

# QUANTIFICAÇÃO DA DEGRADAÇÃO FÍSICA DO SOLO POR MEIO DA CURVA DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO<sup>(1)</sup>

Éverton Blainski<sup>(2)</sup>, Cássio Antonio Tormena<sup>(3)</sup>, Jonez Fidalski<sup>(4)</sup> & Rachel Muylaert Locks Guimarães<sup>(2)</sup>

## RESUMO

A resistência do solo à penetração (RP) é uma das propriedades físicas que freqüentemente impõe restrições ao crescimento das raízes das plantas. A RP varia positivamente com a densidade do solo (Ds) e negativamente com o conteúdo de água do solo ( $\theta$ ), e a descrição matemática das relações da RP com Ds e  $\theta$  estabelece a curva de resistência do solo à penetração (CRS). O objetivo deste trabalho foi quantificar a CRS em um Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo e utilizá-la na descrição da degradação física do solo. Foram selecionadas quatro áreas: (a) solo sob mata nativa; (b) solo sob pastagem cultivada com *Brachiaria humidicola* por mais de 20 anos; (c) solo de uma área cultivada com citros por mais de 10 anos, e (d) solo cultivado com culturas anuais por mais de 15 anos. Em cada sistema de uso e manejo, foram coletadas 48 amostras indeformadas de solo no centro da camada de 0–0,10 m de profundidade. Conjuntos de 16 amostras (quatro amostras por tratamento) foram submetidos aos potenciais matriciais ( $\Psi$ ) de -10 a -15.000 hPa. Nessas amostras, determinaram-se a RP, Ds e  $\theta$ . A CRS foi ajustada por um modelo não-linear ( $RP = a Ds^b \theta^c$ ), no qual  $a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes de ajuste do modelo. O modelo ajustado explicou acima de 83 % da variabilidade da RP em todos os sistemas de uso e manejo. Em solo compactado, para a manutenção da RP em valores não-impeditivos às plantas ( $RP < 2,0$  MPa), é necessário manter maiores valores de  $\theta$ . Nos solos cultivados com citros e culturas anuais, verificaram-se valores excessivamente elevados de RP em  $\theta$  equivalente à capacidade de campo ( $\Psi = -100$  hPa), indicando maior degradação da qualidade física do solo.

**Termos de indexação:** densidade do solo, compactação, qualidade física, conteúdo de água.

<sup>(1)</sup> Trabalho financiado pelo CNPq - processo 420.088/99-7. Recebido para publicação em julho de 2007 e aprovado em março de 2008.

<sup>(2)</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). E-mail: evertonblainski@gmail.com; rachellocks@gmail.com

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

<sup>(4)</sup> Pesquisador do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR. Caixa Postal 564, CEP 87701-970 Paranavaí (PR). E-mail: fidalski@iapar.br

**SUMMARY: QUANTIFYING SOIL PHYSICAL DEGRADATION THROUGH THE SOIL PENETRATION RESISTANCE CURVE**

Soil resistance to penetration (PR) frequently reduces plant root growth. PR increases with soil bulk density (Bd) and decreases with soil moisture ( $\theta$ ), and the mathematical description of the relationships of PR with Bd and  $\theta$  determines the soil penetration resistance curve (SRC). The objective of this study was to quantify the SRC of an Oxisol under different land use practices and to use it to describe soil physical degradation. Four areas were selected: (a) native forest; (b) pasture cultivated with *Brachiaria humidicola* for over 20 years; (c) area cultivated with citrus plants for 10 years; and (d) soil under annual crops for 15 years. In each treatment, 48 undisturbed soil samples were collected in the 0–0.10 m layer. Matric potential ( $\Psi$ ) values from -10 to -15,000 hPa were applied to sets of 16 samples (4 per treatment) to simulate soil drying. The variables PR, Bd and  $\theta$  of these samples were determined. A non-linear equation was fit to the experimental data to describe SRC ( $PR = a Bd^b \theta^c$ ), in which a, b and c are coefficients of the fitted model. The fitted model explained more than 83 % of the PR variability in all treatments. In compacted soils a higher soil water content is necessary to maintain PR at adequate levels for plant growth ( $RP < 2.0$  MPa). The PR values in soils under annual crops and citrus orchard were excessively high at  $\theta$  values close to the field capacity ( $\Psi = -100$  hPa), indicating greater soil physical degradation.

*Index terms: soil bulk density, compaction, soil physical quality, soil water.*

## INTRODUÇÃO

Em termos agronômicos, os sistemas de uso e manejo devem manter a capacidade do solo exercer as funções físicas para o crescimento e ancoragem das raízes, bem como de favorecer o suprimento de água, nutrientes e  $O_2$  às plantas. A perda de solo por erosão, a redução da matéria orgânica e a compactação são alguns dos fatores que concorrem para a degradação física do solo, com conseqüente perda de uma ou mais destas funções. Dexter & Youngs (1992) argumentam que a quantificação e a compreensão das alterações físicas do solo devidas ao seu uso e manejo são fundamentais para o estabelecimento de sistemas agrícolas sustentáveis. As avaliações destas alterações deveriam ser feitas submetendo um solo sob vegetação nativa às explorações agrícolas desejadas (uso e manejo) e analisando suas propriedades físicas periodicamente. Alternativamente, esses estudos podem comparar as propriedades físicas de solos cultivados e sob vegetação nativa, desde que mantidos os critérios genéticos e topográficos relacionados com os fatores e processos de formação dos solos.

