

Qualidade Física do Solo em Sistemas de Preparo Convencional e Plantio Direto em Latossolo do Cerrado





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1676-918X

Julho, 2006

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 171

Qualidade Física do Solo em Sistema de Preparo Convencional e Plantio Direto em Latossolo de Cerrado

João de Deus G. Santos Junior
Marcos Aurélio Carolino de Sá
Thomaz Adolpho Rein

Planaltina, DF
2006

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*

Secretária-Executiva: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Revisão de texto: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Normalização bibliográfica: *Shirley da Luz Soares*

Capa: *Jussara Flores de Oliveira*

Editoração eletrônica: *Jussara Flores de Oliveira*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Jaime Arbués Carneiro

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição

1ª impressão (2006): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação na publicação.
Embrapa Cerrados.

S237q Santos Junior, João de Deus G.

Qualidade física do solo em sistema de preparo convencional e plantio direto em latosso de Cerrado / João de Deus G. Santos Junior, Marcos Aurélio Carolino de Sá, Thomaz Adolpho Rein. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2006.

27 p. — (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X ; 171)

1. Fertilidade do solo. 2. Cerrado. 3. Irrigação. I. Sá, Marcos Aurélio Carolino de. II. Rein, Thomaz Adolpho. III. Série.

633.2 - CDD 21

© Embrapa 2006

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução	7
Material e Métodos	8
Local e histórico da área experimental	8
Delineamento experimental	9
Implantação e manejo da cultura	9
Amostragens do solo	10
Atributos físico-hídricos do solo	10
Intervalo hídrico ótimo (IHO)	11
Amostragens e medições na parte aérea	13
Análises estatísticas	13
Resultados e Discussão	14
Conclusões	24
Agradecimentos	25
Referências	25

Qualidade Física do Solo em Sistema de Preparo Convencional e Plantio Direto em Latossolo de Cerrado

João de Deus G. Santos Junior¹

Marcos Aurélio Carolino de Sá²

Thomaz Adolpho Rein³

Resumo – Menor desenvolvimento inicial em plantas de soja (safra 2004/2005) foi observado em plantio direto (PD) em comparação ao plantio convencional (PC) em área experimental da Embrapa Cerrados. Diferenças visuais no sistema radicular sugeriram adensamento superficial no PD. Nesse local, avaliaram-se as alterações nos atributos físicos do solo relacionados aos sistemas de preparo e ao crescimento do milho cultivado, em sucessão à soja, na safra 2005/2006. O delineamento experimental foi em blocos completos ao acaso, com quatro repetições. Atributos físico-hídricos do solo, intervalo hídrico ótimo (IHO), parâmetro S e índice de cone determinado a campo (IC_{campo}) foram avaliados como indicadores da qualidade física do solo. Os sistemas de preparo diferenciaram-se significativamente na taxa de crescimento em altura, mas não quanto ao rendimento de grãos. O parâmetro S não foi sensível aos sistemas de manejo. O IC_{campo} observado no PD foi significativamente superior ao do PC, principalmente nas camadas superficiais, comprovando a hipótese de maior resistência à penetração de raízes em PD. Contudo, os sistemas de manejo não se diferenciaram quanto aos valores de densidade do solo, mas sim quanto à água disponível e ao IHO.

Termos para indexação: água disponível, densidade, intervalo hídrico ótimo, parâmetro S, resistência à penetração.

¹ Eng. Agrôn., D.Sc., Embrapa Cerrados, jdsantos@cpac.embrapa.br

² Eng. Agrôn., D. Sc., Embrapa Cerrados, carolino@cpac.embrapa.br

³ Eng. Agrôn., Ph.D., rein@cpac.embrapa.br

Soil Physical Quality under Conventional and No-Till Systems in Cerrado Oxisoil

Abstract – *It was observed in a long-term experiment on soil tillage and fertilization carried out at Embrapa Cerrados slower growth of soybean (growing season 2004/2005) cultivated under no-till (PD) compared to conventional tillage (PC). Visual differences in the root morphology suggested that the top soil under no-till system was more compacted than under PC. Subsequently, it was evaluated in the same experiment, in a randomized complete block design with four replications, the effect of tillage treatment on soil physical attributes and the growth of maize cultivated in succession to soybean during the growing season 2005/2006. The soil physical attributes least limiting water range (IHO), S-parameter and cone index (IC_{campo}) were evaluated to assess the physical quality. The effect of tillage systems was significant in relation to the growth rate but there was no difference regarding the grain yields. S-parameter did not differ between tillage systems. The IC_{campo} observed in PD was significantly higher than in PC, particularly in the top layers, supporting the hypothesis that in PD there is more soil resistance to root growth. The management systems did not differ regarding the bulk density values, but differed in relation to the available water content and least limiting water range.*

Index terms: available water content, bulk density, least limiting water range, S-theory, soil resistance.

Introdução

A compactação predispõe o solo à erosão pela degradação da sua estrutura, o que contribui para diminuir a infiltração de água e o aumento do escoamento superficial. Nos casos mais drásticos, pode ocorrer rompimento de terraços, resultando em perdas de água e solo e, conseqüentemente, assoreamento e poluição de cursos d'água. Em sistemas de sequeiro, camadas compactadas aumentam o risco de susceptibilidade das culturas a veranicos e, em sistemas irrigados, aumentam a necessidade de água, resultando em maior consumo de energia.

Na caracterização de camadas compactadas num perfil de solo, têm sido utilizados métodos empíricos, como visualização das raízes em trincheiras, ou mesmo ensaios de resistência à penetração e avaliações de densidade. Entretanto, é necessário o conhecimento de uma série de outros fatores associados ao solo e ao crescimento de plantas para sua correta interpretação.

