

QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO SOB PLANTIO DIRETO INFLUENCIADA PELA COBERTURA DO SOLO⁽¹⁾

Éverton Blainski⁽²⁾, Cássio Antonio Tormena⁽³⁾, Rachel Muylaert Locks Guimarães⁽⁴⁾ & Marcos Rafael Nanni⁽³⁾

RESUMO

Estratégias de manejo para melhorar e manter a qualidade física do solo (QFS) são fundamentais para a sustentabilidade de sistemas agrícolas. O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador de QFS, definido pela faixa de teor de água menos limitante às plantas. Para uma adequada QFS às plantas, os teores de água do solo deveriam ser mantidos nos limites do IHO. Nesse contexto, a cobertura do solo pelos restos culturais pode contribuir com a QFS via aumento na frequência com que θ permanece no IHO (F_{dentro}). O objetivo deste estudo foi determinar o IHO em um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com a cultura da soja em sistema de plantio direto, bem como avaliar a F_{dentro} em função de diferentes quantidades de resíduos de aveia (0, 3, 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹). O IHO apresentou relação inversa com a densidade do solo (Ds). Com o estreitamento do IHO, foi observada redução da F_{dentro} , independentemente da quantidade de resíduos sobre o solo. Por sua vez, o aumento da quantidade de resíduos de aveia sobre o solo proporcionou incremento nos valores de F_{dentro} , independentemente da posição de amostragem. O efeito benéfico do aumento da quantidade dos resíduos de aveia sobre a F_{dentro} foi dependente da amplitude do IHO. Com o aumento da Ds e redução do IHO, o incremento da massa de resíduos sobre o solo não refletiu em aumento da F_{dentro} ou da QFS, principalmente em Ds próximas à considerada crítica.

Termos de indexação: plantio direto, qualidade física do solo, restos culturais, intervalo hídrico ótimo.

⁽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 16 de dezembro de 2010 e aprovado em 13 de outubro de 2011.

⁽²⁾ Eng^o-Agrônomo, Doutor em Agronomia, Pesquisador da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI. E-mail: evertonblainski@epagri.sc.gov.br

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

⁽⁴⁾ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, UEM. E-mail: rachellocks@gmail.com

SUMMARY: INFLUENCE OF SOIL COVER ON THE SOIL PHYSICAL QUALITY OF AN OXISOL IN NO-TILLAGE

Soil management strategies to improve and maintain soil physical quality (SPhQ) are essential for the sustainability of intensive agricultural systems. The least limiting water range (LLWR) is an indicator of SPhQ defined by the range of least restrictive soil water content to plants, i.e., a soil water content within the LLWR indicates an appropriate SPhQ for plants. In this context, soil mulching with crop residues can contribute to the SPhQ by increasing the frequency at which soil water availability is maintained within the LLWR (F_{within}). The purpose of this study was to determine the LLWR of an Oxisol under no-tillage soybean and to evaluate F_{within} under application of oat residue (0; 3; 6; 9; and 12 Mg ha⁻¹) to the soil surface. An inverse relation of the LLWR with soil bulk density (Bd) was observed. With decreasing LLWR, F_{within} decreased, independently of the oat residue rate. However, an increase in residue application increased the F_{within} values, independent of the sampling position. The beneficial effect of the increase of residue amount on F_{within} depended on the amplitude of the LLWR. With the increase of Bd and reduction of LLWR, higher residue amounts on the soil did not result in an increase of F_{within} or of SPhQ, mainly when Db was close to the critical soil bulk density.

Index terms: no-tillage, soil physical quality, mulching, least limiting water range.

INTRODUÇÃO

Em sistemas agrícolas, os resíduos culturais na superfície protegem o solo contra o impacto direto das gotas de chuva (Igue, 1984), mantêm adequadas taxas de infiltração de água, reduzem as perdas de água e de solo por erosão hídrica (Hernani et al., 1997; Stone & Silveira, 1999) e proporcionam redução da taxa de evaporação de água pela reflexão da energia radiante (Baver et al., 1972). A redução total ou parcial da cobertura resulta em aumento nas perdas de solo das camadas superficiais mais férteis, reduzindo a capacidade produtiva (Lal et al., 1980). Por outro lado, o incremento da cobertura do solo se traduz em maiores teores de água no solo e em modificações de atributos físicos direta e indiretamente relacionados com o crescimento e a produção das plantas.

A presença de resíduos vegetais tem sido relacionada à qualidade física, principalmente por atuar na estabilidade de agregados do solo (Castro Filho et al., 1998; Vasconcelos et al., 2010). O suprimento contínuo de restos culturais fornece substrato e energia para a atividade microbiana do solo, formando agregados de maior estabilidade. O teor de água no solo (θ), por sua vez, pode ser mantido ou aumentado, dentro de certos limites, pela cobertura de sua superfície por restos culturais (Bragnolo & Mielniczuk, 1990; Zhai et al., 1990). Estudos mostram maiores teores de água em solos com maior quantidade de restos culturais em superfície (Oliveira et al., 2005; Peres et al., 2010).