As propriedades físicas do solo que influenciam diretamente o crescimento e desenvolvimento das plantas são a temperatura, o potencial matricial da água no solo (disponibilidade de água), a aeração e a resistência do solo à penetração (Letey, 1985). As condições físicas do solo às plantas variam rapidamente de acordo com a forte inter-relação que existe entre tais propriedades e, da magnitude destas inter-relações, estabelece-se a qualidade física do solo (Granatstein & Bezdicek, 1992). Com base nas condições estruturais do solo, determinam-se os diferentes tipos de restrições

físicas a que as plantas são submetidas. Neste sentido, resultados experimentais mostram que, em solos fisicamente degradados, a resistência do solo à penetração (RP) é uma das propriedades físicas que freqüentemente restringe o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (Tormena et al., 1999; Lapen et al., 2004; Collares et al., 2006). Isto se deve à estreita dependência da RP em relação à condição estrutural do solo, expressa pela densidade do solo (Ds), e ao conteúdo de água do solo ( $\theta$ ) (Silva et al., 1994; Imhoff et al., 2001).

O crescimento radicular é negativamente relacionado com a RP (Taylor et al., 1966; Taylor & Ratliff, 1969; Logsdon et al., 1992; Rosolem et al., 1999; Collares et al., 2006). Valores de RP entre 1,0 e 3,5 MPa restringem o crescimento das raízes (Benghough & Mullins, 1990; Merotto Jr. & Mundstock, 1999; Beutler et al., 2004). O valor de RP = 2 MPa tem sido freqüentemente utilizado como crítico para o crescimento das plantas (Lapen et al., 2004), em especial para definir um limite inferior de água no solo na quantificação do intervalo hídrico ótimo (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998), ainda que 2,5 MPa tenha sido utilizado em solos sob pastagem (Leão et al., 2004) e 3,0 MPa em solos sob florestas (Zou et al., 2000). O valor de 3,5 MPa foi utilizado por Tormena et al. (2007) em solo cultivado em longo prazo sob plantio direto, justificado pela presença de bioporos contínuos e efetivos no solo sob plantio direto.

A determinação da RP é feita por meio de penetrômetros, os quais apresentam como principais vantagens a facilidade e a rapidez na obtenção dos resultados (Benghough & Mullins, 1990). No entanto, a dependência da RP em relação à Ds e  $\theta$  (Busscher,

1990) dificulta a interpretação e a utilização adequada da RP isoladamente sem essas duas variáveis. Busscher (1990) e Busscher et al. (1997) demonstram a utilização de funções matemáticas para descrever a RP em uma função não-linear da Ds e  $\theta$  do solo ( $RP = a Ds^b \theta^c$ ), gerando a curva de resistência do solo à penetração (CRS). A CRS tem sido utilizada por diferentes pesquisadores (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999; Imhoff et al., 2000; Leão & Silva, 2006), para quantificação da RP em diferentes solos. A CRS pode ser utilizada para estabelecer tanto  $\theta$  como a densidade do solo crítica (Dsc), em que a RP seria impeditiva para o crescimento radicular das plantas.

A CRS pode ser determinada em amostras indeformadas ou diretamente no campo obtendo-se medidas da RP durante o secamento de um solo em distintos valores de Ds. Desta forma, na quantificação e descrição da CRS, são incorporados diferentes fatores associados com a degradação física do solo, permitindo estabelecer os valores críticos de Ds ou de  $\theta$  associados com valores limitantes de RP.

O objetivo deste trabalho foi quantificar a influência de diferentes sistemas de uso na curva de resistência à penetração de um Latossolo Vermelho distrófico e utilizá-la na identificação e descrição da degradação física do solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado num Latossolo Vermelho distrófico textura média (Embrapa, 2006), com 170, 40 e 790 g kg<sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente, desenvolvido a partir do arenito da Formação Caiuá, localizado no município de Paranavaí, região noroeste do Estado do Paraná. Foram selecionadas quatro áreas sob diferentes modalidades de uso e manejo do solo: (a) solo sob mata nativa (floresta estacional semidecidual); (b) solo sob pastagem com *Brachiaria humidicola* em pastejo extensivo de bovinos por mais de 20 anos com lotação média de 1,5 unidade animal por hectare (UA ha<sup>-1</sup>), 1 UA = 1 animal com peso vivo de 450 kg; (c) solo sob pomar de laranja - citros - por mais de 10 anos, em sistema de manejo com herbicidas para o controle das plantas daninhas nas linhas das plantas e roçadas mecânicas nas entrelinhas; (d) solo sob culturas anuais de milho, sorgo e aveia por mais de 15 anos, sendo também ocupado com pastagens antes das culturas anuais. Na época da amostragem, a área estava com a cultura de mandioca, instalada por meio do preparo convencional do solo com aração e gradagem.