Observações recentes na área experimental da Embrapa Cerrados mostraram menor desenvolvimento inicial de plantas de soja (safra 2004/2005) sob plantio direto (PD) em comparação ao plantio convencional (PC) com irrigação suplementar em ambos os sistemas. Plantas amostradas revelaram diferenças no sistema radicular, com as plantas sob PC exibindo raiz pivotante típica, enquanto no PD exibiam a raiz pivotante dobrada lateralmente poucos centímetros abaixo da superfície, ou mesmo ausência de raiz primária dominante (Fig. 1). As diferenças no porte das plantas praticamente desapareceram depois do início do enchimento de grãos, mas tais diferenças no sistema radicular sugeriram a presença de adensamento superficial no PD causando impedimento mecânico ao crescimento das raízes. Nessa área experimental, objetivou-se avaliar as alterações nos atributos físicos do solo relacionados aos sistemas de preparo e ao crescimento do milho cultivado, em sucessão à soja, na safra 2005/2006.



Fig. 1. Sistema radicular de plantas de soja cultivadas: (a) sob preparo convencional e (b) plantio direto em solo de Cerrado.

Material e Métodos

Local e histórico da área experimental

O experimento foi instalado em 1998, na Embrapa Cerrados, num Latossolo Vermelho com 550 g/kg de argila e cultivado há aproximadamente 20 anos sob preparo anual do solo e predominantemente com soja. A área apresentava elevada fertilidade, mas, para que não houvesse fatores limitantes aos rendimentos das culturas, foi efetuada aplicação de corretivos (calcário para elevar a saturação por bases a 60 % e gesso agrícola) e fertilizantes (fósforo e micronutrientes) a lanço e incorporados com arado de discos seguido de grade aradora e niveladora. Antes da aplicação dos produtos, foi efetuada subsolagem na profundidade de 45 cm no início da estação chuvosa de 1998, com o solo ainda seco abaixo de 35 cm. A área foi cultivada com soja no ano agrícola 1998/1999 e, a partir de então, com a rotação soja-milho, foram estabelecidas faixas cultivadas posteriormente sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) do solo com arado de discos seguido de grade niveladora. Neste experimento, vem sendo estudada a adubação nitrogenada para o milho em rotação anual com soja. Milheto, como cultura de cobertura, é semeado no final da estação chuvosa depois da colheita da soja, antecedendo o cultivo do milho.

Delineamento experimental

O delineamento do experimento foi em blocos completos ao acaso, com quatro repetições e tratamentos dispostos em parcelas subdivididas. Nas parcelas, na forma de duas faixas paralelas em cada bloco e perpendicular ao declive, foram alocados os dois tratamentos de preparo do solo (PD e PC) e, nas sub-parcelas, com 5,6 m de largura por 8,0 m de comprimento, oito tratamentos de adubação nitrogenada (N) para o milho. Neste trabalho, foi avaliado o tratamento com aplicação de N de 100 kg/ha, dos quais 40 kg/ha e 60 kg/ha na semeadura e no estágio de oito folhas, respectivamente. A escolha desse tratamento deveu-se ao fato de ser o parcelamento mais próximo do utilizado no sistema agrícola praticado na região. Também inferiu-se que o parcelamento não teria efeito nos atributos físicos do solo de interesse neste estudo.

Implantação e manejo da cultura

O milho, híbridos simples Pioneer de ciclo médio, também utilizado nos cultivos anteriores, foi semeado manualmente no mês de novembro de 2005, no espaçamento de 0,80 m entre linhas, com excesso de sementes para população final de 62.500 plantas/ha após desbaste. Ervas daninhas foram controladas com mistura de *Atrazine* e *Metolachlor* aplicada com pulverizador de barra em toda a área experimental logo depois do plantio. Para propiciar o plantio e a adubação individualizada por parcela na linha de semeadura, toda a área experimental foi sulcada na profundidade de aproximadamente 8 cm com sulcador pequeno tratorizado (espaçamento de 0,80 m). A adubação de plantio foi efetuada com semeadora manual "Almaco" com distribuidor tipo cone e engrenagem para distribuir a dose da mistura de fertilizantes em oito metros lineares, permitindo distribuição uniforme na linha. Os fertilizantes foram pesados para cada linha e misturados no momento da adubação. Para cada linha, foi aplicada a mistura correspondente a 120 kg/ha de P_2O_5 e 10 kg/ha de S na forma de superfosfatos, 50 kg/ha de K_2O na forma de cloreto de potássio, e o nitrogênio na forma de uréia na dose de 40 kg/ha. Nos tratamentos avaliados, juntamente com a adubação nitrogenada em cobertura (60 kg/ha), foi aplicada a dose de K_2O de 50 kg/ha como cloreto de potássio. A cultura do milho teve irrigação suplementar por aspersão durante os veranicos, quando tensiômetros instalados na profundidade de 10 cm acusaram leituras de 60 kPa, aplicando lâminas de 20 mm. Lagarta do cartucho foi controlada com inseticidas a base de *Deltamethrin*, *Chlorpyrifos* e *Triflururon*.

Amostragens do solo

Nas subparcelas amostradas em cada sistema de preparo do solo, foram retirados 15 anéis volumétricos de 5 cm de altura por 5 cm de diâmetro. As amostragens foram realizadas em três pontos de uma linha diagonal, equidistantes entre si, com pontos extremos a 1,5 m da borda da parcela, nas entrelinhas da cultura e no ponto médio das profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm. Adicionalmente, foram retirados 15 anéis volumétricos em solo sob vegetação de Cerrado, próximo ao experimento e nas mesmas profundidades, para a determinação dos valores de densidade.