A disponibilidade de água no solo (DAS) é um importante indicador de qualidade física. No entanto, a DAS leva em consideração apenas o

efeito do potencial da água no solo (Ψ) como fator limitante ao crescimento das plantas. O intervalo hídrico ótimo (IHO), além do Ψ , adiciona nos limites de água disponível os efeitos da resistência do solo à penetração (RP) e da porosidade de aeração (PA), estabelecidos pelo θ em que ocorrem valores críticos dessas propriedades ao crescimento das plantas. As propriedades físicas do solo integradas pelo IHO são expressas pela variação do θ em relação à densidade do solo (Ds) e, por isso, o IHO tem sido utilizado na avaliação da qualidade física em diferentes solos e sistemas de uso e manejo (Tormena et al., 1999; Klein & Câmara, 2007).

A frequência de ocorrência de θ dentro dos limites do IHO (F_{dentro}) determina o grau de limitações físicas às plantas em função de atributos intrínsecos do solo ou de condições estabelecidas pelos sistemas de manejo. Dessa forma, é possível quantificar a qualidade física de um solo com base na variação temporal do θ (Blainski et al., 2009), uma vez que variações do θ modificam o Ψ , a RP e a PA, os quais dependem da dinâmica de água no solo (Letey, 1985). Sistemas de manejo que proporcionem diminuição do IHO podem expor as culturas a uma maior frequência de estresses associados à reduzida taxa de difusão de gases sob elevados θ ou à excessiva RP em função do progressivo secamento do solo (Silva & Kay, 1997; Bengough et al., 2006). A compactação do solo, expressa pelo aumento da Ds, culmina em redução do IHO (Tormena et al., 1999; Imhoff et al., 2001; Cavalieri et al., 2006; Blainski et al., 2009) e pode aumentar a probabilidade de ocorrência de valores de θ fora dos seus limites (Silva & Kay, 1997; Klein & Câmara, 2007).

O aumento da quantidade de resíduos culturais sobre o solo pode contribuir para diminuição das

restrições físicas do solo às plantas, em razão do incremento nos teores de θ e manutenção dos seus valores dentro dos limites do IHO. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar o IHO em um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com a cultura da soja em sistema de plantio direto e a F_{dentro} em função de diferentes massas de resíduos de aveia-preta (*Avena strigosa*) na superfície do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na unidade de difusão de tecnologias da cooperativa agroindustrial COCAMAR, localizada no município de Maringá, Paraná (23°28'50" S e 52°00'08" W), com altitude média de 517 m e relevo suave ondulado. O clima da região foi classificado como subtropical úmido (Cfa), com precipitação pluvial média anual de 1.500 mm (Iapar, 2000). A estação chuvosa ocorre entre os meses de outubro e março, porém não há ocorrência de estação seca definida. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico (Embrapa, 2006). Com base na análise granulométrica (Embrapa, 1997), realizada na camada de 0–0,20 m, constataram-se teores médios de 40 g kg⁻¹ de areia, 170 g kg⁻¹ de silte e 790 g kg⁻¹ de argila.

O experimento foi realizado em área cultivada no sistema de plantio direto (SPD) por cinco anos consecutivos (2002 a 2006). Durante esse período, foram utilizadas as seguintes culturas (verão/inverno): soja/trigo, milho/aveia, soja/trigo, soja/trigo e soja/aveia. Os tratamentos consistiram em diferentes massas de resíduos de aveia-preta dispostos uniformemente sobre a superfície do solo. Essa gramínea tem sido largamente empregada em SPD, antecedendo os cultivos de soja e milho, devido ao seu alto rendimento de massa seca, facilidade de implantação, rusticidade, rapidez de formação de cobertura do solo, sistema radicular abundante e decomposição lenta da palhada (Silva et al., 2006). O rendimento da aveia-preta pode variar de 15 a 40 Mg ha⁻¹ de massa verde e de 2 a 11 Mg ha⁻¹ de matéria seca (Calegari, 2006).

Para instalação do experimento, inicialmente, toda a cobertura vegetal remanescente da cultura de inverno foi removida, deixando o solo completamente exposto; em seguida, em cada parcela experimental, com dimensões de 7,2 x 22 m (158 m²), foi realizada a redistribuição dos resíduos, constituindo cinco tratamentos, com as seguintes quantidades: 0, 3, 6, 9 e 12 Mg de matéria seca de aveia-preta por hectare. No dia 31 de outubro de 2006 foi efetuada a semeadura da cultura da soja (*Glycine max* cv. Coodetec 214 RR). A fertilização da cultura e as práticas para controle de pragas, doenças e plantas

daninhas foram realizadas conforme recomendação técnica para a cultura no Estado do Paraná (Embrapa, 2005).