Foram coletadas aleatoriamente amostras indeformadas de solo no centro da camada de 0–10 m, utilizando anéis metálicos de 100 cm<sup>3</sup> (5 cm de altura e diâmetro). No laboratório, as amostras foram saturadas e, para a determinação da CRS, adotou-se o procedimento descrito em Silva et al. (1994), no qual

a RP foi medida numa ampla variação de  $\theta$  e sob diferentes valores de Ds. Para diferentes conjuntos de 16 amostras (quatro por tratamento), aplicaram-se pressões equivalentes a 12 potências matriciais ( $\Psi$ ): -10; -20; -40; -60; -80 e -100 hPa, utilizando mesa de tensão; -300; -500; -700; -5.000; -10.000 e -15.000 hPa por meio de pressões aplicadas em câmaras de Richards com placas porosas (Klute, 1986). Após atingirem o equilíbrio em cada  $\Psi$ , as amostras foram pesadas e determinada a RP utilizando o penetrômetro descrito por Tormena et al. (1998). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a  $\pm 105$  °C por 24 h. O conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) foi quantificado pelo quociente da massa de água retida na amostra em cada  $\Psi$  e o volume do solo de cada amostra. A Ds foi obtida conforme método descrito em Dane & Topp (2002).

A curva de resistência do solo à penetração (CRS) foi obtida pelo modelo não-linear proposto por Busscher (1990), descrito na equação 1.

$$RP = a Ds^b \theta^c \quad (1)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa); Ds é a densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>);  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água do solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), e a, b e c são os coeficientes de ajuste do modelo.

A equação 1 foi linearizada por meio da aplicação da função logaritmo:

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

O ajuste do modelo da CRS foi feito por meio do procedimento *PROC REG* (SAS, 1999). Após o ajuste dos dados à equação 2, tomaram-se os coeficientes estimados e procedeu-se à transformação da equação 2 para a equação 1.

A partir da CRS, foram feitas as estimativas de RP em função da Ds para valores de  $\theta$  estimados em determinados limites de  $\Psi$ : (a) capacidade de campo ou  $\Psi$  de -100 hPa, comumente adotado como limite superior de disponibilidade de água no solo; (b)  $\theta$  no  $\Psi$  limite de funcionamento de tensiômetros em manejo de irrigação (-800 hPa), e (c)  $\theta$  no  $\Psi$  equivalente ao ponto de murcha permanente (-15.000 hPa), geralmente utilizado como limite inferior de disponibilidade de água no solo.

Para determinação do conteúdo de água no solo nos diferentes  $\Psi$ , os dados de  $\theta$  em função de  $\Psi$  foram ajustados pelo modelo proposto por van Genuchten (1980), conforme equação 3:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha\Psi)^n]^{1-1/n} \quad (3)$$

em que  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água do solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\theta_r$  é o conteúdo de água residual (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\theta_s$  é o conteúdo de água na saturação obtido por  $\theta_s = (1 - Ds/Dp)$ , assumindo a densidade de partículas igual a 2,65 Mg m<sup>-3</sup>;  $\Psi$ , potencial matricial; e  $\alpha$  e  $n$  são os coeficientes do modelo.

Os coeficientes  $\alpha$ ,  $n$  e  $\theta_r$  foram determinados utilizando a abordagem proposta por Silva & Kay (1997) e Tormena & Silva (2002), em que o modelo é ajustado para avaliar os efeitos individuais dos tratamentos e incorpora a variação da Ds entre as amostras.

O ajuste do modelo aos dados experimentais indicou uma função geral (Equação 4), em virtude de não ser constatado efeito significativo ( $p < 0,05$ ) entre tratamentos, nos coeficientes da função de van Genuchten (1980). O parâmetro  $n$  do modelo foi estimado como função linear da Ds, conforme equação 4:

$$\theta = 0,0853 + (\theta_s - 0,0853) / [1 + (0,0518\Psi)^n]^{1-1/n} \quad (4)$$

$$n = (3,7234 - 1,3102Ds)$$

$$R^2 = 0,87; F = 441,13; p > F < 0,00001$$

Para determinação da densidade do solo crítica (Dsc), ou seja, Ds em que a RP atinge 2 MPa, foram utilizados os valores de  $\theta$  nos  $\Psi$  entre a capacidade de campo (-100 hPa) e ponto de murcha permanente

(-15.000 hPa) por meio da equação 4. As estimativas de RP em função de  $\theta$  para diferentes valores de Ds foram feitas utilizando os valores médios  $\pm 1$  desvio-padrão de Ds.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Ds aumentou com a intensificação do uso do solo (culturas anuais > citros > pastagem > mata nativa) (Quadro 1). Maiores valores de Ds implicam maiores valores de  $\theta$ . Isso pode estar associado à redistribuição do tamanho de poros e, ou, à maior quantidade de sólidos por unidade de volume (Klein & Libardi, 2002).