Por ocasião da amostragem indeformada do solo, medidas de índice de cone (IC_{campo}) foram tomadas com o uso de penetrógrafo dinamométrico manual. Os valores de IC_{campo} em MPa foram obtidos para as profundidades de 5, 15, 25, 35 e 45 cm. Foram realizadas 12 repetições dispostas transversalmente na parcela, na posição espacial entrelinhas de plantio.

Atributos físico-hídricos do solo

As 120 amostras indeformadas coletadas foram utilizadas para o cálculo dos valores de densidade do solo (Ds) e conteúdo volumétrico de água no momento da amostragem (qv) de acordo com Libardi (2000). Destas, 40 amostras coletadas no ponto central das subparcelas foram utilizadas para determinação da curva de retenção de água no solo (CRA) pelo método da centrífuga (FREITAS JR.; SILVA, 1984). Uma vez equilibradas as amostras nos potenciais de 0,000; 0,006; 0,010; 0,033; 0,060; 0,100 e 1,500 MPa, foram calculados:

1) CRA: ajustada utilizando a função de Van Genuchten (1980), adotando a restrição para $m = 1-1/n$.

Assim:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha \Psi)^n]^{1-1/n} \quad (1)$$

Em que: θ (m^3/m^3) é o conteúdo de água volumétrico; θ_r e θ_s (m^3/m^3) são os conteúdos de água residual e saturado, respectivamente; Ψ (hPa) é a tensão de água no solo (módulo do potencial mátrico) e α e n são outros parâmetros de ajuste do modelo.

2) Parâmetro S: calculado de acordo com Dexter (2004a,b,c).

Assim:

$$S = n(\theta_s - \theta_r)[2n - 1/n - 1]^{(1/n) - 2} \quad (2)$$

O sinal negativo associado ao parâmetro n , originalmente descrito por Dexter (2004a), na equação 2, foi suprimido uma vez que o ajuste da CRA foi realizado com o módulo do potencial mátrico ou tensão de água no solo.

3) Outros atributos físico-hídricos: a relação entre o conteúdo de água na amostra saturada ($\Psi = 0$) e o volume de solo amostrado foi utilizada no cálculo da porosidade total do solo (POR). Empiricamente, os poros do solo foram classificados em: (a) microporos (MICPOR) - relação entre o volume de água na tensão de 60 hPa e o volume de solo amostrado; (b) macroporos (MACPOR) - diferença entre POR e MICPOR. A água disponível (AD) foi calculada pela diferença entre o conteúdo volumétrico de água nas tensões de 60 e 15000 hPa, e a água prontamente disponível (APD), entre as tensões de 60 e 1000 hPa.

4) Armazenagem de água no solo (h): foi calculada para a profundidade de 0,50 m (L) utilizando a regra do trapézio de integração numérica, a qual assume que, entre dois pontos consecutivos de medida, a umidade varia linearmente com a profundidade do solo. Como as amostragens foram feitas nas profundidades de 0,05; 0,15; 0,25; 0,35 e 0,45 m (ponto médio da camada amostrada de 10 cm): $h \cong \theta_m L$, sendo θ_m a umidade média do perfil 0-L metros ([LIBARDI, 2000](#)).

Intervalo hídrico ótimo (IHO)

As 80 amostras coletadas nos pontos extremos da linha diagonal de amostragem foram utilizadas para determinação da CRA pelo método da câmara de pressão com placa porosa, utilizando o procedimento alternativo descrito por Tormena et al. (2002). Nesse procedimento, medidas simultâneas do conteúdo de água e de seu potencial no solo são obtidas com o uso de amostras distintas para cada potencial, o que requer a incorporação da densidade do solo nos parâmetros da função matemática utilizada para descrever a CRA. A D_s do solo foi incorporada por meio do parâmetro n da equação 1, o qual foi definido como: $n = a + bD_s$, sendo a e b os parâmetros de ajuste do modelo.

A determinação do IHO foi baseada em [Silva et al. \(1994\)](#). As 80 amostras coletadas foram divididas em oito grupos de dez amostras (dois sistemas de

preparo do solo e cinco profundidades de amostragem). Cada grupo de amostras foi submetido, em câmaras de pressão com placa porosa, a uma das seguintes tensões: 30, 60, 100, 330, 600, 800, 1000 e 15000 hPa.

A resistência à penetração foi determinada em cada uma das amostras indeformadas logo após o estabelecimento do equilíbrio nas câmaras de pressão. Para tanto, foi utilizado um penetrômetro dinamométrico marca *Kiya Seisakusho* adaptado para determinações de índices de cones em anéis volumétricos (IC_{lab}) e descrito em [Sá e Santos Junior \(2005\)](#) não referenciado. A relação $IC_{lab} = f(\theta, Ds)$ foi ajustada com o uso da equação proposta por [Busscher \(1990\)](#):

$$IC_{lab} = a1\theta^{b1} Ds^{c1} \quad (3)$$

Em que: IC_{lab} é o índice de cone (MPa) e $a1$, $b1$, $c1$ são parâmetros de ajuste do modelo.

