

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA AS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA E DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO⁽¹⁾

Álvaro Pires da Silva⁽²⁾, Cássio Antonio Tormena⁽³⁾, Jonez Fidalski⁽⁴⁾ & Silvia Imhoff⁽⁵⁾

RESUMO

Funções de Pedotransferência (FPT) são ferramentas úteis para estimar, a partir de características inerentes ao solo, propriedades físicas deste, como a curva de retenção de água do solo (CRA) e a curva de resistência à penetração (CRP). A maioria dos trabalhos na literatura reporta FPT para estimar apenas a CRA. Um importante e necessário avanço nessa área de pesquisa seria o desenvolvimento de FPT para estimar a CRA e a CRP simultaneamente, objetivo deste trabalho. Uma área com solos que apresentam grande variação de textura foi selecionada; nelas 180 amostras foram obtidas para medir a CRA, a CRP, a densidade do solo, a análise granulométrica e o teor de C orgânico. A CRA e a CRP foram estimadas com sucesso, com coeficiente de determinação ($R^2 > 0,9$). O teor de argila foi a variável mais importante na definição das FPT, e o seu efeito na CRA e CRP foi demonstrado.

Termos de indexação: argila, funções de pedotransferência, densidade do solo, carbono orgânico do solo, qualidade física do solo.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em novembro de 2006 e aprovado em agosto de 2007.

⁽²⁾ Professor Titular, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Caixa Postal 09, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: apisilva@esalq.usp.br

⁽³⁾ Professor Associado, Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

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

⁽⁵⁾ Professora da Universidad Nacional del Litoral. Av. Kreder 2805, CEP 3080 Esperanza, Argentina. E-mail: simhoff@unl.edu.ar

SUMMARY: PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR THE SOIL WATER RETENTION AND SOIL RESISTANCE TO PENETRATION CURVES

Pedotransfer functions (PTFs) are useful tools to obtain estimates of soil physical properties such as the soil water retention curve (SWRC) and the soil resistance to penetration curve (SRPC), which are important inherent soil properties and difficult to measure. Most of the studies in the literature report PTFs only in relation to SWRC estimates. An important and necessary advance in this research area would be the development of PTFs for a simultaneous estimation of the SWRC and SRPC, which is the objective of this paper. An area with wide variation in soil texture was selected where 180 samples were collected for the measurement of SWRC, SRPC, bulk density, soil texture and organic carbon content. Both SWRC and the SRPC were successfully estimated with the coefficient of determination ($R^2 > 0.9$). Clay content was the most important soil property to determine the PTFs and its effect on SWRC and SRPC was demonstrated.

Index terms: clay, pedotransfer functions, soil bulk density, soil carbon organic, soil physical quality, soil water retention curve.

INTRODUÇÃO

A representação matemática das curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração é necessária em estudos de qualidade física e estrutural do solo, para crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas. Estratégias para simplificar a obtenção das curvas de retenção de água do solo e de resistência do solo à penetração são necessárias e, nesse contexto, justifica-se a utilização de funções de pedotransferência.

O termo função de pedotransferência foi introduzido por Bouma (1989) para padronizar outros termos anteriormente utilizados com a mesma finalidade (McBratney et al., 2002). Funções de pedotransferência podem ser definidas como funções utilizadas para fazer estimativas de propriedades dos solos a partir de outras propriedades medidas rotineiramente com maior facilidade e baixo custo (McBratney et al., 2002).

Diferentes abordagens têm sido utilizadas para o desenvolvimento de funções de pedotransferência, a exemplo daquelas descritas em Minasny et al. (1999), Cornelis et al. (2001), Minasny & McBratney (2002) e McBratney et al. (2002). Na literatura predominam trabalhos que apresentam funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica saturada, para a curva de retenção de água no solo, especialmente em solos de regiões de clima temperado (Wösten et al., 1999, 2001), os quais apresentam diferenças importantes em relação aos solos tropicais (Hodnett & Tomasella, 2002).

No Brasil, Berg et al. (1997), Tomasella & Hodnett (1998) e Tomasella et al. (2000) desenvolveram funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água do solo, utilizando as equações de Brooks-Corey ou van Genuchten (1980). Arruda et al. (1987) fizeram a primeira tentativa do uso de equações de regressão

para estimar a água disponível com base na textura do solo; Bernoux et al. (1998) verificaram que a densidade do solo poderia ser prevista com bom nível de exatidão a partir do teor de argila do solo; e Giarola et al. (2002) obtiveram regressões múltiplas para estimar os teores de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível em função dos teores de argila, silte e óxidos de Fe e de Al.

Outras importantes propriedades do solo mensuráveis a partir de métodos mais sofisticados também podem ser estimadas a partir das funções de pedotransferência (McBratney et al., 2002). Dentre estas, destaca-se a resistência do solo à penetração, que é uma propriedade física do solo diretamente associada ao crescimento e desenvolvimento de plantas (Letey, 1985; Passioura, 2002; Bengough et al., 2006), comumente medida e utilizada como indicador da qualidade física do solo. A resistência do solo à penetração é uma medida do impedimento mecânico que o solo oferece às raízes, sendo um dos mais comumente citados fatores físicos que afetam o crescimento das raízes. O impedimento mecânico ao crescimento radicular é fortemente correlacionado com a resistência mecânica do solo medida com penetrômetros (Bengough & Mullins, 1990).