O ajuste do modelo aos dados de RP em função da Ds e  $\theta$  encontra-se no quadro 2. Os modelos explicam acima de 83 % ( $R^2 \geq 0,83$ ) da variabilidade da RP. Os coeficientes do modelo foram altamente significativos pelo teste t ( $P \leq 0,0009$ ), enquanto que os resíduos do modelo apresentaram distribuição normal pelo teste

**Quadro 1. Densidade do solo (Ds, Mg m<sup>-3</sup>), resistência à penetração (RP, MPa), porosidade de aeração na capacidade de campo (PA<sub>-100 hPa</sub>, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e conteúdo de água ( $\theta$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) na capacidade de campo,  $\Psi$  de -100 hPa ( $\theta_{-100 \text{ hPa}}$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\theta$  no  $\Psi$  de -800 hPa ( $\theta_{-800 \text{ hPa}}$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e  $\theta$  no ponto de murcha permanente,  $\Psi$  de -15.000 hPa ( $\theta_{-15.000 \text{ hPa}}$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)**

Variável	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão	CV
%						
Mata nativa						
Ds	48	1,50	1,36	1,61	0,049	3,31
RP	48	1,49	0,03	4,99	1,345	90,31
PA <sub>-100 hPa</sub>	48	0,260	0,2049	0,3292	0,024	9,37
$\theta_{-100 \text{ hPa}}$	48	0,183	0,1689	0,195	0,005	2,77
$\theta_{-800 \text{ hPa}}$	48	0,106	0,097	0,1167	0,004	3,55
$\theta_{-15.000 \text{ hPa}}$	48	0,088	0,086	0,091	0,001	0,96
Pastagem						
Ds	48	1,62	1,53	1,69	0,038	2,36
RP	48	1,98	0,64	8,66	1,646	82,93
PA <sub>-100 hPa</sub>	48	0,203	0,165	0,245	0,019	9,31
$\theta_{-100 \text{ hPa}}$	48	0,195	0,186	0,202	0,004	1,93
$\theta_{-800 \text{ hPa}}$	48	0,118	0,1089	0,127	0,004	3,76
$\theta_{-15.000 \text{ hPa}}$	48	0,091	0,088	0,095	0,002	1,75
Citros						
Ds	48	1,72	1,56	1,82	0,049	2,82
RP	48	3,67	0,66	14,21	3,327	90,71
PA <sub>-100 hPa</sub>	48	0,151	0,107	0,229	0,024	15,63
$\theta_{-100 \text{ hPa}}$	48	0,205	0,189	0,212	0,004	2,08
$\theta_{-800 \text{ hPa}}$	48	0,133	0,116	0,149	0,008	5,71
$\theta_{-15.000 \text{ hPa}}$	48	0,0978	0,089	0,108	0,004	4,23
Culturas anuais						
Ds	48	1,75	1,63	1,90	0,057	3,29
RP	48	3,03	0,44	12,94	2,553	84,22
PA <sub>-100 hPa</sub>	48	0,141	0,100	0,196	0,024	17,72
$\theta_{-100 \text{ hPa}}$	48	0,207	0,197	0,217	0,005	2,23
$\theta_{-800 \text{ hPa}}$	48	0,137	0,119	0,168	0,010	7,41
$\theta_{-15.000 \text{ hPa}}$	48	0,101	0,091	0,127	0,007	6,79

**Quadro 2. Estimativas dos coeficientes de regressão linear para a curva de resistência do solo à penetração ( $\ln RP = \ln a + b \ln D_s + c \ln \theta$ ) para os diferentes sistemas de uso. RP é a resistência do solo à penetração (MPa);  $D_s$  é a densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ), e  $\theta$  é o conteúdo de água do solo ( $m^3\ m^{-3}$ )**

Coefficiente	Estimativa	Erro-padrão	t	p > t
Mata nativa: $RP = 0,0165 D_s^{4,8411} \theta^{-1,1108}$ (p > 0,001; $R^2 = 0,84$ )				
<i>a</i>	-4,1048	0,5406	-7,59	0,0001
<i>b</i>	4,8411	1,2883	3,76	0,0005
<i>c</i>	-1,1108	0,0715	-15,54	0,0001
Pastagem: $RP = 0,0175 D_s^{5,2816} \theta^{-1,1710}$ (p > 0,001; $R^2 = 0,83$ )				
<i>a</i>	-4,0469	0,7693	-5,26	0,0001
<i>b</i>	5,2816	1,4925	3,54	0,0009
<i>c</i>	-1,1710	0,0738	-15,85	0,0001
Citros: $RP = 0,0006 D_s^{9,2205} \theta^{-1,8406}$ (p > 0,001; $R^2 = 0,89$ )				
<i>a</i>	-7,3779	0,8327	-8,86	0,0001
<i>b</i>	9,2205	1,5171	6,08	0,0001
<i>c</i>	-1,8406	0,1113	-16,54	0,0001
Culturas anuais: $RP = 0,0006 D_s^{8,7763} \theta^{-1,9048}$ (p > 0,001; $R^2 = 0,88$ )				
<i>a</i>	-7,4235	0,6867	-10,81	0,0001
<i>b</i>	8,7763	1,2368	7,10	0,0001
<i>c</i>	-1,9048	0,1192	-15,99	0,0001