Uma vez estimados os parâmetros a , b , θ_r , θ_s , α , $a1$, $b1$ e $c1$, a variação do conteúdo de água na capacidade de campo (CC; 60 hPa) e no ponto de murcha permanente (PMP; 15000 hPa) com a Ds foi estimada por meio das seguintes equações:

$$\theta_{cc} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha 0,006)^n]^{1-1/n} \quad (4)$$

$$\theta_{PMP} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha 1,5)^n]^{1-1/n} \quad (5)$$

Em que $n = a + bDs$

Foi assumido como limitante o valor de IC_{lab} de 2,0 MPa ([BEUTLER; CENTURION, 2003](#)). A variação do conteúdo de água em que o IC_{lab} atinge o limite crítico com a Ds foi definido, de acordo com a equação 3, por:

$$\theta_{IC} = [2,0 / (\alpha 1 Ds^{c1})]^{1/b1} \quad (6)$$

A porosidade de aeração mínima considerada para adequada taxa de difusão de oxigênio no solo foi de 10 %, e a umidade volumétrica correspondente a essa porosidade ($\theta_{PAR10\%}$) foi calculada pela equação:

$$\theta_{PAR10\%} = (1 - Ds/Dp) - 0,1 \quad (7)$$

Em que: Dp é a densidade de partículas dos solos estudados, assumida como 2,65 g/cm³.

Como a D_s é a única variável independente nos modelos, o IHO foi definido em seu limite superior pelo conteúdo de água em que a porosidade de aeração atinge 10 % ou pela θ_{CC} e, no seu limite inferior, pelo conteúdo de água em que o IC_{lab} atinge 2,0 MPa ou pela θ_{PMP} , utilizando o algoritmo relatado por Leão et al. (2005), devidamente modificado para as equações 1, 4 e 5.

Amostragens e medições na parte aérea

No período de 19 de dezembro de 2005 a 8 de fevereiro de 2006, foi determinada a altura de 15 plantas por unidade experimental, medindo-se a altura da curvatura da folha mais nova completamente expandida, por meio de uma régua graduada em centímetros. Considerou-se o dia 19 de dezembro de 2005 como o dia zero na determinação das alturas de plantas. Outras medições foram realizadas aos 16, 22, 25, 32, 38, 40, 43, 46 e 52 dias de crescimento. Ao final do ciclo do milho, foi colhida a área útil de 20 m² (cinco linhas com cinco metros lineares), avaliando o rendimento de grãos.

Análises estatísticas

A taxa de crescimento da cultura em cada sistema de preparo do solo foi estimada pelo coeficiente angular da relação entre a altura e o tempo de crescimento, utilizando o procedimento GLM do SAS ([SAS INSTITUTE, 1999](#)).

Foram realizadas análises de regressão não linear múltipla por meio do procedimento NLIN do SAS (SAS INSTITUTE, 1999) para estimar os parâmetros das equações 1 e 3. O pseudo-R² foi calculado como medida do ajuste do modelo de acordo com [Schabenberger e Pierce \(2001\)](#).

Os valores de D_s , conteúdo volumétrico de água do solo no momento da amostragem, porosidade total, macro e micro porosidade, parâmetro S, h, parâmetros da equação de [Van Genuchten \(1980\)](#), AD, APD e IC_{campo} foram submetidos à análise de variância para verificar a significância dos sistemas de preparo do solo, da profundidade de amostragem e de suas interações de acordo com Neter et al. (1996). Os sistemas de preparo foram comparados pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Equações de regressão foram ajustadas para o IC_{campo} a fim de descrevê-lo em função da profundidade de amostragem. O modelo de regressão foi escolhido com base no coeficiente de determinação e na significância da regressão e de seus coeficientes, testados pelo teste F a 1 % de probabilidade.

Coefficientes de correlação linear foram ajustados como medida de dependência entre as variáveis por meio do procedimento CORR do aplicativo SAS (SAS INSTITUTE, 1999).

Resultados e Discussão

Os sistemas de preparo do solo diferenciaram-se significativamente quanto à altura de plantas de milho a partir dos 22 dias de crescimento (Fig. 2). A taxa de crescimento em plantio convencional (PC) foi 1,1 vez maior do que em plantio direto (PD). Todavia, as diferenças no porte das plantas praticamente desapareceram depois do início do florescimento.

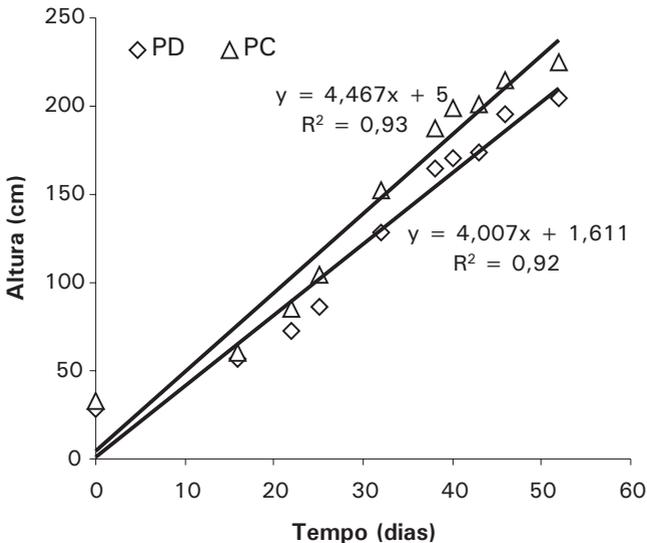


Fig. 2. Altura de plantas de milho em plantio direto (PD) e convencional (PC) em função do tempo de crescimento.

Não foram observadas diferenças visuais no sistema radicular do milho (safra 2005/2006) em contraste às diferenças observadas na soja do cultivo anterior (safra 2004/2005). Embora o crescimento radicular e, conseqüentemente, sua morfologia sejam diretamente afetados pela resistência que o solo oferece à penetração de raízes, valores limitantes de resistência à penetração dependem da espécie vegetal ou mesmo da cultivar em estudo ([SPIVEY et al., 1986](#); [UNGER; KASPAR, 1994](#); [BEUTLER; CENTURION, 2003](#)).