Para cada tratamento, foram definidos, aleatoriamente, após o estabelecimento da cultura, 12 pontos para o monitoramento do θ e posterior amostragem de solo, sendo seis nas linhas e seis nas entrelinhas da cultura da soja. No período de 7 de dezembro de 2006 a 22 de fevereiro de 2007, foram realizadas, diariamente, medidas de θ por meio da técnica da TDR (Time Domain Reflectometry), conforme Topp et al. (1980), utilizando sondas de 0,20 m de comprimento instaladas verticalmente a partir da superfície do solo. Para utilização dessa tecnologia, procedeu-se à calibração do equipamento para as características intrínsecas ao solo estudado, utilizando um modelo empírico de relação entre a constante dielétrica (K_a), medida pelo equipamento, e o θ . O equipamento apresentou erro médio de $\theta \pm 0,005$ (m³ m⁻³). O monitoramento diário do θ estendeu-se desde a fase de crescimento vegetativo (V4) até a de maturação fisiológica (R7).

A coleta de amostras de solo indeformadas foi feita, em cada um dos cinco tratamentos, nas camadas de 0,00–0,10 e 0,10–0,20 m, distantes cerca de 0,20 m dos pontos onde foram instaladas as sondas de TDR, totalizando 24 amostras por tratamento (12 amostras em cada profundidade). A amostragem foi realizada no dia 2 de maio de 2007, cerca de 48 h após precipitação pluviométrica. Para obtenção das amostras, foram utilizados anéis metálicos com diâmetro e altura de 0,05 m. Imediatamente após a retirada, as amostras foram envolvidas em papel-alumínio e acondicionadas em sacos plásticos, até serem preparadas para análises. No laboratório, após devidamente preparadas, as amostras foram saturadas, mantendo-se uma lâmina de água de até dois terços da altura dos anéis. Para determinação da curva de retenção de água no solo (CRA) e da curva de resistência do solo à penetração (CRP), as amostras foram divididas em 12 grupos, contendo 10 amostras cada, os quais foram drenados nos potenciais de -20, -40, -60, -80 e -100 hPa, estabelecidos por meio da diferença de nível em uma coluna de água utilizando uma mesa de tensão (Romano et al., 2002), e nos potenciais de -300, -500, -700, -1.000, -2.000, -4.000 e -15.000 hPa, aplicados por meio de pressões em placas porosas, conforme Dane & Hopmans (2002). Após atingirem o equilíbrio em cada potencial, as amostras foram pesadas, sendo a RP determinada utilizando-se um penetrômetro eletrônico similar ao descrito por Tormena et al. (1998). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a ± 105 °C por 24 h, para determinação de θ e da Ds (Blake & Hartge, 1986).

A CRA foi expressa pela relação entre θ e Ψ , conforme Ross et al. (1991). A Ds foi incorporada ao

modelo seguindo o procedimento descrito por Leão et al. (2005), conforme equação 1:

$$\theta = a\Psi^b D_s^c \quad (1)$$

em que θ : teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$); Ψ : módulo do potencial da água no solo (hPa); D_s : densidade do solo ($Mg m^{-3}$); e a, b, c : coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 1.

Os dados de RP foram ajustados de acordo com o θ e a D_s , utilizando a função não linear proposta por Busscher (1990), definindo a curva de resistência do solo à penetração (CRP) descrita na equação 2:

$$RP = d\theta^e D_s^f \quad (2)$$

em que RP: resistência do solo à penetração (MPa); e d, e, f : coeficientes obtidos no ajuste dos dados à equação 2.

O IHO foi determinado de acordo com os procedimentos descritos em Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1999). Os valores críticos de θ associados aos potenciais equivalentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente foram o Ψ de -60 hPa (Reichardt, 1988) e -15.000 hPa (Savage et al., 1996). Em cada amostra foi calculado um valor de θ em que a porosidade de aeração equivalesse a 10 % (θ_{PA}), o qual tem sido adotado como mínimo para garantir uma taxa de difusão de oxigênio adequada para o desenvolvimento vegetal da maioria das espécies cultivadas (Grable & Siemer, 1968). O θ_{PA} foi determinado por meio da expressão $[(1-D_s/D_p)-0,1]$, sendo D_p a densidade média de partículas. Foi utilizado um valor médio de $D_p = 2,85 Mg m^{-3}$, determinado conforme Embrapa (1997), para o solo da área em questão. O valor de RP considerado restritivo para o crescimento de raízes foi de 3,5 MPa. Esse valor foi adotado devido à presença de bioporos estáveis e contínuos, que atuam como rotas alternativas para o crescimento das raízes, assim como sugerido por Ehlers et al. (1983) e utilizado por Tormena et al. (2007) em sistema de plantio direto. Para determinação do θ em que a RP = 3,5 MPa (θ_{RP}), utilizou-se a equação 2, reescrita na forma da equação 3.

