões produtoras de grãos. Nesse sistema, as áreas de lavouras dão suporte à pecuária por meio da produção de alimento para os animais no intervalo entre dois cultivos comerciais, agregando renda aos produtores e constituindo-se em uma opção mais segura e eficiente de produção agropecuária. No sul do Brasil, a utilização das pastagens anuais de estação fria para a produção de carne ou leite constitui uma alternativa ao cultivo de cereais (Fontaneli & Freire Júnior, 1991). Na maior parte dessa região, as pastagens de inverno são formadas principalmente por aveia (*Avena strigosa*

Schreb) e azevém (*Lolium multiflorum* Lam), produzindo grande quantidade de forragem e permitindo o aproveitamento intensivo de áreas ociosas no inverno (Alvim, 1989), com produção residual de matéria seca necessária à formação de palhada para o plantio das culturas de verão em sistema de plantio direto.

A presença dos animais na pastagem tem efeitos diretos e indiretos tanto sobre a forragem quanto sobre o solo. As altas pressões aplicadas pelos cascos dos animais tendem a danificar a vegetação e deformar o solo (Scholefield et al., 1985) e provocam a compactação superficial deste (Lewis, 1980; Balph & Malecheck, 1985). Por outro lado, observa-se, em pastagens bem manejadas, incremento dos teores de matéria orgânica do solo, assim como crescimento do sistema radicular

fasciculado e agressivo das gramíneas forrageiras, favorecendo a estruturação do solo e com potencial para a reversão da compactação causada pelo pisoteio animal. No processo de compactação, há concomitante aumento da densidade do solo e redução no volume do espaço poroso, principalmente de macroporos (Koolen, 1994), reduzindo a infiltração, a retenção de água e a difusão de gases, bem como aumentando a resistência do solo à penetração das raízes. Outros efeitos incluem a perda de N por desnitrificação (Stepniewski et al., 1994) sob condições de reduzida aeração do solo, as quais podem ocorrer em solos argilosos compactados submetidos a períodos prolongados de elevado teor de água no solo.

Em SILP, os impactos na qualidade físico-hídrica do solo ocorrem mais significativamente na camada de 0–5 cm de profundidade (Marchão, 2007), na qual a pressão proveniente do pisoteio animal, durante a fase de pastejo, resulta em aumento da densidade do solo (D_s) (Lanzanova et al., 2007), reduzindo consequentemente a porosidade (Flores et al., 2007). No entanto, em muitos estudos os valores de densidade encontrados não têm atingido níveis críticos que limitam a produtividade dos cultivos subsequentes (Marchão, 2007; Flores et al., 2007). Spera et al. (2009) também indicam que, apesar de o pisoteio animal alterar os atributos físicos do solo, isso não ocorre em intensidade suficiente para degradá-lo. No SILP, o pisoteio dos animais provoca diminuição da porosidade, modificando a retenção e a disponibilidade de água (Costa et al., 2009). Para haver melhoria ou manutenção da qualidade física do solo nesse sistema, deve-se estabelecer uma correta altura de pastejo, via controle da lotação animal, a fim de que não haja compactação do solo pelo excessivo pisoteio animal (Cardoso et al., 2007; Fidalski et al., 2008).

Diferentes propriedades físicas têm sido usadas para avaliar a qualidade física do solo (Karlen & Stot, 1994), sendo a densidade e a porosidade as mais utilizadas. Um solo com boa qualidade física requer um balanço entre aeração e retenção de água, além de resistência do solo à penetração não impeditiva ao crescimento das raízes (Letey, 1985). Na ausência de limitações térmicas, as condições físicas na interface solo-raiz são controladas pela disponibilidade de água, aeração e resistência à penetração, as quais são dependentes da estrutura do solo (Letey, 1985; Boone, 1988; Hadas, 1997). De maneira geral, condições físicas do solo favoráveis ao crescimento das plantas têm sido associadas com uma porosidade de aeração mínima de 10 % (Grable & Siemer, 1968; Glinski & Lipiec, 1990; Xu et al., 1992), abaixo da qual a difusão de O_2 no solo torna-se limitante à respiração das raízes. Várias pesquisas apontam a resistência do solo à penetração como uma variável física muito sensível à condição estrutural do solo (Ehlers et al., 1983; Hamblin, 1985; Stirzaker et al., 1996), e um valor de resistência do solo à penetração de 2,0 MPa tem sido comumente associado como impeditivo para o

crescimento das raízes (Taylor et al., 1966) e da parte aérea das plantas (Tardieu, 1994; Weaich et al., 1996).

A qualidade física do solo é dependente da sua condição estrutural e do seu conteúdo de água. O intervalo hídrico ótimo (IHO) integra três fatores diretamente associados com o crescimento das plantas: aeração, resistência do solo à penetração e água disponível às plantas. Devido a essa característica, o IHO é considerado um indicador multifatorial da qualidade física do solo (Silva et al., 2006; Tormena et al., 2007), tendo sido utilizado com essa finalidade em vários estudos (Silva & Kay, 1996; Tormena et al., 1999; Sharma & Bhushan, 2001; Wu et al., 2003; Lapen et al., 2004; Leão et al., 2005). Em geral, com o aumento da D_s ocorre redução do IHO, indicando que as condições físicas do solo vão se tornando limitantes às plantas. O valor de densidade do solo em que o IHO se iguala a zero ($IHO=0$) indica que, a partir dessa densidade, as condições físicas são altamente restritivas para o crescimento radicular. Esse valor de densidade é considerado como a densidade do solo crítica (D_{sc}). A ocorrência da D_s maior do que a D_{sc} foi constatada por vários autores em solos com diferentes classes texturais e sistemas de manejo (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999; Imhoff et al., 2001; Benjamin et al., 2003; Leão et al., 2004; Cavalieri et al., 2006), a qual geralmente estava associada com a $RP > 2,0$ MPa e, ou, com a porosidade de aeração do solo < 10 %. No entanto, Leão et al. (2005) argumentam que, para a definição dos limites críticos do IHO, é recomendado que se estabeleçam os valores dos limites críticos conforme as condições experimentais e o conhecimento dos processos ou fenômenos envolvidos.