de Shapiro-Wilk, indicando que o modelo ajustou-se aos dados adequadamente. O sinal dos coeficientes indica que a RP variou positivamente com a  $D_s$  e negativamente com  $\theta$ , em concordância com diversos trabalhos realizados no Brasil e no exterior (Boone & Veen, 1994; Silva et al., 1994; Hakansson & Lipiec, 2000; Imhoff et al., 2000; Araújo et al., 2004).

Os maiores valores absolutos dos coeficientes *a*, *b* e *c* nos solos cultivados com culturas anuais e citros (Quadro 2) indicam maiores valores de RP nestes tratamentos. O coeficiente *b* associado à  $D_s$  é numericamente maior nos solos cultivados com citros e culturas anuais comparado com o dos solos com pastagem e mata nativa, revelando que o aumento de  $D_s$  nestes solos alterou a porosidade do solo, bem como a distribuição do tamanho dos poros para menores tamanhos, refletindo no incremento da RP. Com o incremento da  $D_s$ , a maior fricção entre as partículas e o aumento da coesão no solo atuam como principais mecanismos para o aumento da RP (Vepraskas, 1984). O maior valor absoluto de "t" associado a  $\theta$  em relação a  $D_s$  indica que, neste solo, a RP é mais sensivelmente modificada pela variação de  $\theta$  do que de  $D_s$ , independentemente dos tratamentos. O efeito lubrificante causado pela água pode desempenhar papel importante no controle da RP.

A combinação de elevadas  $D_s$  e menores  $\theta$  determinaram valores de RP restritivos para o crescimento do sistema radicular das plantas (Figura 1). No solo sob mata, cerca de 16 % das amostras apresentaram  $D_s$  acima de  $1,54\ Mg\ m^{-3}$  e  $RP > 2\ MPa$ , na condição de  $\theta$  equivalente ao ponto de

murcha permanente (Quadro 3). Estes resultados são similares aos obtidos por Klein et al. (1998) e Araújo et al. (2004), os quais indicam que nos solos sob mata nativa não há condições restritivas de RP dentro dos limites de disponibilidade de água de interesse agrônomo. No solo sob pastagem, não foi constatada a ocorrência de valores de  $RP > 2\ MPa$  sob  $\theta$  equivalentes à capacidade de campo. Para valores de  $\theta$  equivalente ao  $\Psi$  de  $-800\ hPa$ , a redução da  $D_s$  para valores inferiores a  $1,53\ Mg\ m^{-3}$  mantém a  $RP < 2\ MPa$ , condição que não restringe o crescimento radicular das plantas. Estes resultados indicam que a utilização da pastagem com a *Brachiaria humidicola* por longo período não foi capaz de restabelecer a qualidade estrutural deste solo comparado à mata nativa, mesmo considerando sua capacidade de promover melhor qualidade física em comparação ao cultivo de citros e às culturas anuais (Figura 1).

Com o uso mais intensivo do solo, verifica-se que, mesmo em condições de elevada disponibilidade hídrica, correspondentes ao  $\theta$  na capacidade de campo, a RP constitui-se numa limitação às plantas para  $D_s$  superior a  $1,75\ Mg\ m^{-3}$  nos solos sob citros e a  $1,80\ Mg\ m^{-3}$  nos solos sob culturas anuais (Figura 1). A partir destes valores de  $D_s$ , mesmo na capacidade de campo, o solo apresenta valores de  $RP > 2\ MPa$ , considerados restritivos para o crescimento das raízes das plantas. Estes resultados são similares aos de Cavaliere et al. (2006) que, em solo de textura similar, demonstraram que, para  $D_s > 1,74\ Mg\ m^{-3}$ , é necessário que  $\theta$  seja maior do que na capacidade de campo para manter a  $RP = 2,5\ MPa$ . Com isso, o

