

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CURVA DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO⁽¹⁾

Cinara Xavier de Almeida⁽²⁾, José Frederico Centurion⁽³⁾, Ricardo Falqueto Jorge⁽⁴⁾, José Carlos Barbosa⁽⁵⁾ & Itamar Andrioli⁽⁶⁾

RESUMO

Funções de pedotransferência são regressões utilizadas para estimar atributos edáficos dependentes a partir de atributos independentes e de fácil determinação. Nesse sentido, são propostas na literatura diversas funções de pedotransferência que visam prever a resistência do solo à penetração. Objetivou-se, portanto, com este trabalho, desenvolver e comparar a eficiência de cinco funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração, presentes na literatura, por meio do ajuste de dados obtidos tanto com o penetrômetro de impacto (campo) quanto com o penetrômetro eletrônico (laboratório), em um Latossolo manejado sob diferentes modos (convencional e plantio direto). Foram coletadas amostras indeformadas de solo na entrelinha das culturas, nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, logo após a semeadura, no florescimento e na colheita, para determinação dos atributos físico-hídricos do solo e também da resistência do solo à penetração, com o uso do penetrômetro eletrônico. A resistência do solo à penetração, obtida com o penetrômetro de impacto, foi determinada conforme a variação do conteúdo de água no solo ao longo do ciclo das culturas. As curvas ajustadas de resistência do solo à penetração tiveram a precisão e a acurácia testadas por meio de parâmetros estatísticos e foram comparadas pelo teste F. Houve sobreposição dos valores estimados pelo ajuste das curvas, evidenciando que a maneira de obtenção da resistência do solo à penetração (campo ou laboratório) não influenciou a relação entre a resistência à penetração e os atributos do solo. As equações $RP = aUg^b$; $RP = a(1-Ug)^b$; $RP = ae^{bUg}$ e $RP = a + be^{-\frac{Ug}{c}}$ não diferiram e foram as mais precisas e acuradas na predição da resistência do solo à penetração.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Recebido para publicação em 17 de novembro de 2011 e aprovado em 10 de setembro de 2012.

⁽²⁾ Doutoranda do Departamento de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista - FCAV/UNESP. Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane s/n, CEP 14884-900 Jaboticabal (SP). Bolsista da FAPESP. E-mail: cinarax@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos e Adubos, FCAV/UNESP. Bolsista CNPq. E-mail: jfcentur@fcav.unesp.br

⁽⁴⁾ Professor do Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia - ICIAG/UFU. Campus Monte Carmelo. E-mail: jrfalqueto@yahoo.com.br

⁽⁵⁾ Professor Titular do Departamento de Ciências Exatas, FCAV/UNESP. Bolsista do CNPq. E-mail: jcarbosa@fcav.unesp.br

⁽⁶⁾ Professor do Departamento de Solos e Adubos, FCAV/UNESP. E-mail: itamar@fcav.unesp.br

Termos de indexação: penetrômetro de impacto, penetrômetro eletrônico, atributos físico-hídricos do solo, precisão e acurácia.

SUMMARY: PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR THE CURVES OF SOIL RESISTANCE TO PENETRATION

Pedotransfer functions are regressions used to determine dependent soil properties by independent and easily measurable properties. In this sense, several pedotransfer functions were proposed in the literature, designed to predict the soil resistance to penetration. The purpose of this study was to compare the efficiency of five pedotransfer functions for the penetration resistance curve in the literature, by matching the data obtained from an impact penetrometer (field) and from an electronic penetrometer (laboratory) of a clay Oxisol, under different management systems (conventional and no-tillage). Soil was sampled between crop rows (layers 0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m) soon after sowing, at flowering and the end of the crop cycle to determine the physico-hydrical soil properties as well as their resistance to penetration with the electronic penetrometer. For the impact penetrometer, resistance to penetration was determined according to the variation in the soil water content during the crop cycle. The curves of penetration resistance were adjusted, while their precision and accuracy were tested by means of statistical parameters and compared by the F-test. By matching the curves, an overlapping was observed between the estimated values, showing that the way to determine soil penetration resistance (in the field or laboratory) did not influence the relationship between penetration resistance and other soil properties. The equations $RP = aUg^b$; $RP = a(1-Ug)^b$; $RP = ae^{bUg}$ e $RP = a + be^{\frac{Ug}{c}}$ did not differ and were the most precise and accurate in predicting soil resistance to penetration.

Index terms: soil strength, soil compaction, soil-water physical properties, precision and accuracy.

INTRODUÇÃO

A análise de regressão é uma técnica estatística que pode ser usada para analisar a relação entre uma única variável dependente e uma ou várias variáveis independentes (Hair Junior et al., 2005). O objetivo da análise de regressão é usar as variáveis independentes, cujos valores são conhecidos e de mais fácil obtenção, para prever os valores da variável dependente. As variáveis independentes são ponderadas pelo procedimento da análise de regressão para garantir máxima previsão a partir do conjunto de variáveis independentes (Hair Junior et al., 2005).