$$\theta_{RP} = \left[\left(\frac{RP}{d D_s^f} \right)^{\frac{1}{e}} \right] \quad (3)$$

O IHO foi determinado considerando-se como limite superior o menor valor de θ entre θ_{CC} e θ_{PA} e, como limite inferior, o maior valor de θ entre θ_{PMP} e θ_{RP} . Após a determinação do IHO, cada valor de θ medido no campo foi comparado com os limites estabelecidos por este indicador, para cada ponto, em função da D_s e calculou-se a frequência de ocorrência de θ dentro dos limites do IHO (F_{dentro}). A F_{dentro} foi determinada para diferentes valores

de D_s e para as diferentes massas de resíduos de aveia dispostas sobre a superfície do solo. A fim de avaliar a distribuição da F_{dentro} para diferentes condições físicas do solo, com base no conceito do IHO, foram determinados valores de D_s de acordo com a distribuição normal acumulada, em função do conjunto de amostras coletadas. Dessa forma, a F_{dentro} foi calculada para valores de D_s crescentes, equivalentes à 5, 10, 25, 50 e 75 % da distribuição normal acumulada, e equivalente à densidade do solo crítica estabelecida como aquela em que o IHO=0 (D_{sc}).

Os ajustes das equações 2 e 3 e a estatística descritiva dos dados de D_s, θ e RP foram feitos por meio do programa estatístico Statistica for Windows (Stat Soft, 1993).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição estatística para as variáveis D_s, θ e RP é mostrada no quadro 1, onde observa-se ampla faixa de valores dessas variáveis – necessária para ajustar os modelos da CRA e da CRP. A RP apresentou elevado coeficiente de variação (CV), em concordância com resultados obtidos por Imhoff et al. (2001), Tormena et al. (2007) e Blainski et al. (2009). O elevado CV para a variável RP pode ser atribuído à variação de D_s e θ entre as amostras de solo (Tormena et al., 2007), que alteram a coesão e a fricção entre as partículas. A variação de D_s é resultante da heterogeneidade do solo, principalmente em função da coleta de amostras nas posições entrelinha e linha de cultivo. Já a variação do θ foi atribuída aos potenciais aos quais as amostras de solo foram submetidas, compreendidos entre -20 e -15.000 hPa.

Os coeficientes e parâmetros estatísticos do ajuste das equações 1 e 2 aos dados experimentais são apresentados no quadro 2. O intervalo de confiança dos coeficientes dos modelos não inclui o valor zero, possibilitando afirmar que estes foram estatisticamente significativos (Glantz & Slinker, 1990; Imhoff et al., 2000) a 1 % de probabilidade. Os resíduos apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk, indicando ajuste adequado dos modelos aos dados experimentais. Não houve efeito significativo da profundidade de amostragem ($p < 0,05$) no ajuste da CRA e da CRP, o que possibilitou o ajuste de um único modelo para todo o conjunto de dados.

De acordo com a CRA, expressa pelo modelo ajustado, o θ foi positivamente influenciado pela D_s , cujos resultados são similares aos verificados por Betz et al. (1998), Tormena et al. (1999) e Araújo et al. (2004). Para elevados potenciais matriciais, esse comportamento deve-se à redistribuição do tamanho

Quadro 1. Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo na entrelinha (D_{SEL} , $Mg\ m^{-3}$) e na linha (D_{SL} , $Mg\ m^{-3}$), teor de água no solo (θ , $m^3\ m^{-3}$) e resistência do solo à penetração (RP, MPa). CV: coeficiente de variação (%)

| Variável | Mínimo | Média | Máximo | Desvio-padrão | CV (%) |
|-----------|--------|-------|--------|---------------|--------|
| D_{SEL} | 1,13 | 1,35 | 1,49 | 0,088 | 6,6 |
| D_{SL} | 1,01 | 1,26 | 1,47 | 0,124 | 9,8 |
| θ | 0,31 | 0,43 | 0,54 | 0,054 | 12,5 |
| RP | 0,07 | 2,85 | 7,82 | 1,773 | 62,2 |