Reichert et al. (2003) consideram que o IHO é um grande avanço na área de biofísica do solo. Nesse sentido, várias pesquisas realizadas no Brasil, em diferentes culturas e sistemas de manejo, têm utilizado o IHO na avaliação da qualidade física do solo (Tormena et al., 1998, 1999; Imhoff et al., 2001; Araujo et al., 2004; Leão et al., 2004; Cavalieri et al., 2006). No entanto, a utilização do IHO na avaliação da qualidade física do solo em SILP com lavouras sob semeadura direta continuada ainda é escassa no Brasil. Práticas de manejo que favorecem o acúmulo de matéria orgânica no solo, como no caso da semeadura direta e do cultivo de pastagens, tendem a proporcionar condições físicas menos restritivas às plantas, uma vez que, em virtude da cobertura do solo pela palha, é esperado que ocorram mais frequentemente teores de água no solo dentro dos limites do IHO.

O objetivo do presente trabalho foi quantificar o IHO num Latossolo Vermelho distroférrico sob SILP submetido a diferentes alturas de pastejo de aveia mais azevém e utilizá-lo na avaliação da qualidade física do solo, assim como indicar limites de altura de corte das forrageiras pelo pastejo, mantendo a qualidade física do solo para as culturas implantadas após o pastejo.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Fazenda Experimental da Cooperativa Agroindustrial de Campo Mourão, localizada no município de Campo Mourão, Estado do Paraná (24 ° 02 ' S e 52 ° 22 ' W). A região apresenta um clima tipo Cfa, subtropical úmido mesotérmico segundo a classificação de Köppen, com médias anuais de 20 °C de temperatura e de 1.340 mm de precipitação pluvial. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico, com teores médios de 850 g kg⁻¹ de argila, 120 g kg⁻¹ de silte e 30 g kg⁻¹ de areia na camada de 0–20 cm, enquadrando-se na classe textural muito argilosa.

O experimento foi implantado em 2002 em uma área de 8 ha e é constituído de um SILP envolvendo as culturas de soja e milho semeadas no verão e aveia (*Avena strigosa* Schreb) + azevém (*Lolium multiflorum* Lam) no inverno, manejado em sistema de plantio direto. As culturas de aveia e azevém foram semeadas em mistura de 60 kg ha⁻¹ de aveia e 30 kg ha⁻¹ de azevém. Os tratamentos foram definidos visando manter as alturas de pastejo de aveia + azevém em 7, 14, 21 e 28 cm, assim como um tratamento testemunha, no qual não havia a entrada de animais para pastejo. Foram utilizadas duas repetições por tratamento, dispostas uma ao lado da outra. A testemunha foi mantida no interior de cada repetição, constituída de uma área de 100 m² delimitada com cerca elétrica, à qual os animais não tiveram acesso durante o período experimental.

No período de pastejo (120 dias) a altura da pastagem foi monitorada semanalmente, sendo ajustada com taxas de lotações médias de 2,44; 2,61; 2,25; e 1,82 unidades animal (UA ha⁻¹), respectivamente para os tratamentos com 7, 14, 21 e 28 cm de altura prevista para o pastejo. Foi utilizado o método de pastejo contínuo, com a técnica de “put and take”. Em cada unidade experimental permaneciam dois animais “testers” e um número variável de animais reguladores, utilizados de forma a manter os diferentes tratamentos de altura da pastagem (Mott & Lucas, 1952).

Em novembro de 2005, após a retirada dos animais, foram coletadas em cada parcela amostras indeformadas de solo nas camadas de 0–7,5 e 7,5–15 cm de profundidade, sendo 36 amostras em cada camada, totalizando 72 amostras por tratamento. Para a coleta dessas amostras foram utilizados cilindros em aço inox com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro interno, totalizando cerca de 100 cm³ de volume. A amostragem foi realizada utilizando um macaco hidráulico para a introdução lenta dos anéis no solo, com o auxílio de uma amostrador, para evitar a deformação da estrutura do solo durante a coleta das amostras.

No laboratório, em cada camada, as amostras foram divididas em 12 grupos de três amostras e saturadas com uma solução de CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹ por 48 h. Em

seguida, foi determinada a massa da amostra na condição saturada. Posteriormente, utilizando-se grupos de três amostras por tratamento e camada, estas foram submetidas às tensões de 20, 40, 60 e 80 hPa em uma mesa de tensão (Romano et al., 2002) e de 100, 300, 500, 700, 1.000, 2.000, 4.000 e 15.000 hPa em placas porosas em extratores de Richards (Dane & Hopmans, 2002). Ao cessar a drenagem, condição de equilíbrio para cada tensão, as amostras tiveram suas massas registradas para a determinação do seu teor de água. Na sequência, foi determinada a resistência à penetração (RP), utilizando-se um penetrômetro eletrônico de bancada com as seguintes características: haste de penetração com ponta cônica de 4 mm de diâmetro e semiângulo de 30°; deslocamento da haste em velocidade constante de 0,01 m min⁻¹; e frequência de leitura de resistência de um valor a cada 0,75 s, sendo calculado um valor médio de resistência para cada amostra, desconsiderando-se as primeiras e as últimas 30 leituras. As amostras foram posicionadas no penetrômetro, de forma que a ponta cônica se deslocou ao longo do eixo longitudinal no centro dos cilindros.

Após a determinação da RP, as amostras foram levadas para estufa a ± 105 °C por 24 h e, na sequência, transferidas para dessecadores, sendo determinada a massa do solo seco. A partir da massa do solo seco e do volume do cilindro foi calculada a Ds pela razão entre a massa de sólidos e o volume do cilindro. O teor de água do solo em base de volume foi calculado pela razão entre a massa de água e o volume do cilindro, considerando a densidade da água igual a 1.000 kg m⁻³.