Quando as variáveis são atributos edáficos, essas regressões são denominadas funções de pedotransferência, segundo Bouma (1989), que introduziu o termo pela primeira vez. Dessa forma, as funções de pedotransferência podem ser definidas como regressões utilizadas para obter estimativas de atributos edáficos a partir de outros atributos que podem ser mensurados com maior facilidade e baixo custo (McBratney et al., 2002; Minasny, 2007). Nesse contexto, são propostas, na literatura científica, diversas funções de pedotransferência que visam prever a resistência do solo à penetração.

Busscher et al. (1997) verificaram, a partir de dados coletados em um Argissolo (Typic Kandiodults) de textura argilosa, que as três equações apresentadas

a seguir foram eficientes em prever a resistência do solo à penetração:

$$RP = aUg^b \quad (1)$$

$$RP = a(1 - Ug)^b \quad (2)$$

$$RP = ae^{bUg} \quad (3)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração em MPa; Ug é o conteúdo de água em $kg\ kg^{-1}$; a , b e c são os parâmetros da equação; e e é base do logaritmo natural.

As equações 1 e 2 foram propostas por Mielke et al. (1994), e a equação 3 foi baseada em um modelo proposto por Busscher (1990).

Dexter et al. (2007) propuseram para a curva de resistência do solo à penetração uma equação fundamentada na teoria do índice S , um índice de qualidade física do solo, proposto por Dexter (2004a,b,c):

$$RP = a + b\left(\frac{1}{S}\right) + c\sigma \quad (4)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração em MPa; a , b e c são parâmetros de ajuste do modelo; S é o índice de qualidade física; e σ é dado pela tensão efetiva (To & Kay, 2005; Whalley et al., 2005).

Para solos que mostrem valores do índice S próximos ou inferiores a 0,02, ou seja, solos degradados,

as plantas podem ter o desenvolvimento radicular paralisado, provavelmente devido à impedância mecânica (Dexter, 2004a,b,c). Esse fato levou à premissa de que a resistência do solo à penetração poderia ser estimada a partir desse parâmetro (Dexter et al., 2007).

Dessa forma, segundo Dexter et al. (2007), a expressão $1/S$ reflete exatamente o grau de compactação do solo. Esses autores relatam ainda que a resistência do solo à penetração predita pela equação 4 pode ser aplicada nas comparações de solos de diferentes texturas, em diferentes densidade e conteúdo de água. Whalley et al. (2005), estudando a relação entre o σ e a resistência do solo à penetração, verificaram que o desenvolvimento radicular não é prejudicado em tensões menores que 0,25 MPa.

A equação 4 faz uma predição da resistência do solo à penetração indiretamente a partir do conteúdo de água, pois seus dois termos, S e σ , são determinados por atributos hídricos do solo:

$$S = -n(Ug_{sat} - Ug_{res}) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-(1+m)} \quad (5)$$

em que n e m são os parâmetros da equação da curva de retenção de água no solo, ajustada segundo van Genuchten (1980); e Ug_{sat} e Ug_{res} são o conteúdo de água na saturação e residual ($kg\ kg^{-1}$), respectivamente.

$$\sigma = \chi^h \quad (6)$$

sendo χ o grau de saturação ($\chi = (Ug - Ug_{res}) / (Ug_{sat} - Ug_{res})$) e h o potencial de água no solo, calculado a partir de:

$$h(\chi) = \frac{1}{\alpha} \left(\chi^{-\frac{1}{m} - 1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

em que α é parâmetro da curva de retenção de água no solo, ajustada conforme van Genuchten (1980).

Almeida et al. (2008) propuseram para a curva de resistência do solo à penetração uma equação exponencial decrescente, representada pelo seguinte modelo:

$$RP = a + be^{-\frac{Ug}{c}} \quad (8)$$

Essa equação foi ajustada a partir de dados obtidos em solos brasileiros de distintas classes texturais (Neossolo Quartzarênico, Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho textura média e Latossolo Vermelho muito argiloso), com elevados coeficientes de determinação.

Segundo Tedeschi (2006), os modelos são representações matemáticas de mecanismos que governam fenômenos naturais que não são totalmente conhecidos, controlados ou compreendidos. Conforme esse pesquisador, o processo de modelagem engloba diversas etapas, entre as quais a avaliação da

adequação do modelo é uma etapa essencial, já que indica o grau de precisão e acurácia das previsões do mesmo. Essa é uma fase importante, seja para aumentar a confiança no modelo atual, seja para permitir a seleção de modelos alternativos.

A avaliação da adequação dos modelos somente é possível pela combinação de várias análises estatísticas e investigação adequada sobre os fins para os quais eles foram inicialmente propostos e desenvolvidos. Assim, a análise estatística adequada é uma fase indispensável durante o desenvolvimento, a avaliação e as etapas de revisão de um modelo, já que a identificação e a decisão de aceitação dos erros são passos importantes para o desenvolvimento de modelos mais confiáveis e precisos (Tedeschi, 2006). De acordo com Budiman et al. (2003), não se deve utilizar uma função de pedotransferência sem que a sua incerteza associada tenha sido avaliada; para um determinado problema, se um conjunto de funções de pedotransferência alternativas estiver disponível, deve-se usar aquela com menor variância.

Nesse sentido, objetivou-se com este trabalho desenvolver e comparar a eficiência das equações 1, 2, 3, 4 e 8 em prever a resistência do solo à penetração, por meio do ajuste de dados obtidos com o penetrômetro de impacto (campo) e também com o penetrômetro eletrônico (laboratório), em um Latossolo sob diferentes manejos (convencional e plantio direto).