Quadro 2. Estimativas dos coeficientes de regressão para a CRA ($\theta = a\Psi^b Ds^c$) e para CRP ($RP = d\theta^e Ds^f$)

| Coeficiente | Estimativa | Erro-padrão | Intervalo de confiança | |
|---|------------|-------------|------------------------|-----------------|
| | | | Limite inferior | Limite superior |
| Curva de retenção de água no solo - CRA ($P > F = 0,001$) | | | | |
| a | 0,4671 | 0,012 | 0,456 | 0,503 |
| b | -0,0466 | 0,003 | -0,054 | -0,042 |
| c | 0,6945 | 0,062 | 0,507 | 0,752 |
| Curva de resistência do solo à penetração - CRP ($P > F = 0,001$) | | | | |
| d | 0,0036 | 0,001 | 0,001 | 0,006 |
| e | -4,6601 | 0,345 | -5,661 | -4,294 |
| f | 9,4241 | 0,507 | 7,791 | 9,799 |

θ é teor de água no solo ($m^3\ m^{-3}$), Ds é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$), RP é a resistência do solo à penetração (MPa) e Ψ é o módulo do potencial de água no solo (hPa)

de poros, com aumento na proporção de poros de menor diâmetro, que torna o solo mais eficiente na retenção de água. Com o secamento do solo, a maior massa de sólidos por unidade de área, expressa pelo aumento de Ds , contribuiu para o aumento do θ devido à maior adsorção de água e maior volume de poros de diâmetro reduzido (Blainski et al., 2009).

A RP variou positivamente com a Ds e negativamente com o θ , em concordância com os resultados obtidos por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998), Imhoff et al. (2001) e Leão et al. (2004). O aumento da RP com a Ds pode ser atribuído à compactação do solo, que resulta em maior fricção entre as partículas. No caso da redução da RP com o aumento do θ , isso se deve ao efeito lubrificante de água, além da redução da coesão entre as partículas na matriz do solo.

Na figura 1 verifica-se redução do IHO com o aumento da Ds , conforme já estabelecido por Silva et al. (1994), Leão et al. (2005) e Cavalieri et al. (2006). O limite superior do IHO foi determinado pelo θ_{CC}

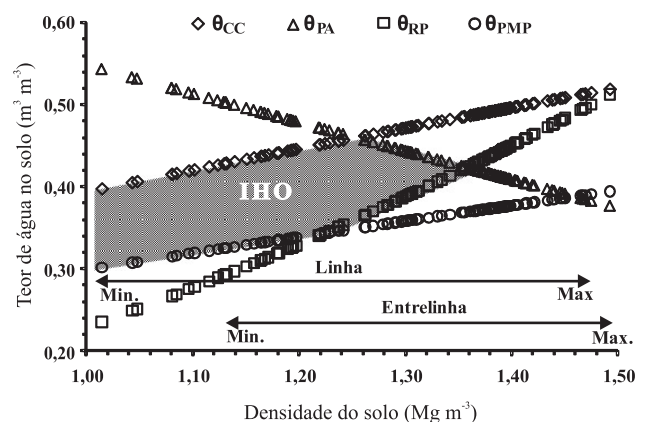


Figura 1. Variação do teor de água com a densidade do solo em relação à capacidade de campo (θ_{CC}), porosidade de aeração (θ_{PA}), resistência do solo à penetração (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}). A área hachurada representa o IHO. As linhas horizontais representam a distribuição de Ds , obtidas na entrelinha e linha de cultivo.

para $D_s < 1,26 \text{ Mg m}^{-3}$; para $D_s > 1,26 \text{ Mg m}^{-3}$, o limite superior do IHO passou a ser determinado pelo θ_{PA} (Figura 1), indicando diminuição dos macroporos, que são poros responsáveis pela drenagem de água e difusão de gases no solo.

O limite inferior do IHO foi determinado pelo θ_{RP} para $D_s > 1,22 \text{ Mg m}^{-3}$. Para $D_s > 1,22 \text{ Mg m}^{-3}$, medidas que promovam a redução da RP ou ampliação dos limites críticos de RP deveriam ser implementadas a fim de ampliar o IHO. Com esse objetivo, práticas mecânicas que culminem na redução da D_s , associadas à adoção de sistemas de manejo que proporcionem incremento de θ visando à manutenção da RP abaixo do limite crítico estabelecido ou à criação de poros alternativos para o crescimento das raízes em uma matriz mais densa, deveriam ser implementadas. A amplitude do IHO variou de 0 a $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que é característico de solos dessa classe textural (Tormena et al., 1999, 2007; Blainski et al., 2009), considerando o valor crítico de RP adotado. A D_{sc} , definida como interseção dos limites superior e inferior do IHO (Leão et al., 2004), foi de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 1). O θ em que a $RP = 3,5 \text{ MPa}$ foi a variável que mais frequentemente reduziu o IHO com o aumento da D_s , em concordância com resultados obtidos por Tormena et al. (1999) e Blainski et al. (2009).