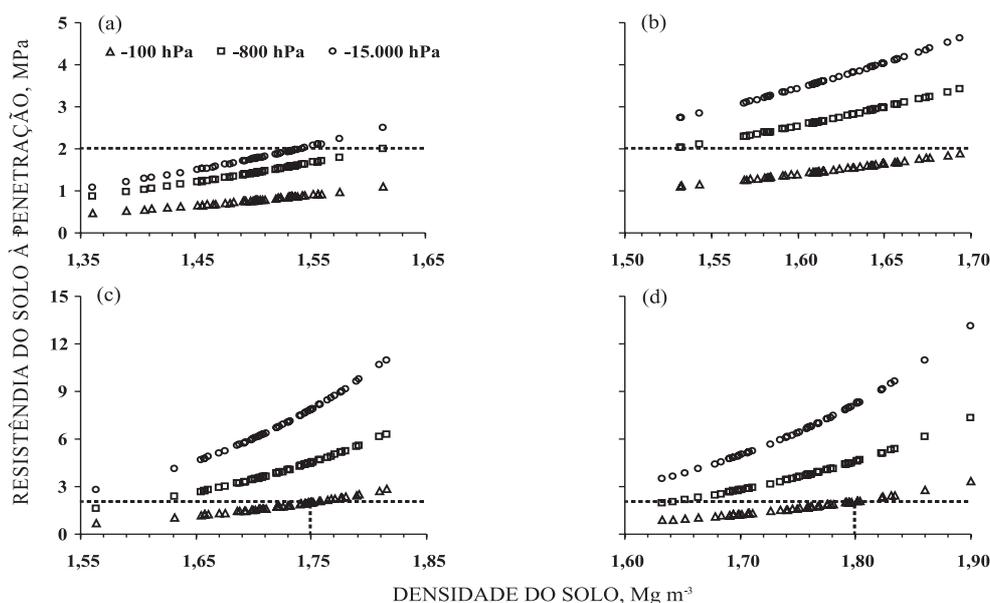


Figura 1. Variação da resistência do solo à penetração (RP) considerando a densidade do solo ( $D_s$ ) para diferentes conteúdos de água no solo ( $\theta$ ) nos potenciais matriciais ( $\Psi$ ) equivalentes à capacidade de campo ( $\Psi = -100$  hPa), limite de funcionamento de tensiômetros ( $\Psi = -800$  hPa) e ponto de murcha permanente ( $\Psi = -15.000$  hPa) para os tratamentos mata nativa (a), pastagem (b), citros (c) e culturas anuais (d).  $D_{sc}$  equivale à densidade do solo crítica em que  $RP = 2$  MPa. As linhas horizontais correspondem à RP crítica ( $RP = 2$  MPa) e as linhas verticais correspondem às densidades do solo críticas ( $D_{sc}$ ) no  $\Psi$  associado à capacidade de campo.

**Quadro 3.** Frequência relativa de amostras de solo com valores de densidade do solo ( $D_s$ ) maiores que os da densidade crítica -  $D_{sc}$  ( $RP \geq 2$  MPa) nos potenciais matriciais ( $\Psi$ ) equivalentes à capacidade de campo ( $\Psi = -100$  hPa), potencial matricial limite de funcionamento de tensiômetros ( $\Psi = -800$  hPa) e ponto de murcha permanente ( $\Psi = -15.000$  hPa) para mata nativa, pastagem, citros e culturas anuais

Tratamento	N	$\theta$		
		-100 hPa	-800 hPa	-15.000 hPa
		—— $D_s > D_{sc}$ (%) ——		
Mata nativa	48	-	-	16
Pastagem	48	-	100	100
Citros	48	33	98	100
Cultura anual	48	28	98	100

controle de  $\theta$  mantendo-se elevados valores no solo constitui uma estratégia de manejo para redução da RP, desde que a  $D_s$  esteja aquém dos valores mencionados. Todavia, a manutenção de maiores valores de  $\theta$  com vistas no controle da RP envolve a diminuição do espaço poroso preenchido por ar (porosidade de aeração). Dexter (1988) destacou o valor

de porosidade com ar de  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  como limite mínimo a partir do qual as raízes começam a reduzir seu crescimento por reduzida aeração. Os resultados deste trabalho mostram que na capacidade de campo a porosidade de aeração manteve-se acima do valor considerado restritivo às plantas (Quadro 1). Em solo similar cultivado com citros, Fidalski (2004) demonstrou que a manutenção da gramínea matogrosso ou batatais *Paspalum notatum* nas entrelinhas da cultura resulta em redução da RP, constituindo uma estratégia de manejo para o controle da qualidade física do solo.

Os resultados de Cotching & Belbin (2007) mostraram que o manejo da água no solo é importante no controle da RP e que, em solos com estrutura degradada, a taxa de aumento da RP com o secamento do solo é maior do que em solos bem estruturados. Com isso, solos bem estruturados suportam maior secamento sem que a RP atinja valores restritivos para o crescimento radicular das plantas. Além disso, a presença de bioporos estáveis e contínuos no solo pode contribuir para a formação de rotas alternativas de baixa RP, possibilitando o crescimento das raízes numa matriz de solo mais densa. O crescimento de raízes em bioporos foi sugerido por Ehlers et al. (1983) e confirmado recentemente por Williams & Weill (2004). Por outro lado, técnicas de manejo que incrementem a porosidade por meio da redução da  $D_s$  poderiam ser eficientemente utilizadas para manter a RP em níveis não-impeditivos às plantas, como

mostram Busscher et al. (1997). Vários autores têm demonstrado a eficiência de práticas como a escarificação e subsolagem na redução da RP (Camara & Klein, 2005; Klein & Camara, 2007), em geral associada à redução da Ds, apesar do efeito temporário dessas práticas.