Dentre os fatores que afetam a medida da resistência do solo à penetração, destacam-se a umidade e a densidade do solo (Camp & Lund, 1968; Pabin et al., 1998). A partir da relação funcional entre a resistência do solo à penetração, o teor de água e a densidade do solo, estabelece-se a curva de resistência do solo à penetração, a qual é fortemente influenciada pela textura e pelo C orgânico do solo (Smith et al., 1997; Pachepsky et al., 1998; Whalley et al., 2005). O uso de funções de pedotransferência para estimar a resistência do solo à penetração ainda é restrito. Nesse sentido, Silva & Kay (1997) desenvolveram uma função de pedotransferência para estimar a curva de

resistência à penetração em solos canadenses com ampla variação do teor de argila e matéria orgânica do solo. Grunwald et al. (2001) sugerem que as funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração deveriam incorporar informações relacionadas à estrutura do solo e à matéria orgânica do solo. Posteriormente, To & Kay (2005) afirmaram que a variação dos dados de resistência do solo à penetração em função do potencial da água no solo – ou, alternativamente, do teor de água – é dependente da textura do solo. Associada ao teor de água do solo, a variação dessas características explicaria parte da variabilidade temporal e espacial da resistência do solo à penetração (Imhoff et al., 2000; Utset & Cid, 2001; Fidalski et al., 2006).

As poucas funções de pedotransferências desenvolvidas no Brasil incorporaram grande variação de solos com ampla diversidade pedogenética e mineralógica (Tomasella et al., 2000). Por outro lado, há carência de estudos que tratam do desenvolvimento de funções de pedotransferência para estimar simultaneamente as curvas de retenção de água do solo e de sua resistência à penetração em Latossolos. O objetivo deste estudo foi desenvolver funções de pedotransferência para estimar a curva de retenção de água do solo e a curva de resistência do solo à penetração em Latossolos Vermelhos com ampla variação textural.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em área pertencente à Usina Barra Grande, localizada no município de Lençóis Paulista, SP (22° 37' 31" S, 48° 46' 40" W). A área vem sendo cultivada com cana-de-açúcar há 25 anos. Com base no mapa de solos da Usina Barra Grande, foi selecionada uma topossequência de 1.000 m de comprimento, que apresentava ampla variabilidade textural (Quadro 1), compreendendo desde Latossolo Vermelho distrófico até Latossolo Vermelho eutrófico (Embrapa, 1999). Esta topossequência foi inicialmente amostrada e, a partir da avaliação dos dados granulométricos (argila, silte e areia), selecionaram-se cinco segmentos dela, que permitiram ampla variação textural para expressar também variação nas características de retenção de água e resistência do solo à penetração.

Em cada um dos segmentos da topossequência de solos, coletaram-se 36 amostras de solo deformadas e indeformadas nas posições linha e entrelinha das plantas de cana-de-açúcar, na camada de 5–10 cm de profundidade, totalizando 180 pontos. As amostras deformadas foram utilizadas para análise granulométrica das frações argila (< 0,002 mm), silte (0,002 < 0,02 mm) e areia (0,02–2 mm) pelo método do hidrômetro (Gee & Or, 2002), e a determinação do C orgânico do solo foi feita por combustão a seco no analisador LECO-412.

As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos com aproximadamente 100 cm³ (5 cm de diâmetro e de altura). Os anéis foram introduzidos verticalmente no perfil, por percussão, utilizando um amostrador. Inicialmente, essas amostras foram saturadas por capilaridade em bandejas, até atingir cerca de dois terços da altura das amostras. Três amostras de cada um dos segmentos da topossequência de solo foram submetidas a cada um dos 12 potenciais mátricos: -10, -20, -30, -40, -60, -80 e -100 cm de coluna de água (c.c.a.) numa mesa de tensão (Romano et al., 2002) e -300, -500, -1.000, -5.000 e -15.000 c.c.a. por meio de pressões aplicadas em placas porosas (Dane & Hopmans, 2002). Após atingirem o equilíbrio, as amostras foram utilizadas para determinar a resistência do solo à penetração e, em seguida, secas em estufa a 110 °C, para determinação do teor de água e da densidade do solo (Grossman & Reinsch, 2002).

A resistência do solo à penetração foi determinada em cada amostra após aplicação dos potenciais já especificados, com o que se estabeleceu um gradiente do teor de água entre as amostras. Utilizou-se de um penetrômetro desenvolvido no Laboratório de Física de Solos da ESALQ-USP e descrito por Tormena et al. (1998). Para determinação da resistência do solo à penetração, foi feita uma medida no centro geométrico de cada amostra. A velocidade de penetração foi de 1 cm min⁻¹ até a profundidade de 4 cm. A frequência de amostragem correspondeu à coleta de um valor de resistência do solo à penetração a cada 0,6767, obtendo-se um total de 266 leituras, das quais um valor médio de resistência do solo à penetração foi utilizado.