As diferenças nas taxas de crescimento da cultura não afetaram o rendimento de grãos nos sistemas de preparo do solo. A média foi de 9,53 t/ha em PD e 9,43 t/ha em PC, não sendo essa diferença significativa (Tukey; $P > 0,05$). Uma vez

que praticamente não houve limitações químicas quanto à fertilidade do solo, as diferenças no porte das plantas suportam a hipótese de que PC e PD diferem quanto aos seus atributos físicos e hídricos.

Houve efeito significativo ($P < 0,01$) apenas da profundidade de amostragem, na média dos dois sistemas de preparo, para a densidade do solo (Ds). Densidades mais elevadas foram observadas aos 15 e 25 cm, independente do sistema de preparo do solo ([Tabela 1](#)).

Na camada de 0-10 cm, a diferença não significativa nos valores de Ds entre PD e PC, após sete anos de adoção dos tratamentos, corrobora os resultados de [Oliveira et al. \(2003\)](#) em Latossolo Vermelho submetido, por duas décadas, aos mesmos sistemas de preparo avaliados no presente experimento. Entretanto, Oliveira et al. (2003) relataram que, na camada de 20-30 cm, a Ds no PC foi significativamente maior do que a observada em PD, resultado que contrasta do apresentado na Tabela 1. [Costa et al. \(2003\)](#), estudando sistemas de manejo do solo após 21 anos de implantação, descreveram que as contradições nos valores de Ds entre PD e PC na sub-superfície do solo entre diversos autores podem ser em razão do tempo de utilização dos sistemas de manejo. [Resck \(1997\)](#) considera que o uso de arado de disco, por vários anos, causa certa compactação na profundidade de 20 a 25 cm em decorrência da pressão exercida pela lâmina do implemento. Assim, além do tempo de utilização dos sistemas de manejo, o histórico do uso do solo anterior à implantação de tais sistemas é de fundamental importância ao se comparar experimentos sob PD. Os valores de densidade observados na camada de 20-50 cm do PD no presente experimento podem estar relacionados ao cultivo convencional utilizado por cerca de 20 anos em período anterior à implantação do experimento.

Ficou evidente que o solo sob Cerrado apresentou valores mais baixos de Ds, independentemente da camada amostrada (Tabela 1). Dessa forma, a atividade antrópica, por meio de sistemas de preparo e uso do solo, alterou a densidade original do solo (i.e. sob vegetação natural), concordando com Costa et al. (2003).

Apesar de a Ds ser muito utilizada como indicadora da qualidade física do solo, por ser influenciada por diversos outros atributos, como teor de matéria orgânica e textura, apresenta pouca relação com o crescimento vegetal caso seja avaliada isoladamente. [Letey \(1985\)](#) considera que a utilização de propriedades e

características físicas do solo que afetam indiretamente o crescimento de plantas (agregação, densidade, porosidade do solo, etc.) contribui pouco para o entendimento de seus efeitos no crescimento vegetal caso a relação com fatores que afetam diretamente esse crescimento (energia de retenção da água pelo solo, aeração, resistência à penetração e temperatura) não seja estabelecida. Assim, a tomada de decisão para a descompactação do solo, visando ao aumento da produtividade, com base somente na D_s deve ser feita cuidadosamente, em razão de não haver uma relação direta de causa/efeito.

Tabela 1. Densidade do solo (g/cm^3) e seus respectivos desvios-padrão (DP) em função de sistemas de preparo (PC e PD) e da profundidade de amostragem do solo (Prof), tendo como referência o Cerrado.

Prof. (cm)	PC		PD		Média geral ^(*)	Cerrado média
	Média	DP	Média	DP		
0,05	1,13	0,07	1,11	0,05	1,12 b	0,76 b
15,0	1,19	0,08	1,15	0,06	1,17 ab	0,91 a
25,0	1,23	0,10	1,20	0,06	1,22 a	0,95 a
35,0	1,13	0,05	1,10	0,04	1,12 b	0,95 a
45,0	1,15	0,06	1,15	0,05	1,15 b	0,94 a
Média geral ^(*)	1,17 A		1,15 A			

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

A interação entre os sistemas de preparo e a profundidade de amostragem do solo não foi significativa ($P > 0,05$) para o conteúdo de água volumétrico no momento da amostragem (q_v), porosidade total (POR), macro (MACPOR) e micro (MICPOR) porosidade, água disponível (AD), água prontamente disponível (APD), parâmetros da equação de [Van Genuchten \(1980\)](#) pelo método da centrífuga e parâmetro S.

Houve efeito significativo ($P < 0,01$) dos sistemas de preparo e da profundidade de amostragem para o θ_v . O θ_v no PC foi significativamente maior do que o observado em PD, na média da profundidade de amostragem ([Tabela 2](#)). As diferenças no θ_v proporcionaram uma armazenagem momentânea de água, até 50 cm de profundidade, 10 % (14,6 mm) maior no PC quando comparado ao PD. Em relação à profundidade, foram observados maiores θ_v aos 15 e 25 cm (Tabela 2). As diferenças de θ_v em profundidade foram em grande parte por causa das variações na D_s , com coeficiente de correlação de

0,65 ($P < 0,01$). Como foi coletado o mesmo volume de solo para a determinação de θ_v , obtém-se, no caso de solo com maior densidade, uma quantia maior de sólidos e, também, uma quantia proporcionalmente maior de água. Ao se quantificar quanto do volume do solo ocupado por ar no momento da amostragem, foi obtida uma relação inversa desse atributo com a D_s ($r = -0,64$; $P < 0,01$). Dessa forma, o aumento da umidade volumétrica em decorrência da compactação em profundidade diminuiu a porosidade de aeração do solo no momento da amostragem. Em menor intensidade, também diminuiu a porosidade total, a qual teve relação inversa com a D_s ($r = -0,44$; $P < 0,01$).