No solo sob mata nativa, não houve ocorrência de valores de Ds > Dsc para valores de  $\theta$  superiores ao limite crítico de funcionamento dos tensiômetros ( $\Psi = -800$  hPa), no  $\Psi$  associado ao ponto de murcha permanente, 16 % das amostras apresentaram Ds > Dsc. Para os demais tratamentos, neste mesmo  $\Psi$ , 100 % das amostras apresentaram Ds > Dsc (Quadro 3). Para valores de  $\theta$  associadas ao  $\Psi$  de -800 hPa, 100, 98 e 98 % das amostras apresentaram Ds > Dsc para os solos com pastagem, citros e culturas anuais, respectivamente. Para os solos cultivados com citros e culturas anuais, mesmo em condições de elevada disponibilidade hídrica (capacidade de campo), 33 e 28 % das amostras, respectivamente, apresentaram Ds > Dsc (Quadro 3). Essas constatações evidenciam a degradação estrutural do solo com a intensificação do uso. Com isso, a manutenção de maior  $\theta$  no solo pode proporcionar diminuição do percentual de valores de Ds > Dsc, principalmente em solos com estrutura degradada, garantindo um ambiente com menores restrições físicas para o crescimento radicular das plantas. Portanto, para fins de manejo, a partir do manejo de  $\theta$ , pode-se estabelecer o limite crítico da Ds, e vice versa.

Com o aumento da Ds, ocorreu aumento expressivo na RP com a redução do  $\theta$  (Figura 2). No solo sob

mata, com estrutura preservada (Figura 2a), pode ocorrer maior secamento do solo sem que a RP apresente valores impeditivos às plantas, quando comparados aos das áreas com solos degradados (Figura 2c,d). Com o aumento da Ds, há necessidade de manter maiores valores de  $\theta$  com vistas no controle da RP ou da qualidade física do solo, evidenciando a degradação física do solo. No solo sob mata nativa, um valor de  $\theta$  de  $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  é suficiente para garantir a  $RP \leq 2,0$  MPa, enquanto nos solos cultivados com pastagem, citros e culturas anuais, respectivamente,  $\theta$  não deve ser inferior a 0,17; 0,21 e 0,22  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$  para manter  $RP \leq 2$  MPa.

Os resultados deste trabalho evidenciam que a utilização de pastagens em sistema planejado de rotação com agricultura (integração lavoura-pecuária) poderia constituir uma alternativa tecnicamente viável para o restabelecimento parcial da qualidade física do solo. Os resultados deste trabalho confirmam, ainda, que, em solos compactados, o controle da qualidade física é dependente da disponibilidade hídrica e que a redução da Ds por métodos que incrementem a porosidade via redução da Ds é uma alternativa para manter a RP em níveis não-impeditivos às plantas. A manutenção de  $\theta$  acima dos níveis críticos determinados pode ser uma alternativa para controle da RP, principalmente em sistemas em que as ações mecânicas são impossibilitadas dependendo da cultura estabelecida. Os resultados deste trabalho evidenciam que a degradação física do solo pode ser amenizada por meio do controle do  $\theta$  e da Ds, individualmente ou simultaneamente.