O ajuste das curvas de retenção de água do solo foi feito utilizando-se a equação de Hutson & Cass (1987), os quais introduziram uma modificação na equação proposta por Brooks-Corey (Brooks & Corey, 1964) para descrever a curva de retenção para potenciais maiores que o potencial de entrada de ar no solo. A equação proposta por Hutson & Cass (1987) vem sendo muito usada na literatura (Mayr & Jarvis, 1999; Cresswell & Paydar, 2000; Tormena & Silva, 2002). A escolha dessa equação deveu-se ao fato de que esse modelo, igualmente ao proposto por van Genuchten (1980), ajusta a curva de retenção desde a saturação até o ponto de murcha permanente (potencial da água no solo de -15.000 c.c.a), com a vantagem de apresentar apenas dois parâmetros, em oposição aos cinco existentes na equação de van Genuchten (1980).

A versão simplificada da equação de Hutson & Cass (1987) utilizada para descrever a retenção de água na parte mais seca da curva (porção exponencial) é descrita na equação 1:

$$\theta = \theta_s(\Psi/a)^{-1/b}, \text{ desde que atenda à condição:}$$

$$(\theta \leq \theta_i \text{ ou } \Psi \leq \Psi_i) \quad (1)$$

a qual é combinada com a equação parabólica para descrever os dados de $\theta(\Psi)$ na parte mais úmida da curva (porção parabólica), descrita na equação 2:

$\theta = \theta_s - \{[(\theta_s \Psi^2)(1 - \theta_i/\theta_s)]/[a^2(\theta_i/\theta_s)^{-2b}]\}$, desde que atenda à condição:

$$\theta \geq \theta_i \text{ ou } \Psi \geq \Psi_i \quad (2)$$

em que Ψ é o potencial mátrico (MPa); θ , o teor de água volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_s , o teor de água do solo

na saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); e a e b , os coeficientes da equação. Os valores de θ e Ψ no ponto de inflexão (θ_i e Ψ_i) são também parâmetros que podem ser calculados a partir das estimativas de a e b , conforme as equações 3 e 4:

$$\theta_i = [(2b\theta_s)/(1 + 2b)] \quad (3)$$

Quadro 1. Momentos estatísticos das variáveis teores de argila, areia, silte, densidade do solo (Ds), teor de água (θ), resistência do solo à penetração (RP) e carbono orgânico (CO), para cada um dos cinco segmentos da topossequência (n = 36), na camada de 5-10 cm de profundidade

Variável	Média	Mínimo	Máximo	CV(%)
1º segmento da topossequência – textura média ⁽¹⁾				
Argila (%)	22,02	16,40	26,30	11,27
Areia (%)	72,15	66,90	77,80	3,48
Silte (%)	5,84	0,20	8,60	32,84
Ds (g cm^{-3})	1,73	1,61	1,82	3,23
θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,22	0,09	0,33	31,22
RP (MPa)	1,57	0,16	6,52	94,56
CO (g kg^{-1})	6,50	4,40	8,70	18,62
2º segmento da topossequência – textura média/argilosa ⁽¹⁾				
Argila (%)	31,19	27,00	35,80	7,77
Areia (%)	61,33	54,80	66,60	4,42
Silte (%)	7,47	1,70	11,00	30,76
Ds (g cm^{-3})	1,70	1,59	1,81	3,73
θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,26	0,16	0,34	19,69
RP (MPa)	1,70	0,42	4,98	67,44
CO (g kg^{-1})	8,60	6,10	11,5	17,65
3º segmento da topossequência – textura argilosa ⁽¹⁾				
Argila (%)	38,99	30,60	45,40	8,88
Areia (%)	50,36	40,70	57,40	6,29
Silte (%)	10,65	2,00	15,50	24,53
Ds (g cm^{-3})	1,62	1,41	1,74	5,29
θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,30	0,20	0,40	15,44
RP (MPa)	1,49	0,39	3,82	65,76
CO (g kg^{-1})	10,0	7,00	12,3	16,29
4º segmento da topossequência – textura argilosa ⁽¹⁾				
Argila (%)	48,07	39,90	54,70	7,93
Areia (%)	40,01	34,20	47,20	8,11
Silte (%)	11,93	6,20	17,20	18,17
Ds (g cm^{-3})	1,51	1,38	1,63	4,60
θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,33	0,25	0,40	13,37
RP (MPa)	1,18	0,25	3,22	65,11
CO (g kg^{-1})	11,4	8,4	14,2	15,01
5º segmento da topossequência – textura argilosa/muito argilosa ⁽¹⁾				
Argila (%)	57,97	50,10	69,20	7,72
Areia (%)	25,30	15,70	37,00	16,83
Silte (%)	16,73	11,10	20,60	13,22
Ds (g cm^{-3})	1,41	1,29	1,53	4,75
θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,36	0,27	0,45	14,16
RP (MPa)	1,07	0,23	2,38	57,35
CO (g kg^{-1})	14,2	10,8	18,5	13,38

⁽¹⁾ Grupamento textural (Embrapa, 2006).

$$\Psi_i = a[2b/(1 + 2b)]^{-b} \quad (4)$$

O ajuste matemático dos coeficientes (a e b), em relação as variáveis básicas do solo, teor de argila, C orgânico do solo e densidade do solo, foi realizado conforme método descrito por Silva & Kay (1997).