Os sistemas de preparo do solo não se diferenciaram significativamente (Tukey, $P > 0,05$) quanto à porosidade total (Tabela 3). Todavia, o PD apresentou volume de MACPOR significativamente maior (Tukey, $P < 0,05$) do que em PC, sendo observado o inverso quanto ao volume de MICPOR (Tabela 3). A maior MICPOR observada em PC proporcionou, nesse sistema de preparo, maior (Tukey, $P < 0,05$) volume de AD e APD quando comparado com PD.

Uma vez que a MICPOR compreende uma grande amplitude de tamanho de poros e em virtude da sua importância na armazenagem de água no solo, [Oliveira et al. \(2003\)](#) sugeriram que a distribuição de poros no solo por tamanho deva ser utilizada em estudos comparativos entre sistemas de manejo, visto que melhor discrimina a frequência de tamanho de poros em determinado sistema de preparo do solo.

Tabela 3. Porosidade total (POR- m^3/m^3), macroporosidade (MACPOR- m^3/m^3), microporosidade (MICPOR- m^3/m^3), água disponível (AD- m^3/m^3) e água prontamente disponível (APD- m^3/m^3) em função de sistemas de preparo do solo.

Atributo Físico	PC	PD
POR	0,510 A	0,514 A
MACPOR	0,131 B	0,162 A
MICPOR	0,379 A	0,352 B
AD	0,144 A	0,127 B
APD	0,097 A	0,083 B

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

Do volume total de poros no solo, cerca de 45 % estiveram acima da correspondente tensão de 15000 hPa; 9 %, entre 1000 e 15000 hPa; 2,5 %, entre 600 e 1000 hPa; 4,1 %, entre 330 e 600 hPa; e 6,2 %, entre 100 e 330 hPa, independentemente do sistema de preparo do solo utilizado (Fig. 3). PD e PC diferenciaram-se significativamente quanto ao volume de poros entre as tensões de 60 e 100 hPa (PD = 4 % e PC = 6 %) e entre 0 e 60 hPa, que corresponde à macroporosidade (PD = 31 % e PC = 25 %). Assim, o PC apresentou maior quantidade de MICPOR somente entre as tensões de 60 e 100 hPa, não se diferenciando do PD nas demais tensões que englobam a MICPOR (Fig. 3). Dessa forma, a distribuição de poros por tamanho, dentro da MICPOR, explicou as diferenças na AD e APD entre PD e PC.

Com a análise dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) na Tabela 4, método da centrífuga, verificou-se que os sistemas de preparo somente se diferenciaram (Tukey, $P < 0,05$) em relação ao parâmetro a. Assim, na Fig. 4, foi plotada a CRA, utilizando os parâmetros descritos na Tabela 4, substituindo, no eixo das ordenadas, a umidade volumétrica (q) pela relação q/q_s , em que q_s é a umidade volumétrica na tensão zero ou umidade de saturação. A Fig. 4 representa a curva de frequência acumulada do tamanho dos poros no solo, uma vez que, por meio da CRA e da equação de ascensão capilar, pode-se calcular o raio equivalente do poro. Assim, a distribuição de poros por tamanho teve o mesmo comportamento entre os sistemas de preparo do solo; entretanto, com intensidades diferentes, as quais foram em decorrência da diferenciação do parâmetro a da equação de Van Genuchten (1980) entre PD e PC.

Com relação ao parâmetro S , os sistemas de preparo do solo não se diferenciaram, em razão do parâmetro a da equação de Van Genuchten (1980), único a se diferenciar entre os tratamentos, não ser utilizado no cálculo de S .

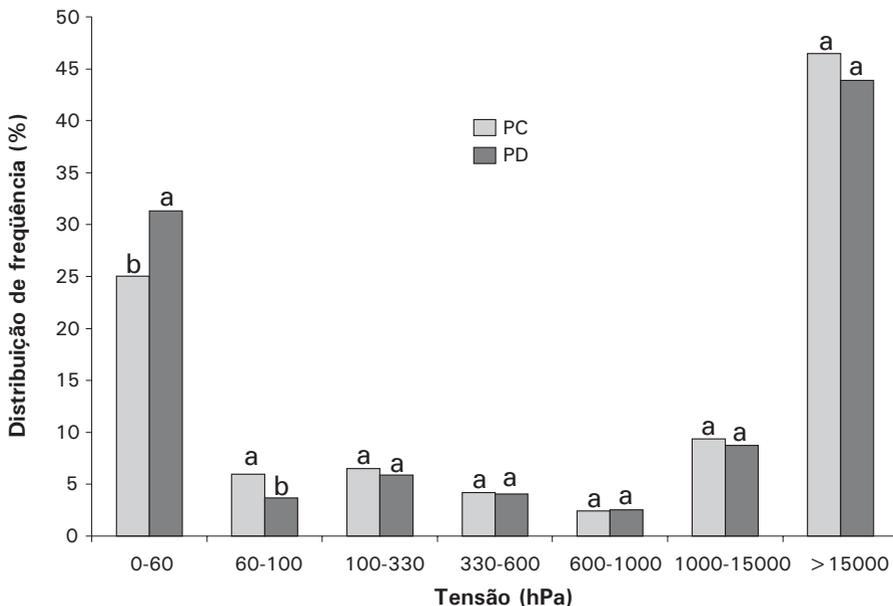


Figura 3. Distribuição de frequência do tamanho de poros por intervalo de tensão em PD e PC.

Barras acompanhadas pela mesma letra, em cada intervalo de tensão, não diferem pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

Tabela 4. Parâmetros da equação de Van genuchten (1980) e parâmetro S em plantio direto (PD) e convencional (PC).