Para determinação do IHO, é necessário descrever matematicamente as curvas de retenção de água e de resistência do solo. A curva de retenção de água no solo (CRA), expressa pela relação entre a tensão da água no solo (ψ) e o conteúdo de água (θ), foi estimada utilizando-se a função proposta por Ross et al. (1991), descrita na equação 1:

$$\theta = a \psi^b \quad (1)$$

em que θ é o conteúdo de água (m³ m⁻³), ψ é a tensão da água no solo (hPa) e a e b são parâmetros ajustados. Para quantificação do IHO, é necessário incorporar a Ds na descrição matemática da CRA, uma vez que ela permite descrever a variabilidade da estrutura do solo e estimar o conteúdo de água em potenciais específicos. Dessa forma, a equação 1 toma a forma da equação 2, a qual foi utilizada por Silva et al. (1994) e Betz et al. (1998).

$$\ln(\theta) = \ln(a + b Ds) + c \ln(\psi) \quad (2)$$

em que a , b e c são coeficientes de ajuste do modelo. Esse modelo foi aplicado a cada tratamento, e o efeito de profundidade foi avaliado considerando-a como variável *dummy* ou de classe, assumindo-se valor igual a 0 para a camada de 0–7,5 cm e igual a 1 para a camada de 7,5–15 cm.

A RP varia com o conteúdo de água (θ) e com a Ds, e da relação funcional entre RP, Ds e θ pode-se determinar a curva de resistência do solo (CRS). A CRS foi ajustada por meio de um modelo não linear utilizado por Busscher (1990), o qual é descrito na equação 3:

$$RP = d \theta^e Ds^f \quad (3)$$

que, com a transformação logarítmica, resulta na equação 4:

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln Ds \quad (4)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ é o conteúdo de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e d , e e f são os coeficientes de ajuste do modelo. O efeito de profundidade foi avaliado seguindo o mesmo procedimento adotado para a curva de retenção de água no solo.

O IHO foi determinado conforme Silva et al. (1994), calculando um valor para cada amostra. Os valores das características físicas do solo limitantes/críticos ao crescimento das plantas foram definidos a partir de dados publicados na bibliografia: (1) em relação à tensão da água no solo – a capacidade de campo ou o conteúdo de água do solo foi estimado numa tensão equivalente a 100 hPa (θ_{CC}), conforme Reichardt (1988), e o ponto de murcha permanente, como o teor de água retido na tensão de 15.000 hPa (θ_{PMP}), conforme Savage et al. (1996); (2) em relação à resistência do solo à penetração, estimou-se o conteúdo de água do solo para um valor de resistência à penetração (θ_{RP}) de 2,5 MPa (Cavaliere et al., 2006); e (3) em relação à porosidade de aeração, estimou-se o teor de água do solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de 10 %. O valor de θ_{PA} foi calculado utilizando a densidade do solo (Ds) e de partículas [(1-Ds/Dp)-0,1]. A densidade de partículas (Dp) foi estimada pelo método do balão volumétrico, conforme Embrapa (1997), e foi utilizado um valor de 2,85 Mg m^{-3} , que corresponde à média de 33 amostras coletadas aleatoriamente na área experimental.

Os ajustes de CRA e CRS foram feitos com a rotina PROC REG e PROC GLM do programa SAS (SAS, 1986). Após obtenção do IHO, a densidade crítica do solo foi determinada a partir da interseção dos limites inferior e superior do IHO, no qual este é igual a zero.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis Ds, θ e RP (Quadro 1) apresentaram ampla faixa de valores, o que é desejável para a modelagem da CRA e CRS. Constatou-se a ocorrência de elevados valores do coeficiente de variação (CV) para a RP, os quais estão associados ao gradiente de conteúdo de água do solo, bem como à variação da Ds. Resultados semelhantes são encontrados em diversas

publicações (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998, 1999; Imhoff et al., 2001; Leão et al., 2004, 2005; Cavaliere et al., 2006). A RP apresentou tendência decrescente de seus valores médios, do tratamento com 7 cm à testemunha, apresentando maior variação entre os tratamentos na camada de 0–7,5 cm.

Apesar do reduzido coeficiente de determinação do modelo ajustado à curva de resistência do solo à penetração para alguns tratamentos, na camada de 0–7,5 cm, os valores de F foram altamente significativos ($p < 0,001$) (Quadro 2). Para a curva de retenção de água, o modelo matemático ajustado aos dados explicou acima de 80 % da variabilidade do conteúdo de água para os tratamentos, à exceção do tratamento com 28 cm. No ajuste da CRA, a densidade mostrou influência positiva na variação do conteúdo de água no solo (θ), o que também foi verificado nesse mesmo solo por Tormena et al. (2007).

Os dados explicaram melhor o fenômeno de retenção de água do que de RP, como identificado pelos maiores valores de r^2 dos modelos ajustados em todos os tratamentos. A CRS foi influenciada pela profundidade, cujo efeito foi incorporado nos coeficientes de ajuste do modelo. A maior RP na camada de 0–7,5 cm pode ser atribuída ao efeito do pisoteio animal no aumento da Ds, o que implica maior fricção e coesão entre as partículas e, ou, agregados, resultando em rigidez de poros com a aproximação das partículas. A maior densidade na camada superficial do solo decorrente do pisoteio animal é consequência da proporcionalidade da distribuição da carga em função da área de contato (Soehne, 1958), como também destacado por Mapfumo et al. (1999). Com exceção da testemunha, os coeficientes de determinação dos modelos de resistência foram menores na camada superficial, em razão, provavelmente, da maior variabilidade espacial da estrutura imposta pelo pisoteio animal e pelo crescimento das raízes das forrageiras e da atividade de mesofauna. Já em profundidade, os coeficientes de determinação foram maiores que 80 %, similares aos obtidos por outros autores em diferentes solos (Tormena et al., 1998, 1999; Leão et al., 2004; Cavaliere et al., 2006). Para a CRA, não se verificou diferença significativa entre as camadas amostradas ($p > 0,05$), indicando que a retenção de água é similar no perfil amostrado em cada tratamento e que a Ds capturou os possíveis efeitos estruturais associados às camadas amostradas.