A variação do θ médio para cada tratamento e posição de amostragem é mostrada na figura 2. O θ médio foi maior na entrelinha em comparação com a linha de cultivo. Esse comportamento pode ser atribuído a dois fatores distintos: redistribuição do tamanho de poros associado à variação de D_s entre as posições de amostragem (Quadro 1), uma vez que com o aumento da D_s na entrelinha há maior proporção de poros de menor diâmetro, que são mais eficientes na retenção de água; e maior concentração de raízes na linha de cultivo, que contribuiu para redução do θ em função da demanda hídrica das plantas. Nessas condições, a evapotranspiração da cultura pode variar de $4,5$ a $7,5 \text{ mm dia}^{-1}$ (Doorembos & Kassam, 1994), contribuindo significativamente para a redução do θ nessa posição de amostragem.

Considerando a análise de F_{dentro} , das variáveis que caracterizaram os limites do IHO, o θ_{PA} pouco contribuiu para a sua redução. Somente no tratamento com massa de resíduos de 12 Mg ha^{-1} , na posição entrelinha, e para $D_s > 1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ foi constatada a ocorrência de $\theta > \theta_{PA}$. Resultados similares foram obtidos por Blainski et al. (2008), os quais, contudo, constataram que a aeração do solo não prejudicou o desenvolvimento vegetal em Latossolo Vermelho distrófico. Entretanto, a ocorrência do $\theta < \theta_{RP}$ caracterizou a redução da F_{dentro} , sugerindo que nesse solo a principal limitação física a que as plantas estão sujeitas é a elevada RP, ocasionada pela elevada D_s e, ou, pelo baixo θ .

A influência da massa de resíduos sobre a F_{dentro} para as diferentes posições de amostragem é mostrada no quadro 3. O efeito benéfico ocasionado pela manutenção dos restos culturais de aveia-preta sobre a superfície do solo ficou evidente, uma vez que a F_{dentro} aumentou com o incremento da massa de resíduos sobre a superfície do solo para diferentes valores de D_s . Entretanto, com a compactação do solo, o aumento da massa de resíduos proporcionou elevação da F_{dentro} até o valor de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$, caracterizando um valor de D_s a partir do qual pode-se atribuir elevada degradação física do solo. Na linha de cultivo, a redução da D_s contribuiu para a maior eficiência da cobertura vegetal do solo na manutenção da F_{dentro} , em comparação à entrelinha da cultura (Quadro 3).

Para a $D_s = 1,20 \text{ Mg m}^{-3}$, no tratamento sem cobertura do solo (Quadro 3), a F_{dentro} foi de $61,4 \%$ na posição entrelinha, ou seja, o θ permaneceu dentro dos limites do IHO em $61,4 \%$ do período monitorado. Para a mesma D_s ($1,20 \text{ Mg m}^{-3}$) com 12 Mg ha^{-1} de matéria seca sobre a superfície do solo, a F_{dentro} foi de 100% (Quadro 3), ou seja, nesta condição, durante o período monitorado, não foram constatadas restrições físicas do solo que comprometessem o desenvolvimento da cultura. Para a $D_s = 1,18 \text{ Mg m}^{-3}$, na linha de cultivo, o efeito da cobertura do solo sobre o θ proporcionou valores de F_{dentro} de $9,1$; 25 ; $45,5$; $77,3$; e $90,9 \%$, respectivamente, para os tratamentos com cobertura do solo de 0 , 3 , 6 , 9 e 12 Mg ha^{-1} (Quadro 3). Contudo,

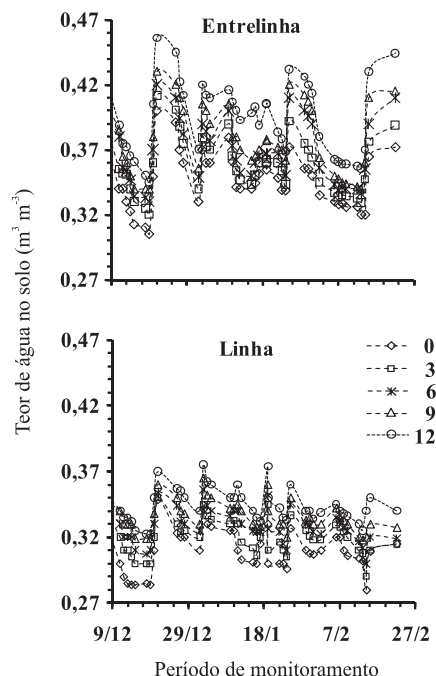


Figura 2. Variação do θ médio na camada de $0,00$ – $0,20 \text{ m}$ dos tratamentos com massas de resíduos de aveia-preta equivalentes a 0 , 3 , 6 , 9 e 12 Mg ha^{-1} e nas posições entrelinha e linha de cultivo.