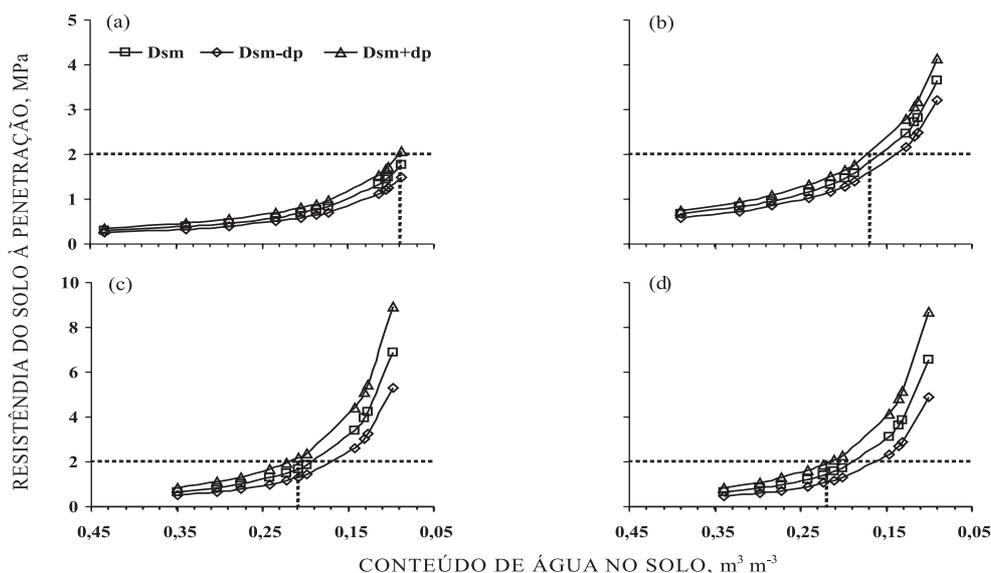


Figura 2. Variação da resistência do solo à penetração (RP), considerando o conteúdo de água do solo ( $\theta$ ) para diferentes valores de densidade do solo (Ds) para os tratamentos mata nativa (a), pastagem (b), citros (c) e culturas anuais (d). Dsm + dp = densidade média do solo + 1 desvio-padrão; Dsm = densidade média do solo para cada tratamento, Dsm-dp = densidade média do solo-1 desvio-padrão. As linhas horizontais correspondem à RP crítica adotada ( $RP = 2$  MPa) e as linhas verticais correspondem ao conteúdo de água em que a RP torna-se maior que 2 MPa.

## CONCLUSÕES

1. A curva de resistência do solo à penetração foi modificada pelos sistemas de uso e manejo, com dependência da densidade do solo e do conteúdo de água do solo, cujos modelos explicaram acima de 83 % ( $R^2 \geq 0,83$ ) da variação da resistência do solo à penetração.

2. As amplitudes de densidade do solo impostas pelo uso e manejo resultaram na necessidade de maior conteúdo de água no solo para manter os valores de resistência do solo à penetração igual ou inferior ao valor crítico de 2 MPa para o cultivo de citros e culturas anuais comparados aos da mata nativa e pastagem.

3. A variável conteúdo de água do solo apresentou maior influência sobre a resistência do solo à penetração, principalmente nos solos com estrutura degradada, sendo uma das estratégias para a manutenção da resistência do solo à penetração abaixo do limite restritivo ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

4. Sob os sistemas de uso do solo com citros e culturas anuais, verificaram-se elevados valores de resistência do solo à penetração com conteúdo de água no solo equivalente ou próximo à capacidade de campo ( $\Psi = -100$  hPa), caracterizando elevada degradação da qualidade física do solo.

## 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.
- BENGHOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, 41:341-358, 1990.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade do arroz sequeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:575-580, 2004.
- BOONE, F.R. & VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.237-264.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:519-524, 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 Till. Res.*, 43:205-217, 1997.
- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. *Ci. Rural*, 35:813-819, 2005.
- CAVALIERI, K.M.; 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.
- COTCHING, W.E. & BELBIN, K.C. Assessment of the influence of soil structure on soil strength/soil wetness relationships on Red Ferrosols in North-West Tasmania. *Aust. J. Soil Res.*, 45:147-152, 2007.
- DANE, J.H. & TOPP, G.C. *Methods of soil analysis. Part 4 – Physical methods*. 5.ed. Madison, Soil Science Society of America, 2002. 1692p.
- DEXTER, A.R. & YOUNGS, I.M. Soil physic toward 2000. *Soil Till. Res.*, 24:101-106, 1992.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.*, 11:199-238, 1988.
- EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.*, 3:261-275, 1983.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FIDALSKI, J. Propriedades físico-hídricas de um Argissolo Vermelho distrófico latossólico em diferentes sistemas de manejo das entrelinhas de citros. Maringá, Universidade Estadual de Maringá, 2004. 62p. (Tese de Mestrado).
- GRANATSTEIN, D. & BEZDICEK, D.F. The need for a soil quality index: Local and regional perspectives. *Am. J. Altern. Agric.*, 7:12-16, 1992.
- HAKANSSON, I. & LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.*, 53:71-85, 2000.
- 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 JÚNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação das pressões críticas para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18, 2001.
- KLEIN, V.A. & CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:221-227, 2007.
- KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:857-867, 2002.
- KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. & SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. *Eng. Agric.*, 18:45-54, 1998.

- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.635-660.
- 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. Critérios estatísticos na seleção de parâmetros para avaliação da resistência do solo à penetração. *Sci. Agric.*, 63:552-557, 2006.
- 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.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- LOGSDON, S.D.; ALLMARAS, R.R.; NELSON, W.W. & WOORHEES, W.B. Persistence of subsoil compaction from heavy axle loads. *Soil Till. Res.*, 23:95-100, 1992.
- MEROTTO JR., A. & MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:197-202, 1999.
- ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M. & CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:821-828, 1999.
- SAS Institute. *SAS/STAT procedure guide for personal computers*. 5.ed. Cary, 1999.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883, 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.
- TAYLOR, H.M. & RATLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci.*, 100:113-119, 1969.
- TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M. & PARKER, J.J. Soil strength root penetration for medium to coarse textured soil materials. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 102:18-22, 1966.
- TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:305-314, 2002.
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- 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 potencial de água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Eng. Agric.*, 3:86-292, 1999.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:1220-1225, 1984.
- WILLIAMS, S.M. & WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1403-1409, 2004.
- ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. & HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. *Aust. J. Soil Res.*, 28:947-958, 2000.