A curva de resistência do solo à penetração é definida pela dependência da resistência do solo à penetração em relação ao teor de água e à densidade do solo. Excelentes resultados foram obtidos por Silva et al. (1994), Silva & Kay (1997), Tormena et al. (1998), Imhoff et al. (2000), Fidalski (2004), Cavaliere et al. (2006) e Leão et al. (2006) na descrição da curva de resistência do solo à penetração por meio da equação não-linear proposta por Busscher (1990), a qual é utilizada no ajuste dos dados de resistência do solo à penetração deste trabalho, descrita pela equação 5:

$$RP = c \theta^d Ds^e \quad (5)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ é o teor de água volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Ds é a densidade do solo (g cm^{-3}), sendo c , d e e os coeficientes da equação. A relação de dependência entre os componentes granulométricos e C orgânico do solo com estes parâmetros foi descrita de acordo com Silva & Kay (1997).

Os parâmetros e os coeficientes de regressão da equação matemática das curvas de retenção de água do solo e de resistência do solo à penetração foram ajustados pelo método de Gauss-Newton e procedimento PROC NLIN (SAS, 2001), utilizando-se

180 dados de cada uma das variáveis. O coeficiente de determinação (R^2) das equações não-lineares foi calculado pela diferença da soma dos quadrados (SQ) do resíduo e total [$R^2 = 1 - (\text{SQ}_{\text{resíduo}}/\text{SQ}_{\text{total}})$].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os momentos estatísticos das variáveis utilizadas na geração das funções de pedotransferência são mostrados no quadro 1. A equação de Hutson & Cass (1987) ajustada aos dados de retenção de água do solo explicou 93 % ($R^2 = 0,93$) da variação do teor de água obtida nas amostras de solo. A análise estatística dos resíduos da equação ajustada comprovou que estes apresentaram distribuição normal ($p > 0,05$). As estimativas dos parâmetros da equação foram significativamente dependentes dos teores de argila (Quadro 2), por terem apresentado intervalos de confiança que não incluíam valor zero, de acordo com o critério proposto por Glantz & Sliker (1990). O C orgânico e a densidade do solo não apresentaram efeito no ajuste da equação da curva de retenção de água. Esse comportamento pode ser explicado pela elevada correlação ($p < 0,0001$) dos teores de C orgânico e da densidade do solo com os teores de argila do solo, com coeficiente de correlação de 0,84 e 0,79, respectivamente. A forte influência da argila na retenção da água no solo corrobora os dados apresentados por diversos estudos (Williams et al., 1992; Silva & Kay, 1997; Smith et al., 1997; Tomasella & Hodnett, 1998; Mayr & Jarvis, 1999; Giarola et al., 2002; Rawls et al., 2003),

Quadro 2. Resultados da regressão não-linear para a curva de retenção de água do solo e para a curva de resistência do solo à penetração

Coeficiente	Estimativa	Erro-padrão	Intervalo de confiança ($p \leq 0,05$)	
			Inferior	Superior
Curva de retenção de água do solo ⁽¹⁾				
a_1	3,0846	0,4278	2,2404	3,9289
a_2	-0,0441	0,0006	-0,0563	-0,0320
b_1	0,9354	0,4446	0,0579	1,8129
b_2	0,2863	0,0133	0,2600	0,3126
Curva de resistência do solo à penetração ⁽²⁾				
c_1	0,0121	0,0027	0,0067	0,0175
c_2	-0,0001	0,0001	-0,0002	-0,0001
d_1	-0,8546	0,1708	-1,1917	-0,5174
d_2	-0,0412	0,0056	-0,0522	-0,0302
e_1	2,9110	0,6619	1,6047	4,2173
e_2	0,0428	0,0168	0,0096	0,0759

⁽¹⁾ Coeficientes da curva de retenção de água do solo - equações 1, 2, 3 e 4: $a = (a_1 + a_2 \text{ argila})$; $b = (b_1 + b_2 \text{ argila})$. ⁽²⁾ Coeficientes da curva de resistência do solo à penetração - equação 5: $c = (c_1 + c_2 \text{ argila})$; $d = (d_1 + d_2 \text{ argila})$; $e = (e_1 + e_2 \text{ argila})$.

tendo o teor de argila incorporado os efeitos isolados do C orgânico e da densidade do solo no ajuste dos dados à equação de retenção de água do solo (Quadro 2).