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em Jaboticabal, SP, Brasil. O solo das duas áreas experimentais foi classificado por Andrioli & Centurion (1999), de acordo com os critérios da Embrapa (2006), como Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa, A moderado, caulinitico, hipoférrico. O relevo é plano e o clima, mesotérmico de inverno seco (Cwa), segundo a classificação de Köppen.

A composição granulométrica do solo foi determinada nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, por meio da dispersão com NaOH ($0,1\ mol\ L^{-1}$) e determinação do teor de argila pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986). O teor de matéria orgânica do solo foi determinado conforme Raij et al. (2001). Dessa forma, verificou-se, nessas camadas, textura média do solo na área experimental 1 (LVd1), de coordenadas geográficas $21^{\circ} 15' 11'' S$ e $48^{\circ} 15' 58'' W$ a 619 m de altitude, e textura argilosa na área experimental 2 (LVd2), de coordenadas geográficas $21^{\circ} 15' 33'' S$ $48^{\circ} 16' 17'' W$ a 607 m de altitude (Quadro 1).

Os tipos de uso e manejo adotados foram: preparo convencional de solo (CC_{LVd1}) e plantio direto de sete e oito anos (PD_{LVd1}), no LVd1; e preparo convencional de solo (CC_{LVd2}) e plantio direto de nove e 10 anos (PD_{LVd2}), no LVd2.

Para o preparo convencional de solo, procedeu-se a uma escarificação até 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem pesada e uma gradagem leve. O controle inicial de plantas infestantes nessas áreas foi feito com a aplicação de trifluralina (0,445 kg L⁻¹) a 0,890 kg ha⁻¹. Já a dessecação das áreas manejadas com plantio direto (rotação com milheto - *Pennisetum americanum* e crotalária - *Crotalaria juncea*) foi realizada utilizando-se a associação de s-metolaclo (0,960 kg L⁻¹) a 1,44 kg ha⁻¹ e glifosato (0,480 kg L⁻¹) a 0,96 kg ha⁻¹.

Em 19 de novembro de 2008, foi semeada, mediante semeadora específica para plantio direto, a soja (*Glycine max*), cultivar M-SOY 6101®, a 3 cm de profundidade, com espaçamento entre linhas de 45 cm, visando obter uma população final de 400.000 plantas por hectare. A adubação foi baseada nos resultados das análises químicas do solo, visando alto rendimento, conforme Raij et al. (1997). O controle de plantas infestantes em pós-emergência foi realizado com a aplicação de fluasifope-p-butílico (0,250 kg L⁻¹) a 0,12 kg ha⁻¹. A colheita da soja foi feita manualmente em 12 de março de 2009.

Em 17 de dezembro de 2009, foi semeado o milho (*Zea mays*), híbrido Impacto®, também com uma semeadora para plantio direto, a 3 cm de profundidade e 90 cm de distância entre linhas, a fim de obter uma população final de 60.000 plantas por hectare. A adubação do milho também foi baseada nos resultados das análises químicas do solo, visando elevados rendimentos de grãos, conforme Raij et al. (1997). Os herbicidas usados na condução da cultura foram nicosulfuron (0,04 kg L⁻¹) a 0,032 kg ha⁻¹ e atrazine (0,5 kg L⁻¹) a 1 kg ha⁻¹. Foi realizada a colheita manual do milho em 8 de maio de 2010.

Foi obtida a variação da resistência do solo à penetração em função do conteúdo de água no solo,

nos diferentes tratamentos, durante os ciclos das culturas da soja e do milho, utilizando-se um penetrômetro de impacto e também um penetrômetro eletrônico. A resistência do solo à penetração, obtida com o penetrômetro de impacto (modelo IAA/Planalsucar-Stolf, com ângulo de 30°), foi determinada nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, no meio da entrelinha das culturas, conforme Stolf (1991). Essas avaliações foram realizadas conforme a variação do conteúdo de água no solo (ao longo do ciclo das culturas), o qual foi quantificado, nas mesmas camadas, pelo método gravimétrico (Embrapa, 1997).

Na determinação da variação da resistência do solo à penetração, com penetrômetro eletrônico, amostras indeformadas de solo foram coletadas com anéis de 3 cm de altura e 4,8 cm de diâmetro (54,29 cm³), logo após a semeadura (no mesmo dia), no florescimento e ao final do ciclo, na ocasião da colheita das culturas da soja e do milho. Essas amostras foram tomadas no centro das entrelinhas das culturas, nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. As amostras foram então saturadas e submetidas a diferentes potenciais matriciais em câmaras de Richards (- 0,001; - 0,003; - 0,006; - 0,01; - 0,033; - 0,06; - 0,1; e - 0,3 MPa) e, assim que atingiram o equilíbrio após cada tensão, tiveram a resistência do solo à penetração determinada. Foram também determinados o conteúdo de água retida em cada tensão (Klute, 1986) e a densidade do solo (Blake & Hartge, 1986). Determinou-se ainda a resistência do solo à penetração em amostras de solo logo após a sua saturação, isto é, com o conteúdo de água na saturação. Essas medidas foram tomadas por meio de um penetrômetro eletrônico estático de laboratório com velocidade constante de penetração de 0,01 m min⁻¹, registro de uma leitura por segundo, cone com semiângulo de 30° e área de 3,14 cm², equipado com atuador linear e célula de