Quadro 3. Análise da frequência de θ dentro dos limites do IHO (F_{dentro}) para diferentes quantidades de resíduos de aveia-preta e posição de amostragem para valores de densidade do solo definidos com base na distribuição acumulada

| Distribuição acumulada de Ds | Ds | IHO | F_{dentro} (%) | | | | |
|------------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------|------|------|------|------|
| | | | Massa de resíduos | | | | |
| | | | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 |
| % | Mg m ⁻³ | m ³ m ⁻³ | Mg ha ⁻¹ | | | | |
| | | | Entrelinha | | | | |
| 5 | 1,20 | 0,11 | 61,4 | 79,5 | 86,4 | 97,7 | 100 |
| 10 | 1,24 | 0,10 | 45,5 | 63,6 | 72,7 | 81,8 | 97,7 |
| 25 | 1,29 | 0,07 | 4,5 | 15,9 | 36,4 | 45,5 | 61,4 |
| 50 | 1,35 | 0,01 | 0 | 0 | 2,3 | 6,8 | 11,4 |
| 53 ⁽¹⁾ | 1,36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 75 | 1,41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | Linha | | | | |
| 5 | 1,06 | 0,10 | 50 | 81,8 | 95,5 | 100 | 100 |
| 10 | 1,10 | 0,10 | 31,8 | 54,5 | 79,5 | 90,9 | 100 |
| 25 | 1,18 | 0,11 | 9,1 | 25 | 45,5 | 77,3 | 90,9 |
| 50 | 1,26 | 0,09 | 0 | 0 | 0 | 6,8 | 18,2 |
| 75 | 1,34 | 0,02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 79 ⁽¹⁾ | 1,36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

⁽¹⁾ Equivalente à densidade do solo crítica na respectiva posição de amostragem.

para Ds próxima à Dsc (1,36 Mg m⁻³), o efeito benéfico oriundo do aumento de θ não traduziu-se em aumento da F_{dentro} , visto que nessas condições a amplitude do IHO é extremamente reduzida ou nula. Uma hipótese baseada nesses resultados é a de que o aumento da cobertura do solo se traduz em aumento da F_{dentro} , porém condicionada à Ds. Com o aumento da compactação, o incremento do θ oriundo da redução da taxa de evaporação do solo em função da cobertura do solo não foi suficiente para manutenção de $\theta > \theta_{RP}$, sugerindo a adoção de medidas de descompactação para a melhoria da QFS.

Apesar da similaridade dos valores de Ds citados, na entrelinha e linha de cultivo, estes correspondem, respectivamente, a 5 e 25 % da distribuição acumulada de valores (Quadro 3), ou seja, na entrelinha, somente 5 % dos valores de Ds são menores ou iguais a 1,20 Mg m⁻³, ao passo que na linha de cultivo 25 % dos valores de Ds são iguais ou inferiores a 1,18 Mg m⁻³. Assim, além do efeito da massa de resíduos depositada sobre a superfície do solo, a F_{dentro} foi influenciada pela posição de amostragem, sendo maior na linha de cultivo, devido aos menores valores de Ds, mesmo com os menores valores de θ medidos nessa posição (Figura 2). Resultados similares foram obtidos por Collares et al. (2006), sugerindo maior vulnerabilidade à redução de produtividade das culturas em função da redução da amplitude do IHO ocasionada pela maior frequência de valores de Ds > Dsc.

De acordo com os resultados deste estudo, a cobertura do solo por resíduos de aveia-preta pode ser uma estratégia de manejo eficiente para

diminuição das restrições físicas às plantas que são fortemente influenciadas pelo θ . A utilização dessa gramínea para produção de matéria seca pode alcançar quantidades superiores a 12 Mg ha⁻¹ (Demetrio, 2009). Entretanto, essa quantidade pode ser aumentada quando cultivada em consórcio com outras plantas forrageiras ou de cobertura.

Com a compactação do solo, o acréscimo de cobertura do solo não promoveu ganhos de qualidade física. A quantidade de resíduos vegetais sobre a superfície do solo também é determinante: com o aumento da Ds, é necessário maior quantidade de resíduos em cobertura a fim de obter aumento da F_{dentro} . Uma melhoria na qualidade física, expressa pela redução da Ds, pode resultar em maiores valores de F_{dentro} sob menores quantidades de cobertura vegetal (Quadro 3). Diante disso, o controle da compactação é determinante para manutenção da QFS sob plantio direto, mesmo com elevada quantidade de resíduos em cobertura. Os resultados deste estudo sugerem que o IHO é indicador robusto de qualidade física dos solos agrícolas; juntamente com o monitoramento do θ , ele pode ser utilizado para quantificar a F_{dentro} , bem como identificar as principais limitações físicas e adotar melhores técnicas de manejo do solo.

CONCLUSÕES

1. O aumento da densidade do solo resultou em estreitamento do IHO, com conseqüente redução

da frequência de ocorrência do teor de água dentro desses limites.