As funções de pedotransferência das curvas de retenção de água do solo – equações 6 a 10 (Quadro 3) – atenderam à condição ($\theta \leq \theta_i$ ou $\Psi \leq \Psi_i$) da equação de Hutson & Cass (1987). As funções de pedotransferências específicas para cada um dos cinco segmentos de solos da topossequência (equações 11 a 15) indicam que o aumento do teor de argila reduz o valor do coeficiente *a* e eleva o valor do coeficiente *b*, implicando maiores valores de teor de água. O efeito do aumento da retenção de água pelo solo com o incremento de argila é observado em todos os Ψ (Figura 1), de acordo com Berg et al. (1997) e Hodnett & Tomasella (2002). Contudo, o teor de água disponível no solo ($\theta_{100 \text{ c.c.a.}} - \theta_{15.000 \text{ c.c.a.}}$), obtido a partir das funções de pedotransferência, foi similar entre os diferentes teores de argila: 0,1215 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (22,02 % de argila), 0,1115 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (31,19 % de argila), 0,1079 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (38,99 % de argila), 0,1043 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (48,07 % de argila) e 0,0988 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (57,97 % de argila), caracterizando a homogeneidade da água disponível em toda a extensão dos solos na topossequência.

A equação da curva de resistência do solo à penetração explicou 91 % ($R^2 = 0,91$) da variabilidade da resistência do solo à penetração, com os resíduos da equação apresentando distribuição normal ($p < 0,05$). As estimativas dos coeficientes da equação apresentaram ajuste dos dados com dependência exclusivamente dos teores de argila (Quadro 2), indicando que esta foi sensível ao efeito da textura do solo na equação ajustada. Não foi verificada influência dos teores de C orgânico do solo na curva de resistência do solo, contrariando os resultados obtidos por Smith et al. (1997), Kay & Silva (1997), Fidalski (2004) e To & Kay (2005). Todos os coeficientes da equação ajustada

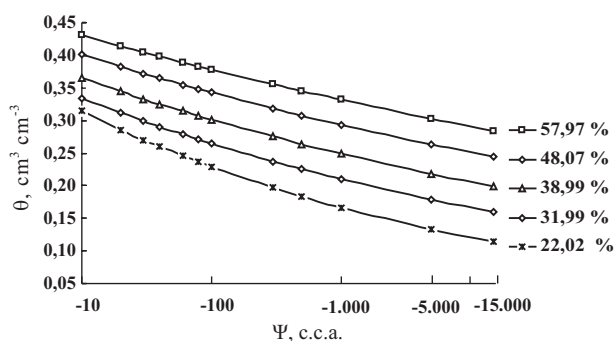


Figura 1. Curvas de retenção da água do solo obtida das funções de pedotransferência para teores crescentes de argila. A descrição linear das curvas de retenção de água do solo se deve à utilização da escala logarítmica de Ψ (cm de coluna de água – c.c.a.).

foram estatisticamente significativos, por terem apresentado intervalos de confiança sem nenhum valor nulo (Glantz & Sliker, 1990). A dependência da resistência à penetração do solo em relação ao seu teor de argila também foi verificada experimentalmente por Harper & Gilkes (2004), Silva & Kay (1997) e Zou et al. (2000).

A função de pedotransferência da curva de resistência do solo à penetração (equação 16) é apresentada no quadro 3. As funções de pedotransferência, específicas para cada um dos cinco segmentos da topossequência de solos (equações 17 a 21), revelam que o aumento do teor de argila eleva o valor do intercepto *c*, reduz o valor do coeficiente *d* e eleva o valor do coeficiente *e* da densidade do solo. A relação negativa entre resistência do solo à penetração e o teor de água do solo, e a relação positiva entre a resistência do solo à penetração e a densidade do solo, é amplamente constatada na literatura para solos com diferentes teores de argila, tendo os coeficientes *d* e *e* das equações 17 a 21 apresentado valores próximos aos descritos em vários estudos (Silva et al., 1994; Silva & Kay, 1997; Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2000; Cavalieri et al., 2006; Leão et al., 2006). A presença da variável teor de argila em todos os coeficientes da equação pode ter, indiretamente, incorporado os efeitos do C orgânico do solo, em face da estreita relação de dependência entre essas variáveis – similar aos efeitos observados na curva de retenção de água do solo (Quadro 3).

A utilização da curva de resistência do solo na avaliação e no controle da qualidade física deste tem sido preconizada (Imhoff et al., 2000), e a aplicação de funções de pedotransferência pode ser útil nesse sentido. As equações descritivas da resistência à penetração foram aplicadas considerando-se os teores médios de argila, a amplitude de variação da densidade e os teores de água em diferentes potenciais obtidos a partir da equação da curva de retenção de água para cada segmento da topossequência. Independentemente do potencial da água no solo, a resistência do solo à penetração diminuiu com o incremento de argila e do teor de água no solo, bem como a redução da densidade do solo (Figura 2). O valor de resistência do solo à penetração de 2 MPa tem sido frequentemente usado como crítico para o crescimento das plantas (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Lapen et al., 2004). No teor de água equivalente à capacidade de campo (potencial da água no solo de -100 c.c.a.) não se verificaram valores de resistência do solo à penetração acima de 2 MPa, assumido como o valor crítico para as plantas. Ou seja, independentemente da variação de textura na topossequência, uma vez que o teor de água seja mantido próximo à capacidade de campo, não há restrições mecânicas para o crescimento de raízes. No entanto, com o secamento do solo (potenciais de -330, -800 e -15.000 c.c.a.), verifica-se aumento nas restrições devido à elevação da resistência do solo à penetração (Figura 2) para valores muito superiores a 2 MPa, em concordância com Tormena et al. (1999) e Imhoff et al. (2000).