Quadro 1. Granulometria e teor de matéria orgânica dos solos nos sistemas de manejo

Tratamento	Camada m	g kg ⁻¹				MO dag kg ⁻¹
		Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	
CC _{LVd1}	0-0,10	410	315	25	250	16
	0,10-0,20	323	334	37	306	15
	0,20-0,30	314	299	35	352	10
PD _{LVd1}	0-0,10	401	321	42	236	17
	0,10-0,20	396	309	24	271	13
	0,20-0,30	328	362	19	291	11
CC _{LVd2}	0-0,10	219	179	77	525	20
	0,10-0,20	220	181	122	477	17
	0,20-0,30	182	170	131	517	13
PD _{LVd2}	0-0,10	216	193	163	428	22
	0,10-0,20	210	196	166	428	16
	0,20-0,30	204	205	148	443	14

MO: matéria orgânica. CC_{LVd1}, CC_{LVd2}, PD_{LVd1} e PD_{LVd2}: cultivo convencional e plantio direto na área experimental 1 (LVd1) e na área experimental 2 (LVd2), respectivamente.

carga de 20 kgf acoplada a um microcomputador para aquisição dos dados, conforme descrito por Tormena et al. (1998). Foram utilizadas 100 leituras por determinação, correspondentes à camada central do cilindro de 0,007 a 0,024 m, e calculado o valor médio de 200 leituras (média de duas determinações) para representar a resistência do solo à penetração da amostra.

As curvas de retenção de água foram ajustadas, com o auxílio do programa SWRC, versão 2.00, pela equação proposta por van Genuchten (1980):

$$U_g = \frac{(U_{g_{\text{sat}}} - U_{g_{\text{res}}})}{[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + U_{g_{\text{res}}}} \quad (9)$$

Dessa forma, foram obtidos os parâmetros α , n e m , utilizados na determinação da tensão de água no solo (Equação 7) e também do índice S (Equação 5).

As parcelas experimentais foram constituídas de cinco linhas de plantio de 6 m de comprimento cada, considerando-se área útil as três linhas centrais, desprezando-se 1,5 m de cada extremidade, em 10 repetições.

As observações atípicas (*outliers*) foram identificadas sob uma perspectiva univariada por meio da conversão dos valores dos dados em escores-padrão (*z-score*), eliminando-se aquelas com escores-padrão de 2,5 ou mais, conforme recomendado por Hair Junior et al. (2005) para amostras pequenas, e também sob uma perspectiva bivariada, na qual pares das variáveis foram avaliados conjuntamente por meio de um diagrama de dispersão. Nesse caso, os pontos isolados no diagrama de dispersão também foram identificados como observações atípicas (Hair Junior et al., 2005).

Foram realizados ajustes para as curvas de resistência do solo à penetração por meio das equações 1, 2, 3 e 8, ajustadas através do programa Microcal Origin® 6.0, e por meio da equação 4, ajustada pela ferramenta de análise de dados do programa Microsoft Office Excel® 2007. Para isso, foram utilizados os dados obtidos em campo (penetrômetro de impacto) e também em laboratório (penetrômetro eletrônico), no ano agrícola 2008/2009 (Quadro 2).

Todas as equações ajustadas foram submetidas ao teste F, que tem por finalidade testar o efeito do conjunto das variáveis explicativas sobre a variável dependente. Isso significa verificar se pelo menos uma das variáveis explicativas do modelo exerce efetivamente influência sobre a variável dependente. As premissas relativas à análise de regressão também foram verificadas, sendo: normalidade, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, utilizando-se o programa @Risk 4.5 for Excel®; homocedasticidade, pelo teste de Levene, conforme recomendado por Hair Junior et al. (2005), por meio da ferramenta Action 1.1; e independência dos resíduos da regressão, por meio da análise dos gráficos dos resíduos em relação às outras variáveis, conforme recomendado por Hair Junior et al. (2005).

A eficiência das equações 1, 2, 3, 4 e 8, ou seja, a validação das equações na predição da resistência do solo à penetração foi realizada a partir de alguns parâmetros estatísticos descritos a seguir, conforme recomendado por Tedeschi (2006), utilizando-se os dados obtidos no segundo ano do experimento (ano agrícola 2009/2010, Quadro 2).

Foi determinado o erro-padrão da predição (RMSE), o qual é dado pela raiz do quadrado médio do resíduo:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - P_i)^2}{(n - p)}} \quad (10)$$

em que O_i são os valores observados; P_i , os valores estimados; n , o número de pares dados; e p , o número de parâmetros do modelo.

O RMSE enfatiza os desvios entre os valores estimados e observados (Grunwald et al., 2001). Assim, o melhor modelo é aquele que tem o menor RMSE (menor variância).

Foi também utilizado o coeficiente de eficiência (EF) para avaliar o ajuste dos valores observados *versus* estimados. O coeficiente EF é expresso como:

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (11)$$

em que O representa a média dos valores observados.