2. O aumento na quantidade de resíduos de aveia-preta na superfície do solo proporcionou incrementos da frequência de ocorrência do teor de água no solo dentro dos limites do IHO, independentemente da posição de amostragem.

3. O efeito benéfico da cobertura do solo sobre a frequência de ocorrência do teor de água no solo dentro dos limites do IHO é dependente da amplitude do IHO determinado pela densidade do solo. Com o aumento de densidade do solo em direção ao valor crítico, o aumento na quantidade de resíduos não se traduziu em melhoria da qualidade física.

LITERATURA CITADA

- 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.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. Soil structure: Evaluation and agricultural significance. In: BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R., eds. *Soil physics*. 4.ed. New York, J. Wiley, 1972. p.178-223.
- BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; McKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J. & VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: Growth dynamics from field to cell. *J. Exper. Bot.*, 57:437-447, 2006.
- BETZ, C.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.
- BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V. & GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférico irrigado. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:273-281, 2009.
- BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & GUIMARÃES, R.M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:975-983, 2008.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. Part 1. p.363-375.
- BRAGNOLO, N. & MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:369-374, 1990.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 33:519-524, 1990.
- CALEGARI, A. Plantas de cobertura. In: CASÃO, J.R.; SIQUEIRA, R.; MENTA, Y.R. & PASSINI, J.J., eds. *Sistema de plantio direto com qualidade*. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná/Itaipu Binacional, 2006. 212p.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. & PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:527-538, 1998.
- 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.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.K. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:1663-1674, 2006.
- 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, 2002 v.4. p.688-690.
- DEMETRIO, J.V. Rendimento de biomassa de genótipos de aveia submetidos a diferentes épocas de corte no sistema de integração lavoura-pecuária. Marechal Cândido Rondon, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2009. 74p. (Tese de Mestrado)
- DOORENBOS, J. & KASSAN, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande, UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e drenagem, 33)
- EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Tillage Res.*, 3:261-275, 1983.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p. (Embrapa-CNPQ. Documentos, 1)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos; Brasília, Sistema de Produção de Informação, 2006. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Embrapa Soja. Tecnologias de produção de soja - Paraná 2006. Londrina, 2005. 208p.
- GLANTZ, S.A. & SLINKER, B.K. Primer of applied regression and analysis of variance. New York, McGraw-Hill, 1990. 770p.
- 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.
- HERNANI, L.C.; SALTON, J.C.; FABRÍCIO, A.C.; DEDECEK, R. & ALVES JÚNIOR, A. Perdas por erosão e rendimentos de soja e trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). *R. Bras. Ci. Solo*, 21:667-676, 1997.
- IGUE, K. Dinâmica da matéria orgânica e seus efeitos nas propriedades do solo. In: FUNDAÇÃO CARGIL. *Adubação verde no Brasil*. Campinas, 1984. p.232-267.

- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Aplicação da curva de resistência do solo à penetração no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:1493-1500, 2000.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação das pressões crítica para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18, 2001.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. Cartas climáticas do Paraná: edição ano 2000. versão 1.0. Londrina, 2000. CD ROM.
- KLEIN, V.A. & CÂMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:221-227, 2007.
- LAL, R.; VLEESHAWER, D. & NGANJE, R.M. Changes in properties of a newly cleared tropical Alfisol as affected by mulching. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:827-839, 1980.
- 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 soils. *Agron. J.*, 97:1210-1215, 2005.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- OLIVEIRA, M.L.; RUIZ, H.A.; DA COSTA, L.M. & SCHAEFER, C.E.G.R. Flutuações de temperatura e umidade do solo em resposta à cobertura vegetal. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 9:535-539, 2005.
- PERES, J.G.; SOUZA, C.F. & LAVORENTI, N.A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. *Eng. Agric.*, 30:875-886, 2010.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.
- 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, 2002. v.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.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. *Agron. J.*, 88:644-651, 1996.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:884-888, 1997.
- 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, P.R.F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; STRIDER, M.L. & SILVA, A.A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo de milho em sucessão no sistema de semeadura direta. *Ci. Rural*, 36:1011-1020, 2006.
- STAT SOFT. *Statistica for Windows*. [Eletronic manual index], v.4.3, Tulsa, 1993.
- STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:83-91, 1999.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Res. Res.*, 16:574-582, 1980.
- TORMENA, C.A.; ARAUJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Tillage Res.*, 52:223-232, 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.
- 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.
- VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; OLIVEIRA, V.S.; COSTA, Y.D.J. & CAVALCANTE, D.M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:309-316, 2010.
- ZHAI, R.; KACHANOSKI, R.G. & VORONEY, R.P. Tillage effects on the spatial and temporal variation of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:186-192, 1990.