Quadro 3. Funções de pedotransferência das curvas de retenção de água do solo e curva de resistência do solo à penetração

Função de pedotransferência	
Curva de retenção de água do solo	
$\hat{\theta} = \theta_s [\Psi / (3,0846 - 0,0441 * \text{argila})]^{-1 / (0,9354 + 0,2863 * \text{argila})}$ ($\theta \leq \theta_i$ ou $\Psi \leq \Psi_i$)	(6)
$\hat{\theta} = \theta_s - \{ \theta_s \Psi^2 [(1 - \theta_i / \theta_s) / (3,0846 - 0,0441 * \text{argila})^2 (\theta_i / \theta_s)^{-2(0,9354 + 0,2863 * \text{argila})}] \}$ ($\theta > \theta_i$ ou $\Psi > \Psi_i$)	(7)
$\hat{\theta}_i = \{ [2(0,9354 + 0,2863 * \text{argila}) \theta_s] / [1 + 2(0,9354 + 0,2863 * \text{argila})] \}$	(9)
$\hat{\Psi}_i = (3,0846 - 0,0441 * \text{argila}) \{ [2(0,9354 + 0,2863 * \text{argila})] / [1 + 2(0,9354 + 0,2863 * \text{argila})] \}^{- (0,9354 + 0,2863 * \text{argila})}$	(10)
$\hat{\theta}$ (22,92% de argila) = $\theta_s [\Psi / (2,1170)]^{-0,1383}$	(11)
$\hat{\theta}$ (31,19% de argila) = $\theta_s [\Psi / (1,7122)]^{-0,1014}$	(12)
$\hat{\theta}$ (38,99% de argila) = $\theta_s [\Psi / (1,3690)]^{-0,0827}$	(13)
$\hat{\theta}$ (48,07% de argila) = $\theta_s [\Psi / (0,9695)]^{-0,0680}$	(14)
$\hat{\theta}$ (57,97% de argila) = $\theta_s [\Psi / (0,5326)]^{-0,0570}$	(15)
Curva de resistência do solo à penetração	
$RP = [0,0121 - (0,0001 * \text{argila})] \theta^{- (0,8546 - 0,0412 * \text{argila})} D_s^{(2,9110 + 0,0482 * \text{argila})}$	(16)
RP (22,02% de argila) = $0,0099 \theta^{- (1,7606)} D_s^{(3,9709)}$	(17)
RP (31,19% de argila) = $0,0090 \theta^{- (2,1396)} D_s^{(4,4144)}$	(18)
RP (38,99% de argila) = $0,0082 \theta^{- (2,4610)} D_s^{(4,7903)}$	(19)
RP (48,07% de argila) = $0,0073 \theta^{- (2,8351)} D_s^{(5,2280)}$	(20)
RP (57,97% de argila) = $0,0063 \theta^{- (3,2442)} D_s^{(5,7066)}$	(21)

Argila (%), Ψ (potencial mátrico, cm), θ (conteúdo de água no solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), RP (resistência do solo à penetração, MPa) e D_s (densidade do solo, g cm^{-3}).