Os coeficientes estimados do modelo da CRS indicam que a resistência variou positivamente com a Ds e negativamente com θ , estando em concordância com os resultados obtidos por vários autores (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998, 1999; Imhoff et al., 2001; Leão et al., 2004; Cavaliere et al., 2006). O aumento da RP com o decréscimo da umidade é um processo bem conhecido, estando relacionado com a redução da espessura da película de água sobre as partículas individuais e o consequente aumento na

Quadro 1. Propriedades físicas do solo determinadas para cada tratamento, nas amostras com estrutura não deformada

Propriedade	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
Tratamento 7 cm – 0–7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,31	0,05	1,18	1,40	3,94
θ (m ³ m ⁻³)	0,43	0,06	0,36	0,54	14,12
RP (MPa)	3,98	1,98	1,59	9,83	49,81
Tratamento 7 cm – 7,5–15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,30	0,05	1,19	1,44	4,19
θ (m ³ m ⁻³)	0,42	0,06	0,31	0,54	14,71
RP (MPa)	3,61	2,04	1,14	11,28	56,50
Tratamento 14 cm – 0–7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,29	0,05	1,18	1,39	3,94
θ (m ³ m ⁻³)	0,43	0,06	0,31	0,53	14,30
RP (MPa)	3,86	1,96	0,49	9,75	50,74
Tratamento 14 cm – 7,5–15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,32	0,05	1,20	1,42	3,81
θ (m ³ m ⁻³)	0,43	0,06	0,36	0,54	14,45
RP (MPa)	3,62	1,65	1,37	7,63	45,51
Tratamento 21 cm – 0–7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,27	0,05	1,16	1,40	4,31
θ (m ³ m ⁻³)	0,43	0,06	0,34	0,54	14,70
RP (MPa)	3,47	1,46	0,43	6,79	42,09
Tratamento 21 cm – 7,5–15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,29	0,04	1,16	1,37	3,35
θ (m ³ m ⁻³)	0,42	0,06	0,34	0,55	15,13
RP (MPa)	3,33	1,80	1,04	7,78	54,16
Tratamento 28 cm – 0–7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,26	0,08	1,00	1,40	7,50
θ (m ³ m ⁻³)	0,41	0,07	0,33	0,60	17,75
RP (MPa)	3,77	2,37	0,55	10,87	62,87
Tratamento 28 cm – 7,5–15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,31	0,06	1,15	1,44	4,79
θ (m ³ m ⁻³)	0,41	0,06	0,32	0,53	15,39
RP (MPa)	3,43	1,46	0,59	6,59	42,60
Testemunha – 0–7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,21	0,07	0,95	1,34	6,45
θ (m ³ m ⁻³)	0,42	0,06	0,32	0,54	15,28
RP (MPa)	2,63	1,43	0,77	6,26	54,52
Testemunha – 7,5–15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,29	0,04	1,21	1,38	3,48
θ (m ³ m ⁻³)	0,43	0,05	0,33	0,53	13,66
RP (MPa)	3,03	1,71	1,21	9,59	56,41

N: 36; Ds: densidade do solo; θ : conteúdo de água; RP: resistência do solo à penetração.

magnitude das forças de coesão entre as partículas do solo, ampliado com o aumento da Ds. A partir da estimativa dos coeficientes apresentados no quadro 2, foram obtidos os conteúdos de água em que a resistência à penetração atingiu 2,5 MPa (θ_{RP}), valor tomado como impeditivo para o crescimento das raízes. Para a CRA, o sinal positivo do coeficiente relacionado com a Ds indica que a retenção de água aumenta com a Ds, corroborando os resultados obtidos por Tormena et al. (2007) e Araújo et al. (2004) nesse mesmo solo. O efeito da Ds no aumento da retenção de água ocorre por causa da alteração na distribuição dos tamanhos de poros, com aumento proporcional de poros de menor diâmetro, os quais retêm a água com maior energia (Richard et al. 2001).

A variação do conteúdo de água nos limites críticos do IHO, para os tratamentos e camadas, é apresentada na figura 1. Em todos os tratamentos foi constatado que, com o aumento da Ds, ocorreu também aumento do teor de água para manter a resistência à penetração (θ_{RP}), bem como decréscimo do teor de água para manter a porosidade de aeração (θ_{PA}) (Figura 1), corroborando os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (2007), Imhoff et al. (2001), Araújo et al. (2004) e Leão et al. (2004). Constatou-se que a θ_{RP} foi superior ao conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para todos os tratamentos, indicando que a resistência à penetração é uma variável de grande importância no controle da qualidade física desse solo.

Quadro 2. Equações da curva de resistência do solo à penetração e da curva de retenção de água no solo nos diferentes tratamentos e camadas estudados