A diferença média (MD) foi calculada a partir da diferença média entre valores observados e calculados:

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (12)$$

O parâmetro RMSE tem limite inferior igual a zero e EF e MD podem ser negativos. Quando os valores estimados e observados são os mesmos, os parâmetros estatísticos RMSE, EF e MD assumem valores iguais a 0, 1 e 0 (Cerquetani & Martins Filho, 2006), respectivamente.

As equações foram comparadas pelo teste F em relação à predição dos valores de resistência do solo à penetração, da seguinte forma:

$$F = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{i1} - O_i)^2}{n - p_1}}{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{i2} - O_i)^2}{n - p_2}} \sim F[(n_1 - p_1); (n_2 - p_2)] \quad (13)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes aos ajustes realizados para as curvas de resistência do solo à penetração a partir das equações 1, 2, 3, 4 e 8 encontram-se no quadro 3. O estudo dos resíduos mostrou que todas as premissas

Quadro 2. Estatística descritiva básica das variáveis resistência do solo à penetração (RP), conteúdo de água no solo (Ug), índice S (S) e tensão efetiva (σ) utilizadas no ajuste das equações para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1, de textura média) e na área experimental 2 (LVd2, de textura argilosa)

Solo	Penetrômetro	Variável	Ano agrícola 2008/2009					Ano agrícola 2009/2010				
			n	Média	DP ⁽³⁾	Mín. ⁽⁴⁾	Máx. ⁽⁵⁾	n	Média	DP	Mín.	Máx.
LVd1	Eletrônico	Ug ⁽¹⁾	39	0,16	0,03	0,12	0,21	44	0,16	0,03	0,11	0,21
		RP ⁽²⁾	39	1,48	0,85	0,36	3,30	44	1,56	1,13	0,35	4,26
		S	39	0,03	0,01	0,02	0,06	44	0,03	0,01	0,02	0,06
		σ	39	30,49	16,50	9,94	67,10	44	32,23	22,12	6,92	91,15
	Impacto	Ug	61	0,15	0,02	0,11	0,19	68	0,15	0,03	0,11	0,21
		RP	61	1,92	0,86	0,60	4,36	68	1,93	1,00	0,45	4,20
		S	61	0,03	0,01	0,02	0,04	68	0,03	0,01	0,02	0,06
		σ	61	35,84	12,98	14,81	67,93	68	35,69	18,60	2,94	90,75
LVd2	Eletrônico	Ug	40	0,23	0,02	0,19	0,27	68	0,23	0,02	0,19	0,27
		RP	40	1,96	1,17	0,50	5,27	68	1,97	1,18	0,54	5,43
	S		40	0,03	0,01	0,02	0,05	68	0,03	0,01	0,02	0,05
		σ	40	54,90	46,49	7,55	167,84	68	60,79	70,25	10,00	337,66
	Impacto	Ug	66	0,22	0,02	0,19	0,26	44	0,22	0,02	0,19	0,27
		RP	66	2,30	0,96	0,67	4,93	44	2,44	1,11	0,71	4,65
		S	66	0,04	0,01	0,02	0,06	44	0,03	0,01	0,02	0,05
		σ	66	53,43	33,66	17,55	142,35	44	81,76	79,00	14,00	301,30

⁽¹⁾Ug (kg kg⁻¹); ⁽²⁾RP (Mpa); ⁽³⁾DP: desvio-padrão; ⁽⁴⁾Mínimo; ⁽⁵⁾Máximo.

relativas à análise de regressão foram atendidas, ou seja, os resíduos tiveram distribuição normal, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$); homocedasticidade da variância, pelo teste de Levene ($\alpha=0,05$); e independência em relação às variáveis explicativas. Verificou-se também que o teste F foi significativo para todas as equações ajustadas, indicando que pelo menos uma das variáveis explicativas, ou seja, os atributos do solo, influenciou (globalmente) a resistência do solo à penetração.

Na figura 1 estão representados os valores observados da resistência do solo à penetração, bem como aqueles estimados pelas equações 1, 2, 3 e 8 em função dos valores observados do conteúdo de água no solo, obtidos em laboratório (penetrômetro eletrônico) e também em campo (penetrômetro de impacto), no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa. Observa-se sobreposição dos dados obtidos com o penetrômetro eletrônico e também com o penetrômetro de impacto, tanto para os dados observados como para os dados estimados pelas curvas, evidenciando que a maneira de obtenção da resistência do solo à penetração (campo ou laboratório) não influenciou a relação entre a resistência à penetração e o conteúdo de água no solo. Resultados semelhantes foram verificados por Lima et al. (2006) em um Latossolo Vermelho-Amarelo

distrófico de textura franco-arenosa, sob pomar de laranjeiras. Esses pesquisadores afirmam que a maneira de obtenção dos dados de resistência do solo à penetração, campo ou laboratório, não influencia a curva de resistência do solo à penetração.

Ao contrário, constata-se a diferenciação das curvas ajustadas aos dados obtidos no LVd1, de textura média, e no LVd2, de textura argilosa. Essa diferenciação, conforme o conteúdo de argila do solo, também foi observada por Sojka et al. (2001), To & Kay (2005) e Almeida et al. (2008). Assim, segundo Busscher et al. (1997), são necessários ajustes separados para a curva de resistência do solo à penetração, conforme os diferentes tratamentos. Dessa forma, foram realizados ajustes separados para cada área experimental, englobando os dados obtidos em campo (penetrômetro de impacto) e em laboratório (penetrômetro eletrônico, Quadro 4).