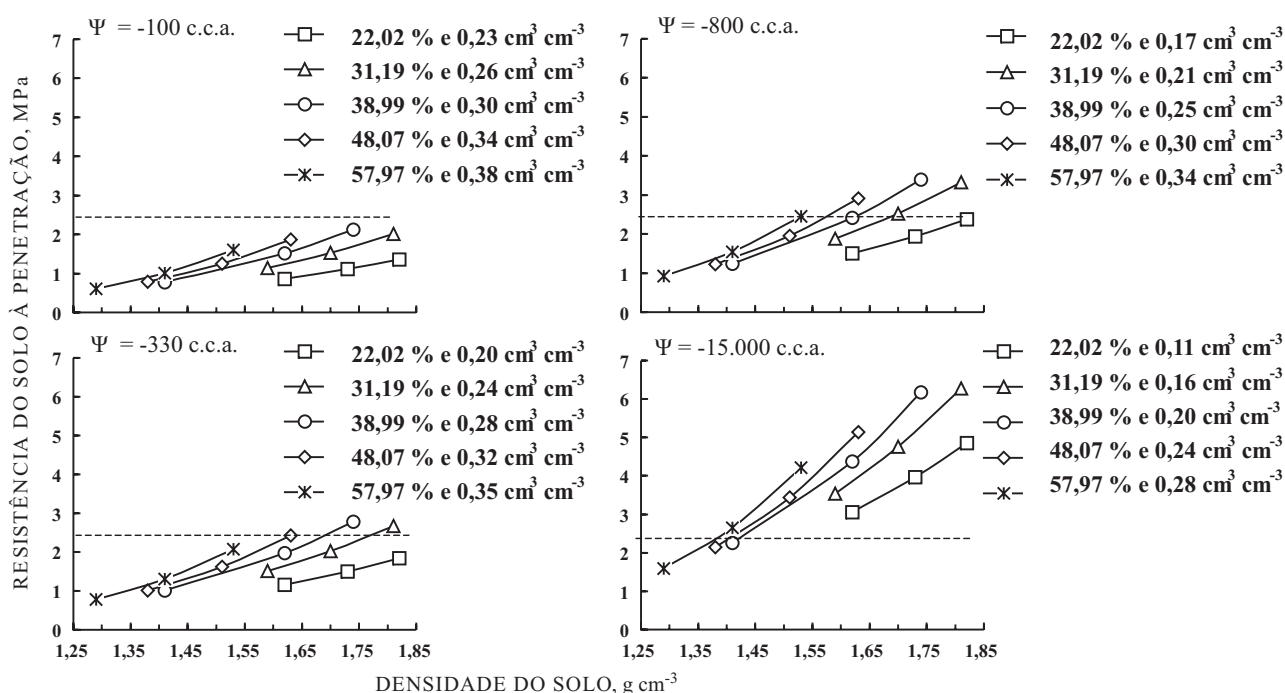


Figura 2. Resistência do solo à penetração (RP) em função dos valores mínimo, médio e máximo da densidade do solo (D_s), para os teores de argila (%) e de água (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em quatro potenciais mátricos (Ψ).

O teor de água no solo apresenta elevada variabilidade espacial e temporal e, por conseqüência, estabelece o seu aumento da resistência do solo à penetração com o seu secamento e umedecimento. Em condições não-irrigadas, além da redução das perdas de água, o controle da densidade do solo assume fundamental importância para sua qualidade física. A densidade do solo pode ser tomada como crítica a partir do momento em que a resistência deste à penetração atinge o valor de 2 MPa. Verifica-se que os valores de densidade crítica do solo são dependentes do teor de argila e do teor da água no solo ou potencial da água no solo (Figuras 2 e 3). O comportamento hídrico da toposseqüência sugere menores restrições físicas para o crescimento e desenvolvimento das raízes com o aumento dos teores de argila, o que é confirmado pela presença de valores de densidade abaixo do valor crítico (Figura 3 e Quadro 1). Com a maior drenagem nos solos com menor teor de argila, o incremento em resistência do solo à penetração ocorre provavelmente associado à maior coesão e ângulo de fricção interna (Camp & Gill, 1969) e à maior fricção interpartículas devido ao aumento de densidade do solo (Vepraskas, 1984). Ao atingir o ponto de murcha permanente (potencial da água no solo de -15.000 c.c.a.), somente o segmento da toposseqüência com 57,97 % de argila apresentaria densidade crítica do solo ($1,30 \text{ g cm}^{-3}$), dentro do intervalo de dados avaliados (Figura 2). Esses resultados sugerem a busca por opções de manejo de solo para manter ou reduzir sua densidade, de modo a não acentuar a restrição física imposta pela resistência do solo à penetração.

CONCLUSÕES

1. As curvas de retenção de água do solo e de resistência do solo à penetração foram ajustadas em função dos teores de argila.

2. O acréscimo do teor de argila no solo reduz a amplitude da densidade deste para manter o mesmo valor de resistência do solo à penetração em potenciais mátricos equivalentes.

3. As funções de FPT geradas neste trabalho demonstraram elevado poder para a avaliação, o monitoramento e o controle da qualidade física do solo.

LITERATURA CITADA

- ARRUDA, F.B.; ZULLO JR., J. & DE OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:11-15, 1987.
- BENGOUGH, 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.
- 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. Exp. Bot.*, 57:437-447, 2006.
- BERG, M.V.D.; KLAMT, E.; REEUWIJK, L.P.V. & SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, 78:161-180, 1997.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B. & JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:743-749, 1998.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B.A., ed. *Advances in soil science*. New York, Springer Verlag, 1989. v.9. p.177-213.
- BROOKS, R.H. & COREY, C.T. *Hydraulic properties of porous media*. Fort Collins, Colorado State University, 1964. (Hydrol. Paper, 3)