Parâmetro	PC	PD
	0,0830 B	0,1215 A
s	0,5102 A	0,5144 A
r	0,2343 A	0,2250 A
n	1,4406 A	1,4007 A
S	0,0595 A	0,0585 A

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

Obs.: ajuste com a tensão da água em hPa e v em m^3/m^3 .

Figura 4. Curva de freqüência acumulada (q/q_s) do tamanho de poros entre PC e PD.

A interação entre sistemas de preparo e profundidade de amostragem foi significativa para o IC_{campo} ($P < 0,01$). Os sistemas de preparo do solo diferenciaram-se significativamente (Tukey, $P < 0,01$) quanto ao IC_{campo} até os 25 cm de profundidade (Fig. 5). Em PC, o IC_{campo} variou de forma linear com a profundidade, à taxa de 0,0337 MPa/cm (Fig. 5). Em PD, o IC_{campo} seguiu modelo quadrático de regressão quando ajustado em função da profundidade de amostragem (Fig. 5). Aos 5 cm, o IC_{campo} observado em PD foi 4,6 vezes maior daquele em PC; 3,1 vezes aos 15 cm e 1,4 vez aos 25 cm de profundidade. Esses resultados concordam com [Tormena et al. \(1999\)](#), os quais relatam que, para mesmas D_s e q_v , a mobilização do solo em PC resulta na quebra de agregados, diminuindo sua resistência à penetração. Já em PD, maior resistência à penetração pode estar ligada à maior estabilidade dos agregados.

As diferenças no sistema radicular da soja cultivada na safra 2004/2005 e nas taxas de crescimento em altura do milho cultivado na safra 2005/2006 podem

estar relacionadas às diferenças observadas quanto ao IC_{campo} em PD e PC. Maior resistência à penetração não esteve relacionada com as variações de D_s observadas no perfil do solo ($r = -0,12$; $P = 0,47$). Ao se analisar a relação entre IC_{campo} e a variação no conteúdo volumétrico de água no momento da amostragem, foi obtido coeficiente de correlação de $-0,53$ ($P < 0,01$).

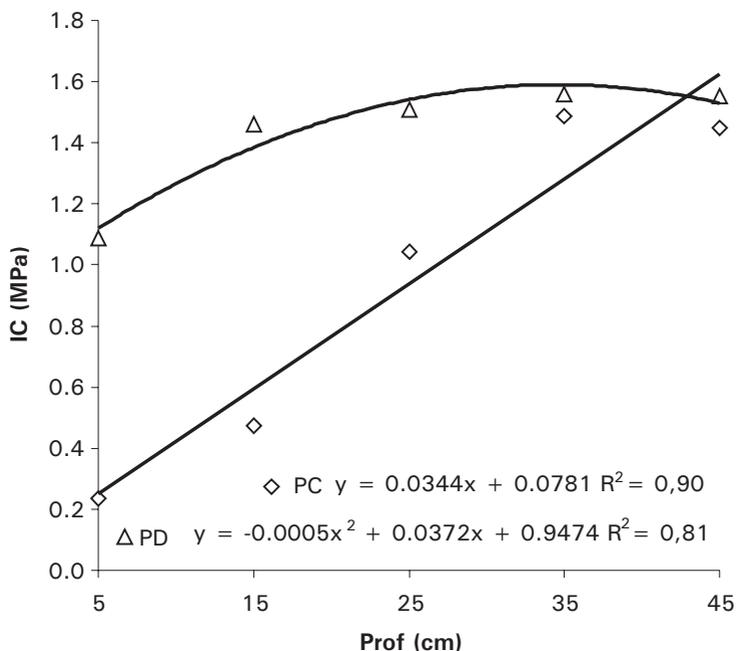


Figura 5. Índice de cone (IC_{campo}) em plantio direto (PD) e convencional (PC) em função da profundidade de amostragem.

A relação inversa entre resistência à penetração e q_v é bem documentada na literatura (IMHOFF et al., 2000; CAVALIERE et al., 2006), razão pela qual [Busscher et al. \(1997\)](#) sugerem que as comparações entre tratamentos sejam feitas em mesmo conteúdo de água volumétrico. Entretanto, a modelagem do IC_{campo} em função da variação de q_v no presente experimento não foi possível, uma vez que, em virtude da pequena amplitude de q_v , os coeficientes de determinação (pseudo- R^2) obtidos para as três equações sugeridas por Busscher et al. (1997) foram menores que 0,20. Todavia, pela análise da [Tabela 2](#), ficou evidente que o conteúdo de água volumétrico no momento da amostragem foi

característico de cada tratamento e está de forma intrínseca associado às diferenças observadas no IC_{campo} dos sistemas de preparo do solo. Assim, a relação $IC_{\text{campo}} = f(q)$ é relevante quando as avaliações de IC_{campo} são realizadas em condições distintas de umidade do solo para os mesmos tratamentos.

Os sistemas de preparo do solo não se diferenciaram quanto aos parâmetros da equação de [Busscher \(1990\)](#), a qual relaciona IC_{lab} com D_s e q_v (Tabela 5). Substituindo os valores médios de D_s ([Tabela 1](#)) e q_v no momento da amostragem ([Tabela 2](#)), referentes às profundidades de 5 e 15 cm, nas equações apresentadas na Tabela 5, foi verificado que o IC_{lab} em PD foi 3 % maior aos 5 cm e 12 % aos 15 cm em comparação a PC. A amplitude das diferenças observadas entre PD e PC foi menor para o IC_{lab} quando comparado com os valores de IC_{campo} , para mesmas D_s e q_v . O ajuste das funções, medido pelo Pseudo- R^2 , ficou abaixo dos ajustes relatados por [Leão et al. \(2006\)](#), [Imhoff et al. \(2000\)](#) e [Cavaliere et al. \(2006\)](#), os quais variaram entre 0,82 e 0,93 com o uso de penetrômetros similares ao descrito por [Tormena et al. \(1998\)](#). Assim, o protótipo de penetrômetro dinamométrico para medições de IC em anéis volumétricos utilizado no presente experimento não foi sensível às variações de q_v , principalmente nos potenciais de água no solo mais próximos da capacidade de campo.