Todos os ajustes, com exceção da equação 4, apresentaram altos valores de coeficiente de determinação (R^2), indicando alta precisão nas estimativas da resistência do solo à penetração (Quadro 4). Dessa forma, no LVd1 foi verificado que 96 % das variações dos dados podem ser explicadas pelas equações 1C, 2C, 3C e 8C, e 79 %, pela equação 4C. No LVd2, as equações 1D, 2D, 3D e 8D explicaram 95 % da variação dos dados, ao passo que apenas 66 % das variações da resistência do solo à penetração são

Quadro 3. Parâmetros ajustados pelas funções de pedotransferência para as curvas de resistência do solo à penetração, a partir de dados obtidos com o penetrômetro eletrônico (Eletrônico) e o de impacto (Impacto), para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1, de textura média) e na área experimental 2 (LVd2, de textura argilosa)

Penetrômetro		Coeficiente			R ²	F	Valor-p
		a	b	c			
LVd1							
Equação 1A							
Eletrônico	Estimativa	0,0015	-3,6717	-	0,95	732,09	0,00
	Erro-padrão	0,0005	0,1697	-			
Impacto	Estimativa	0,0026	-3,3714	-	0,96	1392,92	0,00
	Erro-padrão	0,0005	0,0992	-			
Equação 2A							
Eletrônico	Estimativa	48,8142	21,0722	-	0,95	721,09	0,00
	Erro-padrão	7,4769	1,0304	-			
Impacto	Estimativa	48,6914	21,1793	-	0,95	1186,78	0,00
	Erro-padrão	4,7359	0,6905	-			
Equação 3A							
Eletrônico	Estimativa	65,2275	-24,7990	-	0,95	735,43	0,00
	Erro-padrão	10,4867	1,1469	-			
Impacto	Estimativa	62,2594	-24,5983	-	0,96	1230,47	0,00
	Erro-padrão	6,2866	0,7578	-			
Equação 4A							
Eletrônico	Estimativa	-1,0056	0,0320	0,0466	0,81	74,53	0,00
	Erro-padrão	0,2686	0,0062	0,0039			
Impacto	Estimativa	-0,6718	0,0180	0,0564	0,80	118,39	0,00
	Erro-padrão	0,2517	0,0073	0,0039			
Equação 8A							
Eletrônico	Estimativa	0,1812	98,2950	0,0351	0,95	368,06	0,00
	Erro-padrão	0,1425	40,2140	0,0043			
Impacto	Estimativa	0,4307	128,7436	0,0315	0,96	679,36	0,00
	Erro-padrão	0,1325	39,7001	0,0029			
LVd2							
Equação 1B							
Eletrônico	Estimativa	0,0002	-6,1240	-	0,95	764,57	0,00
	Erro-padrão	0,0001	0,2601	-			
Impacto	Estimativa	0,0006	-5,4300	-	0,96	1428,80	0,00
	Erro-padrão	0,0001	0,1625	-			
Equação 2B							
Eletrônico	Estimativa	487,2817	21,8024	-	0,94	630,12	0,00
	Erro-padrão	117,3502	1,0370	-			
Impacto	Estimativa	298,5995	19,8063	-	0,95	1340,90	0,00
	Erro-padrão	42,9408	0,6185	-			
Equação 3B							
Eletrônico	Estimativa	1010,3853	-27,9658	-	0,95	659,87	0,00
	Erro-padrão	261,4454	1,2176	-			
Impacto	Estimativa	562,7807	-25,2645	-	0,96	1370,48	0,00
	Erro-padrão	88,0586	0,7371	-			
Equação 4B							
Eletrônico	Estimativa	0,6505	0,0028	0,0222	0,78	64,05	0,00
	Erro-padrão	0,3370	0,0091	0,0020			
Impacto	Estimativa	1,3934	-0,0125	0,0234	0,59	44,75	0,00
	Erro-padrão	0,2613	0,0109	0,0027			
Equação 8B							
Eletrônico	Estimativa	0,5691	8835,7785	0,0253	0,96	387,79	0,00
	Erro-padrão	0,1462	7118,8537	0,0027			
Impacto	Estimativa	0,3179	1166,8658	0,0341	0,96	691,08	0,00
	Erro-padrão	0,2080	671,8252	0,0037			

Equação 1: $RP = aUg^b$; Equação 2: $RP = a(1-Ug)^b$; Equação 3: $RP = ae^{bUg}$; Equação 4: $RP = a + b\left(\frac{1}{S}\right) + c\sigma$; Equação 8: $RP = a + be^c$, em que: RP = resistência do solo à penetração (MPa); Ug=conteúdo de água no solo ($kg\ kg^{-1}$); S = índice S; σ = tensão efetiva; e a, b e c = coeficientes da equação.