Tratamento / Profundidade	Curva de resistência do solo	Curva de retenção de água
7 cm / 0–7,5 cm	RP= 0,129758 Ds ^{5,01776} $\theta^{-2,32068}$ F = 44,57; P = 0,0001; $r^2 = 0,72$	$\theta = e^{(-1,11285 + 0,50168 Ds)} \psi^{(-0,68411)}$ F = 256,46; P = 0,0001; $r^2 = 0,88$
7 cm / 7,5–15 cm	RP = 0,042164 Ds ^{6,81612} $\theta^{-2,88958}$ F = 106,5; P = 0,0001; $r^2 = 0,86$	
14 cm / 0–7,5 cm	RP = 0,083953 Ds ^{7,22308} $\theta^{-2,11517}$ F = 21,47; P = 0,0001; $r^2 = 0,56$	$\theta = e^{(-0,90115 + 0,34085 Ds)} \psi^{(-0,06785)}$ F = 196,59; P = 0,0001; $r^2 = 0,85$
14 cm / 7,5–15 cm	RP = 0,062480 Ds ^{6,04148} $\theta^{-2,66663}$ F = 79,11; P = 0,0001; $r^2 = 0,82$	
21 cm / 0–7,5 cm	RP = 0,107173 Ds ^{5,34981} $\theta^{-2,45088}$ F = 27,81; P = 0,0001; $r^2 = 0,62$	$\theta = e^{(-0,68740 + 0,19153 Ds)} \psi^{(-0,07078)}$ F = 251,87; P = 0,0001; $r^2 = 0,87$
21 cm / 7,5–15 cm	RP= 0,042403 Ds ^{7,62625} $\theta^{-2,58448}$ F = 83,68; P = 0,0001; $r^2 = 0,83$	
28 cm / 0–7,5 cm	RP=0,219883*Ds ^{5,25328} $\theta^{-1,61705}$ F = 30,76; P = 0,0001; $r^2 = 0,65$	$\theta = e^{(-0,58972 + 0,10180 Ds)} \psi^{(-0,07234)}$ F = 102,78; P = 0,0001; $r^2 = 0,74$
28 cm / 7,5–15 cm	RP = 0,058338 Ds ^{6,09219} $\theta^{-2,59359}$ F = 70,51; P = 0,0001; $r^2 = 0,81$	
Testemunha / 0–7,5 cm	RP = 0,091135 Ds ^{6,78827} $\theta^{-2,23664}$ F = 102,5; P = 0,0001; $r^2 = 0,86$	$\theta = e^{(-0,85358 + 0,31332 Ds)} \psi^{(-0,06706)}$ F = 554,68; P = 0,0001; $r^2 = 0,92$
Testemunha / 7,5–15 cm	RP = 0,054637 Ds ^{6,85042} $\theta^{-2,50425}$ F = 37,10; P = 0,0001; $r^2 = 0,69$	

Os resultados indicam que nesse solo o limite inferior de água disponível, associado com a tensão de água no solo de 15.000 hPa, tem pouca relevância quando da avaliação da disponibilidade de água no solo e que ele pode ser substituído pelo teor de água, em que a RP atinge um valor crítico. No entanto, deve-se considerar que o valor crítico de resistência pode ser ampliado em sistema plantio direto em razão da maior disponibilidade temporal de água associada com a cobertura do solo, especialmente se há formação de uma rede de bioporos contínuos e estáveis, que atuam como rotas alternativas ao sistema radicular das culturas. O período de regeneração da vegetação após a saída dos animais e antes do plantio da cultura de verão é de suma importância para a renovação radicular e regeneração dos bioporos eliminados pelo tráfego de máquinas e animais, além dos ciclos de umedecimento e secagem do solo, que auxiliam a recuperação da estrutura do solo. A θ_{PA} determinou o limite superior do IHO a partir de diferentes valores de densidade nos tratamentos estudados. De forma geral, os resultados indicam que o aumento na densidade implica maior perda de água do solo, a fim de que haja poros ocupados com ar em quantidade suficiente para que o fluxo de gases no solo não limite o crescimento das raízes.

Na camada de 0–7,5 cm, os resultados indicam que o IHO foi fortemente reduzido nos tratamentos com 7 e 14 cm de altura de pastejo, devido ao impacto da resistência do solo à penetração motivada pelo pisoteio animal e, provavelmente, pela menor capacidade de regeneração das plantas de aveia + azevém, desde a

retirada dos animais até o momento em que foi realizada a amostragem. Para os outros tratamentos, o limite superior do IHO constitui-se em θ_{CC} para a maior parte dos valores de Ds, e para Ds entre 1,25 e 1,26 Mg m⁻³ a θ_{PA} substitui a θ_{CC} como limite superior do IHO. Observa-se que nessa camada a θ_{RP} substitui a θ_{PMP} a partir das Ds > 1,12 Mg m⁻³ para os tratamentos com 28 cm e testemunha. Nos outros tratamentos, como já salientado, a θ_{RP} determina o limite inferior do IHO em toda a faixa de Ds.

A análise da figura 1 mostra a redução gradativa do IHO a partir do tratamento com 28 cm, o qual não é diferente da testemunha, em direção ao tratamento com 7 cm. Esses resultados mostram que o pastejo excessivo e o pisoteio dos animais podem resultar numa perda da qualidade física do solo. No tratamento com 7 cm, a degradação física do solo é muita elevada e certamente predispõe as raízes das culturas a estresses de resistência com o secamento do solo e de aeração sob condições prolongadas de elevados teores de água no solo. Ressalta-se que a disponibilidade de água entre a CC e PMP não sofre variação entre os tratamentos, mas os tratamentos com reduzida altura de corte das forrageiras podem impor restrições de aeração e resistência à penetração dentro desses limites de disponibilidade de água.

A degradação física e estrutural do solo no tratamento com 7 cm indica a necessidade de se estabelecer um limite mínimo de oferta de forragem de inverno sob pastejo em sistema de integração lavoura-pecuária. No tratamento com reduzida