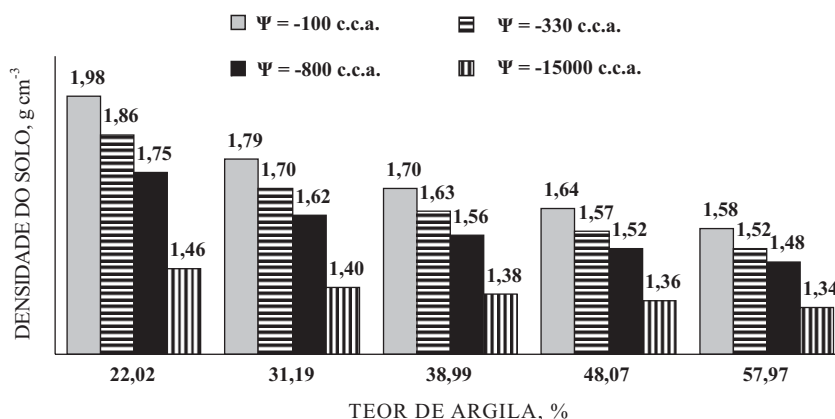


Figura 3. Densidade crítica do solo (D_s) para crescimento das raízes quanto à resistência do solo à penetração de 2,0 MPa em função dos teores médios de argila e do teor de água nos potenciais mátricos (Ψ) de -100, -330, -800 e -15.000 c.c.a., em cada segmento da toposseqüência.

- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 33:519-524, 1990.
- CAMP, C. R. & W. GILL, R. The effect of drying on soil strength parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 33:641-644, 1969.
- CAMP JR, C.R. & LUND, Z. Effect of mechanical impedance on cotton root growth. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 11:168-190, 1968.
- 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.
- CRESSWELL, H.P. & PAYDAR, Z. Functional evaluation of methods for predicting the soil water characteristic. *J. Hidrol.*, 227:160-172, 2000.
- 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.
- EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 1999. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, Sistema de Produção de Informação, 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)
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. & OLIVEIRA JÚNIOR, R.S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho distroférrico. *Ci. Rural*, 36:1773-1779, 2006.
- GEE, G. & OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. v.4. p.255-293.
- GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. & IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:885-893, 2002.
- GLANTZ, S.A. & SLIKER, B.K. *Primer of applied regression and analysis of variance*. New York, McGraw-Hill, 1990. 777p.
- GROSSMAN, R.B. & REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. v.4. p.201-228.
- GRUNWALD, S.; ROONEY, D.J.; McSWEENEY, K. & LOWERY, B. Development of pedotransfer functions for a profile cone penetrometer. *Geoderma*, 100:25-47, 2001.
- HARPER, R.J. & GILKES, J. The effects of clay and sand additions on the strength of sandy topsoils. *Aust. J. Soil Res.*, 42:39-44, 2004.
- HODNETT, M.G. & TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. *Geoderma*, 108:155-180, 2002.
- HUTSON, J.L. & CASS, A. A retentivity function for use in soil-water simulation models. *J. Soil Sci.*, 38:105-113, 1987.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:1493-1500, 2000.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.*, 78:151-170, 2004.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Till. Res.*, 88:279-285, 2006.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- MAYR, T. & JARVIS, N.J. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks-Corey type model. *Geoderma*, 91:1-9, 1999.
- McBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R. & VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109:41-73, 2002.
- MINASNY, B. & McBRATNEY, A.B. The efficiency of various approaches to obtaining estimatives of soil hydraulic properties. *Geoderma*, 107:55-70, 2002.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B. & BRISTOW, K. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93:225-253, 1999.
- PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A. & KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil Till. Res.*, 46:203-208, 1998.
- PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W.; GIMENÉZ, D. & WATT, J.P.C. Use of soil penetration resistance and group method of data handling to improve soil water retention estimates. *Soil Till. Res.*, 49:117-126, 1998.
- PASSIOURA, J.B. Soil conditions and plant growth. *Plant Cell Environ.*, 25:311-318, 2002.
- RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C.; SOBECKI, T.M. & BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water holding capacity. *Geoderma*, 116:61-76, 2003.
- 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.

- SAS Institute. SAS/STAT. User's guide. Version 8.2. Cary, 2001. 943p.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil 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.
- SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A. & LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. *Geoderma*, 78:93-111, 1997.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER JR., J.J. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TO, J. & KAY, B.D. Variation in penetrometer resistance with soil properties: The contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*, 126:261-276, 2005.
- TOMASELLA, J. & HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Sci.*, 163:190-202, 1998.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:327-338, 2000.
- 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.; 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. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Till. Res.*, 52, 223-232, 1999.
- UTSET, A. & CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil Till. Res.*, 61:193-202, 2001.
- 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.
- WHALLEY, W.R.; LEEDS-HARRISON, P.B.; CLARK, L.J. & GOWING, D.J.G. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 84:18-27, 2005.
- WILLIAMS, J.; ROSS, P. & BRISTOW, K. Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure, and organic matter. In: van GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, L.J. & LUND, L.J., eds. INTERNATIONAL WORKSHOP ON INDIRECT METHODS FOR ESTIMATING THE HYDRAULIC PROPERTIES OF UNSATURATED SOILS, Riverside, 1992. Proceedings. Riverside, University of California, 1992. p.427-441.
- WÖSTEN, J.H.M.; LILLY, A.; NEMES, A. & BAS, C.L. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90:169-185, 1999.
- WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A. & RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.*, 251:123-150, 2001.
- 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.*, 38:947-958, 2000.