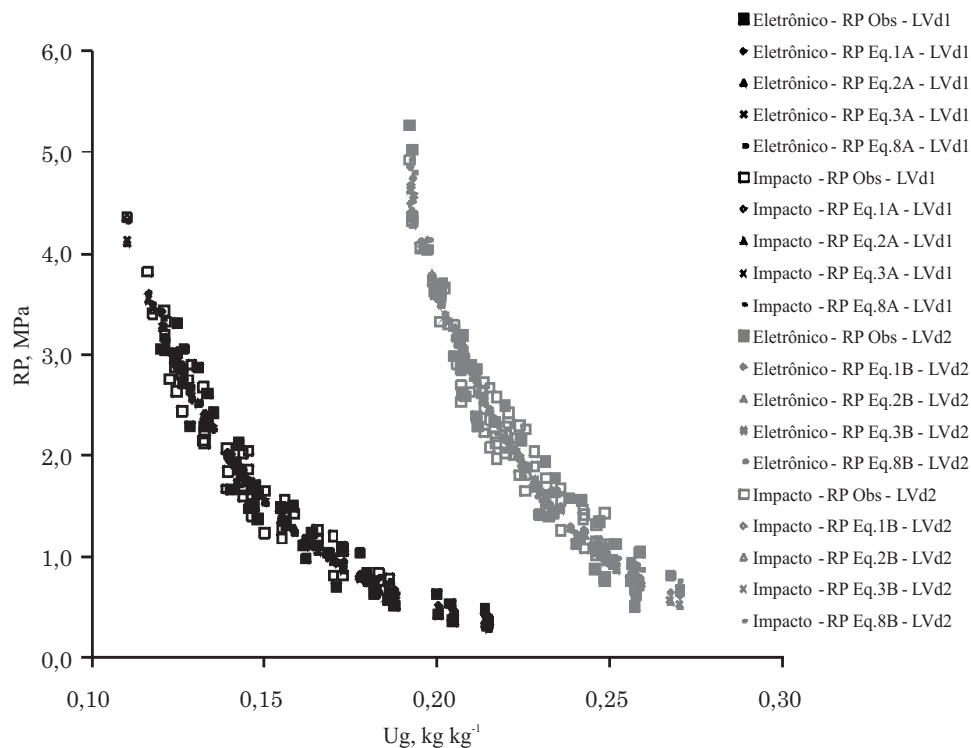


Figura 1. Valores observados (RP Obs) e estimados pelas equações 1 (RP Eq.1A e RP Eq.1B), 2 (RP Eq.2A e RP Eq.2B), 3 (RP Eq.3A e RP Eq.3B) e 8 (RP Eq.8A e RP Eq.8B) da resistência do solo à penetração obtida com o penetrômetro eletrônico (Eletrônico) e também com o penetrômetro de impacto (Impacto), em função do conteúdo de água no solo (valores observados), para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1, de textura média) e na área experimental 2 (LVd2, de textura argilosa).

Quadro 4. Equações para as curvas de resistência do solo à penetração ajustadas para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1, de textura média) e na área experimental 2 (LVd2, de textura argilosa)

Equação ajustada		
LVd1		
$RP = 0,0023Ug^{-3,4383}$	$R^2 = 0,96; F = 2227,44; p \leq 0,0001$	(1C)
$RP = 48,0163(1 - Ug)^{21,0446}$	$R^2 = 0,96; F = 2067,90; p \leq 0,0001$	(2C)
$RP = 62,0999e^{-24,5383Ug}$	$R^2 = 0,96; F = 2129,34; p \leq 0,0001$	(3C)
$RP = -8738 + 0,0270\left(\frac{1}{S}\right) + 0,0519$	$R^2 = 0,79; F = 184,51; p \leq 0,0001$	(4C)
$RP = 0,2320 + 92,2356e^{-\frac{Ug}{0,0353}}$	$R^2 = 0,96; F = 1106,29; p \leq 0,0001$	(8C)
LVd2		
$RP = 0,0004Ug^{-5,7008}$	$R^2 = 0,95; F = 2108,60; p \leq 0,0001$	(1D)
$RP = 360,3607(1 - Ug)^{20,5793}$	$R^2 = 0,95; F = 1899,30; p \leq 0,0001$	(2D)
$RP = 705,1679e^{-26,3132}$	$R^2 = 0,95; F = 1954,81; p \leq 0,0001$	(3D)
$RP = 1,2800 - 0,0110\left(\frac{1}{S}\right) + 0,0227$	$R^2 = 0,66; F = 99,57; p \leq 0,0001$	(4D)
$RP = 0,3956 - 2094,7723e^{-\frac{Ug}{0,0310}}$	$R^2 = 0,95; F = 1020,27; p \leq 0,0001$	(8D)

RP=resistência do solo à penetração (MPa); Ug=conteúdo de água no solo (kg kg⁻¹); S=índice S; e σ=tensão efetiva.

atribuídas à variação do índice S e da tensão efetiva, pela equação 4D. Busscher et al. (1997) também verificaram coeficientes de determinação muito próximos e até mesmo iguais para os ajustes das equações 1, 2 e 3. Esses pesquisadores constataram que os coeficientes de determinação variaram de 55 a 92 %, a partir de dados coletados em solos de textura argilosa, sob diferentes sistemas de manejo.