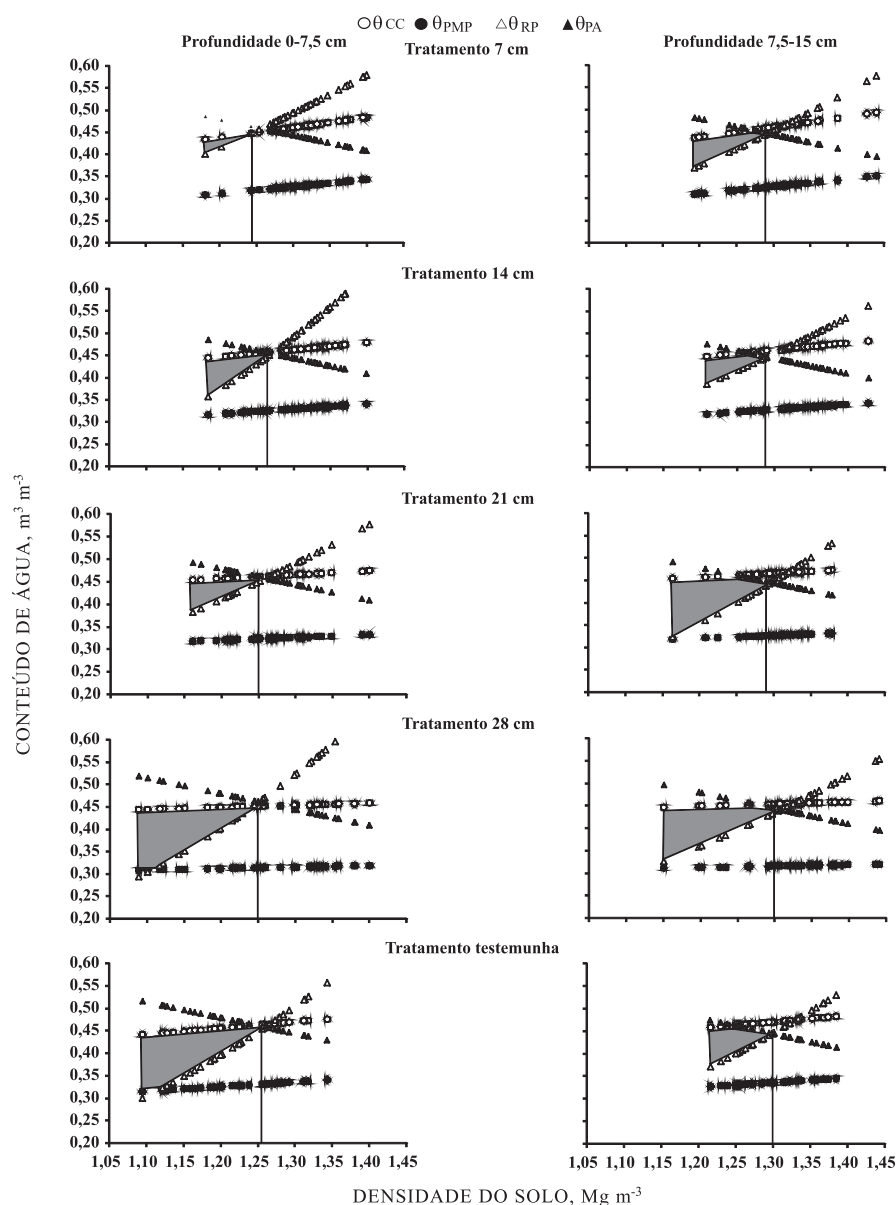


Figura 1. Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), resistência à penetração (θ_{RP}) e porosidade de aeração (θ_{PA}), nas camadas de 0–7,5 e 7,5–15 cm de profundidade e nos tratamentos com 7, 14, 21 e 28 cm de altura de pastejo e testemunha sem pastejo.

lotação animal, correspondente ao tratamento com 28 cm, verifica-se melhoria na qualidade física do solo na camada superficial em relação ao tratamento com 7 cm, não promovendo alterações físicas que comprometessem a qualidade física do solo. Além disso, é possível que o sistema radicular fino e abundante da cultura do azevém tenha contribuído para a manutenção e recuperação da qualidade estrutural do solo, que eventualmente sofreu alguma degradação pelo trânsito dos animais.

Na camada de 7,5–15 cm, tanto θ_{CC} como θ_{PA} determinaram o limite superior do IHO; com o aumento da Ds, a θ_{PA} substituiu a θ_{CC} como limite superior do IHO. Os valores de Ds, em que θ_{PA} substituiu a θ_{CC} como limite inferior, variam entre 1,25 e 1,27 Mg m⁻³ entre os diferentes tratamentos. Nessa camada, é provável que os efeitos do pisoteio animal não tenham contribuído diretamente para alterar as propriedades físicas do solo, uma vez que a faixa de valores de Ds é similar entre os tratamentos. No tratamento com

7 cm, a forte redução do IHO nessa profundidade pode estar relacionada com a menor resiliência do solo devido ao menor crescimento radicular das forrageiras de inverno e à menor área foliar estabelecida pelo frequente consumo delas pelos animais, com impactos nos ciclos de secagem e umedecimento do solo. A compactação do solo depende da pressão aplicada e da intensidade do pisoteio: como os animais se deslocam mais com menor oferta de forragem, há maior pisoteio nessa condição. A palha que cobre o solo atenua a pressão aplicada instantaneamente sobre o solo na proporção direta de sua quantidade, dissipando parte da energia de compactação (Braida, 2006), de modo que o controle da altura de pastejo constitui-se num elemento-chave para o manejo das áreas sob SILP. No entanto, pode-se verificar que nos tratamentos com 21 e 28 cm há redução da Ds (Figura 1), bem como do teor de água do solo, em que a RP atinge o valor crítico. As razões para o comportamento físico do solo diferenciado, nesses tratamentos, podem estar relacionadas a uma melhoria da atividade biológica via maior atividade e crescimento das raízes da cultura da aveia e, posteriormente, do azevém, associados às diferenças de ciclo vegetativo entre as duas culturas. Alturas de pastejo que permitam manter níveis foliares compatíveis com altas taxas de fotossíntese parecem ser importantes para a renovação e consequente manutenção e crescimento e desenvolvimento do sistema radicular.

A maior amplitude do IHO nos tratamentos com 21 e 28 cm em relação à testemunha indica que a integração lavoura-pecuária cria um ambiente físico positivo no solo, desde que a lotação animal seja adequada. Nesses tratamentos, o maior valor do IHO no perfil amostrado possibilita menores riscos de estresses de natureza física nesse solo, em razão das variações na disponibilidade de água durante o ciclo da cultura. Os valores de Dsc para os tratamentos com 7, 14, 21, 28 cm e testemunha, foram respectivamente de 1,24, 1,27, 1,25, 1,25 e 1,26 Mg m^{-3} na camada de 0–7,5 cm de profundidade e de 1,29 Mg m^{-3} para os tratamentos com 7, 14 e 21 cm e 1,30 Mg m^{-3} para os tratamentos com 28 cm e testemunha na camada de 7,5–15 cm. Esses valores de densidade crítica são superiores aos obtidos por Tormena et al. (1999) em um Latossolo com textura similar, mas com mineralogia e teor de matéria orgânica diferentes.