Com relação à CRA obtida com o método da câmara de pressão com placa porosa e incorporação da D_s na equação de Van Genuchten (1980), verificou-se que os parâmetros associados à variação de D_s não foram significativos em PD, enquanto somente o parâmetro a apresentou significância em PC (Tabela 6). A significância dos parâmetros do modelo foi constatada pela ausência do valor zero no intervalo de confiança ([SCHABENBERGER; PIERCE, 2001](#)).

A qualidade física do solo avaliada por meio do IHO foi discutida com base na distribuição dos valores de D_s , em razão da profundidade de amostragem, dentro de cada sistema de preparo do solo ([Fig. 6](#)). O IHO diferiu entre PD e PC em virtude das diferenças na AD e das amplitudes de variação da D_s no perfil do solo. Em PC os valores de D_s apresentaram maior dispersão do que em PD, o que pode ser visualizado pelo desvio padrão apresentado na Tabela 1. A maior amplitude de valores de D_s em PC estimou IC crítico (2MPa), que substituiu o ponto de murcha permanente ($\gamma = 15000$ hPa) como limite inferior do IHO aos 25 cm, o que não ocorreu em PD ([Fig. 6](#)). Tanto no PD como no PC, em nenhum valor de D_s observado, a porosidade de aeração menor do que 10 % substituiu a capacidade de campo ($\gamma = 60$ hPa) como limite superior do IHO. Também não foram observados valores de D_s críticos (i.e. com IHO igual a zero) em nenhuma profundidade de amostragem.

Figura 6. Variação do conteúdo de água volumétrico na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e nos valores críticos de índice de cone e porosidade de aeração com a densidade do solo. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo (IHO) em plantio direto e sistema convencional de preparo do solo.

Uma hipótese implícita no conceito do IHO é que sistemas de manejo do solo que tenham IHO mais estreito são mais sensíveis a veranicos em sistemas de sequeiro, ou necessitam maior frequência de reposição de água em sistemas irrigados. Independentemente do caso, a variação do conteúdo volumétrico de água no solo ao longo do ciclo de crescimento das culturas é fundamental para o estabelecimento de relações com o crescimento vegetal, como descrito por [Silva e Kay \(1996\)](#). Por outro lado, o limite de IC a partir do qual o crescimento de plantas começa a ser afetado é algo ainda controverso e meta importante de estudos futuros. Entretanto, o IHO parece ser mais sensível do que a AD às variações de D_s , uma vez que leva em consideração outros atributos físicos do solo, como o IC e a porosidade de aeração limitantes para o crescimento radicular.

Conclusões

Em plantio direto estabelecido há sete anos, o índice de cone medido a campo é significativamente superior ao observado em plantio convencional na camada de 0-30 cm de profundidade.

Os valores contrastantes de índice de cone podem explicar as variações nas taxas de crescimento do milho em plantio direto e preparo convencional, não afetando, entretanto, a produtividade da cultura.

Após seis anos de implantação dos sistemas de manejo do solo, plantio direto e sistema convencional não se diferenciaram quanto aos valores de densidade do solo.

Os sistemas de preparo do solo diferenciam-se quanto à água disponível, a qual não foi influenciada pela densidade do solo nas condições em que foi realizado o experimento.

Agradecimentos

Aos estagiários da Embrapa Cerrados Rafael Diego Nascimento da Costa e Hugo Nogueira P. Cardoso, acadêmicos da UPIS – Faculdades Integradas, pelo auxílio em várias etapas deste trabalho.

Referências

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 7, p. 849-856, 2003.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 2, p. 519-524, 1990.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 30, p. 137-147, 2006.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBET, C. Propriedades físicas de um Latossolo bruno afetadas pelos sistemas

plântio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 527-535, 2003.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 215-225, 2004b.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 227-239, 2004c.

FREITAS JUNIOR E.; SILVA, E. M. Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água no solo, em uma única operação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, p. 1423-1428, 1984.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Spatial heterogeneity of soil properties in areas under elephant-grass short-duration grazing system. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 219, p. 161-168, 2000.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E.; TORMENA, C. A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1210-1215, 2005.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least Limiting Water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 279-285, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Exatas, 2000. 509 p.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. Chicago: Irwin, 1996. 1408 p.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compreensivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, p. 291-299, 2003.

RESCK, D. V. O plantio direto como alternativa de sistemas de manejo e conservação do solo e da água na Região dos Cerrados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: Embrapa Solos: CBCS, 1997. 1 CD-ROM.

SAS INSTITUTE. **User's guide**: version 8. Cary, 1999.

SCHABENBERGER, O.; PIERCE, F. J. **Contemporary statistical models for the plant and soil science**. Boca Raton: CRC, 2001. 738 p.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 184, p. 323-329, 1996.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SPIVEY, L. D.; BUSSCHER, W. J.; CAMPBELL, R. B. The effect of texture on strength of southeastern coastal plain soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 6, p. 351-363, 1986.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 573-581, 1998.

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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p. 223-232, 1999.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, p. 305-314, 2002.

UNGER, P.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 759-766, 1994.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.