Quanto menor o valor de Dsc, aumenta-se a possibilidade de que a densidade do solo atinja valores maiores que esse, sugerindo maior frequência de condições físicas impeditivas às plantas. Nesse sentido, o tratamento com 7 cm promoveu redução importante no valor da Dsc, indicando os impactos estruturais decorrentes do pisoteio dos animais e do manejo, além da menor capacidade de recuperação da massa da parte aérea e do sistema radicular das plantas. Verifica-se que ocorre redução progressiva da proporção de amostras com valores de Ds > Dsc do tratamento com 7 cm em direção à testemunha (Figura 2).

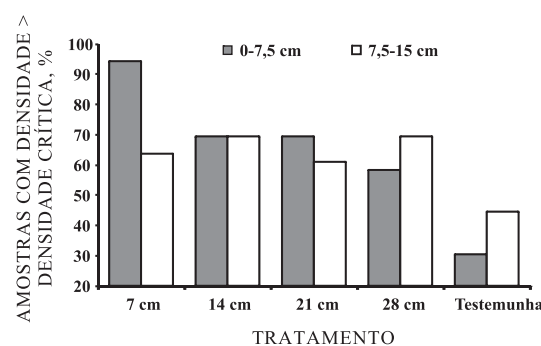


Figura 2. Percentagem das amostras com densidade do solo maior do que a densidade do solo crítica. Nas camadas de 0–7,5 e 7,5–15 cm de profundidade e nos tratamentos com 7, 14, 21 e 28 cm de altura de pastejo e testemunha sem pastejo.

Entre os tratamentos com pastejo, o tratamento com 28 cm apresenta as menores proporções de Ds > Dsc, porém ainda com elevação substancial em relação à testemunha. A frequência de amostras com Ds > Dsc é elevada nos solos com pastejo no inverno; a proporção de Ds > Dsc em todos os tratamentos é superior à observada por Tormena et al. (2007) em um Latossolo Vermelho distroférrico de mesma classe textural, sob sistemas de manejo de sucessão e rotação. Esses resultados apontam para a necessidade de controle rigoroso de entrada de animais na área sob pastejo, especialmente quando sob condições de umidade do solo, que favorecem a compactação, sobretudo a provocada pelos cascos dos animais. Esse é um dos requisitos fundamentais para um acompanhamento criterioso da qualidade física dos solos sob SILP. Na camada de 7,5–15 cm, a distribuição das proporções de amostras com Ds > Dsc não mostra comportamento sistemático ligado à compactação pelo pisoteio animal, ainda que a testemunha apresente elevada percentagem de amostras com Ds > Dsc.

Esses resultados dão suporte à afirmação de que a compactação pelo trânsito de bovinos ocorre concentrada na camada superficial. O pisoteio animal exerce elevada pressão devido à distribuição de seu peso em uma pequena área do casco (Willatt & Pullar, 1983), sendo essa pressão o agente causador da compactação, concentrando-se nas camadas mais superficiais, até 5,0 cm de profundidade (Moraes & Lustosa, 1997; Salton et al., 2002). Por outro lado, as máquinas agrícolas exercem pressão diferenciada sobre o solo, pois seu peso é distribuído em uma área maior, sendo causadora de compactação subsuperficial relacionada à carga total aplicada por eixo (Hamza & Anderson, 2005). Neste estudo, a resistência à penetração foi o fator que assumiu maior importância na redução do IHO. O estabelecimento de níveis críticos das propriedades físicas do solo para o crescimento das plantas é bastante complexo e de certa

forma, até subjetivo, pois envolve a integração de variáveis relacionadas com solo, clima e planta. Os valores para os limites críticos utilizados no cálculo do IHO foram obtidos da literatura, como indicado em Silva et al. (1994), Topp et al. (1994) e Tormena et al. (1998, 1999).

CONCLUSÕES

1. O IHO é reduzido com o aumento da densidade em razão do maior teor de água necessário para manter a resistência à penetração igual a 2,5 MPa em todos os tratamentos, indicando que a resistência à penetração é uma variável de grande importância no controle da qualidade física desses solos.

2. No tratamento com 7 cm, a degradação física do solo é muita elevada na camada superficial e certamente predispõe as culturas a estresses de resistência sob baixa umidade do solo e de aeração sob condições prolongadas de elevada umidade.

3. Ocorreu redução progressiva da proporção de amostras com valores de densidade do solo maiores que os da densidade do solo crítica do tratamento com 7 cm para a testemunha, indicando que o pisoteio excessivo dos animais resulta numa perda da qualidade física do solo na camada de 0–7,5 cm daquele tratamento.

4. Para manter a qualidade física do solo, manejado sob pastejo da aveia + azevém no inverno, a altura de pastejo deve ser mantida acima de 21 cm.

LITERATURA CITADA

- ALVIM, J.M. Produção e utilização de forrageiras de inverno: Aveia e azevém. Coronel Pacheco, Embrapa Gado Leiteiro, 1989. 28p. (Embrapa Gado Leiteiro. Documentos, 42)
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. R. Bras. Ci. Solo, 28:337-345, 2004.
- BALPH, D.F. & MALECHECK, J.C. Cattle trampling of crested wheat-grass under short-duration grazing. J. Rang. Manag., 38:226-227, 1985.
- BENJAMIN, J.G.; NIELSON, D.C. & VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. Geoderma, 116:137-148, 2003.
- BETZ, D.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M. & RANDALL, G.W. Least limiting water range: Traffic and long-term tillage influences in a webster soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 62:1384-1393, 1998.
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.A.; VEIGA, M. & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. R. Bras. Ci. Solo, 30:605-614, 2006.
- BOONE, F.R. Wheater and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. Soil. Till. Res., 11:283-324, 1988.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 3:519-524, 1990.
- CARDOSO, R.R.; CARVALHO, P.C.F.; CARASSAI, I.J.; FLORES, J.P.C.; NABINGER, C.; FREITAS, F.K.; MACARI, S.; TREIN, C.R. & SILVA, T. O manejo do pastejo e seu impacto nos atributos físicos de um Argissolo Vermelho em integração lavoura-pecuária. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL EM INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA, 2007, Curitiba. Anais... Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2007. CD-ROM.
- CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A. & COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. R. Bras. Ci. Solo, 30:137-147, 2006.
- COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L. & SILVA, F.R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária, R. Bras. Ci. Solo, 33:235-244, 2009.
- DANE, J.H. & HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. Methods of soil analysis: Physical methods. Madison, Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 2002. Part 4. p.688-690.
- EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F. & BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in the tilled an untilled loess soil. Soil. Till. Res., 3:261-275, 1983.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; CECATO, U.; BARBERO, L.M.; LUGÃO, S.M.B. & COSTA, M.A.T. Qualidade física do solo em pastagem adubada e sob pastejo contínuo. Pesq. Agropec. Bras., 43:1583-1590, 2008.
- FLORES, J.P.C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L.C.; CARVALHO, P.C.F.; LEITE, J.G.D.B. & FRAGA, T.I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. R. Bras. Ci. Solo, 31:771-780, 2007.
- FONTANELI, R.S. & FREIRE JR, N. Avaliação de consorciações de aveia e azevém-anual com leguminosas de estação fria. Pesq. Agropec. Bras., 26:623-630, 1991.
- GLINSKI, J. & LIPIEC, J. Soil physical conditions and plant roots. Boca Raton, CRC Press, 1990. 248p.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. Soil Sci. Soc. Am. J., 32:180-186, 1968.
- HADAS, A. Soil tilth: The desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation processes. Soil Till. Res., 43:7-40, 1997.

- HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agr.*, 38:95-158, 1985.
- HAMZA, M.A. & ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.*, 82:121-145, 2005.
- IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; DIAS JR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18, 2001.
- KARLEN, D.L. & STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 1994. p.53-72. (Special Publication, 35).
- KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier Science, 1994. p.23-44.
- LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C. & REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1131-1140, 2007.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.*, 78:151-170, 2004.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:415-423, 2004.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E. & TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. *Agron. J.*, 97:1210-1215, 2005.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-94, 1985.
- LEWIS, C.E. Simulated cattle injury to planted slash pine: Combination of defoliation, browsing and trampling. *J. Range Manag.*, 33:340-345, 1980.
- MAPFUMO, E.; CHANASYK, D.S.; NAETH, M.A. & BARON, V.S. Soil compaction under grazing of annual and perennial forages. *Can. J. Soil Sci.*, 79:191-199, 1999.
- MARCHÃO, R.L. Integração lavoura-pecuária num Latossolo do cerrado: Impacto na física, matéria orgânica e macrofauna. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2007. 153p. (Tese de Doutorado)
- MORAES, A. & LUSTOSA, S.B.C. Efeito do animal sobre as características do solo e a produção da pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE AVALIAÇÃO DE PASTAGENS COM ANIMAIS, Maringá, 1997. Anais. Maringá, 1997. p.129-149.
- MOTT, G.O. & LUCAS, H.L. The design, conduct, and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 6., 1952, State College. *Proceedings...* State College, 1952. p.1380-1385.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-16, 1988.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, 27:29-48, 2003.
- RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J.F.; BRUAND, A. & GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.*, 52:49-58, 2001.
- ROMANO, N.; HOPMANS, J.W. & DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 2002. Part 4. p.692-698.
- ROSS, P.J.; WILLIAMS, J. & BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:923-927, 1991.
- SALTON, J.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACHADO, L.A.Z. & OLIVEIRA, H. Pastoreio de aveia e compactação do solo. *R. Plantio Direto*, 69:32-34, 2002.
- SAS Institute. *Statistical Analysis System User's Guide: statistics*. Cary: 1986. 584p.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. *Agron. J.*, 88:844-851, 1996.
- SCHOLEFIELD, D.; PATTO, P.M. & HALL, D.M. Laboratory research on the compressibility of four topsoils from grassland. *Soil Till. Res.*, 6:1-16, 1985.
- SHARMA, P.K. & BHUSHAN, L. Physical characterization of a soil amended with organic residues in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. *Soil Till. Res.*, 60:143-152, 2001.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil*, 184:323-329, 1996.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, A.P.; KAY, B. D.; TORMENA, C. A. & IMHOFF, S.C. Least limiting water range of soils. *Encyclop. Soil Sci.*, 1:1026-1029, 2006.
- SOEHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agric. Eng.*, 39:276-281, 1958.
- SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S. & TOM, G.O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:129-136, 2009.

- STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J. & BALL, B.C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier Science, 1994. p.167-190.
- STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B. & WILMS, Y. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant Soil*, 185:151-162, 1996.
- TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction: Towards a system with multiple signaling. *Soil Till. Res.*, 30:217-243, 1994.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER JR, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C. & CULLEY, J.L.B. Non limiting water range (NLWR): An approach for assessing soil structure. Soil Quality Evaluation Program. Ottawa, Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36p. (Technical Report, 2)
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico em sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; GONÇALVES, A.C.A. & FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo de potencial de água no solo: Um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 3:286-292, 1999.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.
- WEAICH K.; CASS, A. & BRISTOW, K.L. Pre-emergent growth of maize (*Zea mays* L.) as a function of soil strength. *Soil Till. Res.*, 40:3-23, 1996.
- WILLATT, S.T. & PULLAR, D.M. Changes in soil physical properties under grazes pastures. *Aust. J. Soil Res.*, 22:343-348, 1983.
- WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B. & MARKEGARD, G. Soil management effects on the non limiting water range. *Geoderma*, 114:401-414, 2003.
- XU, X.; NIEBER, J.L. & GUPTA, S.C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1743-1750, 1992.