No LVd1, as equações 2C, 3C e 8C e também a equação 1C foram as que tiveram o menor erro-padrão da predição (RMSE) (Quadro 5) e, portanto, a menor variância. Contudo, no LVd2, as equações 1D e 8D mostraram menor RMSE, seguidas pelas equações 2D e 3D. No entanto, as equações 4C e 4D foram as que apresentaram pior desempenho em relação a esse parâmetro. Segundo Tedeschi (2006), o RMSE é um

parâmetro muito comum e confiável utilizado para validar uma equação, sendo uma medida de acurácia e precisão.

O coeficiente de eficiência (EF) avalia o ajuste dos valores observados *versus* valores preditos, indicando, portanto, as melhores funções de pedotransferência (Grunwald et al., 2001). No LVd1, as equações 1C, 2C, 3C e 8C apresentaram o maior EF e não diferiram em relação a esse parâmetro. Já no LVd2, as equações 1D e 8D apresentaram os maiores valores do EF, seguidas pelas equações 2D e 3D, ao contrário da equação 4D, que obteve o menor EF. Essa equação foi proposta a partir de dados coletados em solos desenvolvidos sob influência de clima temperado - condições essas diferentes das do presente estudo, o que pode explicar os resultados obtidos. Segundo Legates & McCabe Júnior (1999), EF representa uma melhoria em relação ao coeficiente de determinação para fins de avaliação de modelos, já que é sensível a diferenças nas médias observadas e preditas e variâncias.

A diferença média (MD) é provavelmente o parâmetro estatístico mais antigo e mais usado para avaliar a acurácia de equações (Tedeschi, 2006). Quando MD tem sinal (+) ou (-) significa que os valores preditos, em média, superestimam ou subestimam os valores observados, respectivamente (Martins Filho, 1999). Dessa forma, no LVd1, as equações 1C e 8C foram as que melhor predisseram os valores de resistência do solo à penetração, segundo a MD, embora tenham superestimado, em pequena proporção, os seus valores. Também no LVd2, as equações 1D e 8D foram as que mostraram melhor desempenho na predição da resistência do solo à penetração.

Dessa forma, verificou-se que as equações 1, 2, 3 e 8 não diferiram pelo teste F ($\geq 0,23$), ao contrário da equação 4, que diferiu de todas as outras ($\leq 0,01$) na predição dos valores de resistência do solo à penetração, tanto no LVd1 quanto no LVd2, comprovando os resultados alcançados pelos parâmetros RMSE, EF e

Quadro 5. Erro-padrão da predição (RMSE), coeficiente de eficiência (EF) e diferença média (MD) das diferentes equações para a curva de resistência do solo à penetração para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1, de textura média) e na área experimental 2 (LVd2, de textura argilosa)

Solo	Equação	RMSE	EF	MD
LVd1	Eq. 1C	0,18	0,97	0,01
	Eq. 2C	0,17	0,97	0,04
	Eq. 3C	0,17	0,97	0,04
	Eq. 4C	0,32	0,91	-0,05
	Eq. 8C	0,17	0,97	0,02
LVd2	Eq. 1D	0,27	0,95	0,03
	Eq. 2D	0,29	0,94	0,05
	Eq. 3D	0,28	0,94	0,05
	Eq. 4D	0,67	0,77	-0,08
	Eq. 8D	0,27	0,95	0,03

Quadro 6. Teste F entre as diferentes equações para a curva de resistência do solo à penetração para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1, de textura média) e na área experimental 2 (LVd2, de textura argilosa)

Solo		Eq.2		Eq.3		Eq.4		Eq.8	
		F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p
LVd1	Eq.1	1,13	0,27	1,15	0,23	3,08	0,00	1,12	0,28
	Eq.2			1,02	0,45	3,47	0,00	0,99	0,51
	Eq.3					3,55	0,00	0,97	0,56
	Eq.4							3,45	0,00
LVd2	Eq.1	0,89	0,72	0,92	0,67	4,49	0,00	0,98	0,53
	Eq.2			1,03	0,44	4,02	0,00	1,10	0,31
	Eq.3					4,13	0,00	1,07	0,36
	Eq.4							4,42	0,00

MD (Quadro 6). Busscher et al. (1997) também verificaram poucas diferenças entre as equações 1, 2 e 3 em prever a resistência do solo à penetração, o que está de acordo com os resultados obtidos neste estudo.

CONCLUSÕES

1. Houve sobreposição dos valores estimados pelo ajuste das curvas, evidenciando que a maneira de obtenção da resistência do solo à penetração (campo ou laboratório) não influenciou a relação entre a resistência à penetração e os atributos do solo.

2. As equações $RP = aUg^b$; $RP = a(1-Ug)^b$; $RP = ae^{bUg}$ e $RP = a + be^{\frac{Ug}{c}}$ não diferiram e foram as mais precisas e acuradas na predição da resistência do solo à penetração.

LITERATURA CITADA

- ALMEIDA, C.X.; CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; JORGE, R.F. & BARBOSA, J.C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2235-2243, 2008.
- ANDRIOLI, I. & CENTURION, J.F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Brasília, 1999. Anais... Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p.1-4.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. v.1. p.377-382.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.*, 9:177-213, 1989.
- BUDIMAN, M.; McBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M.L. & SANTOS, H.G. Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo. Rio de Janeiro, 2003. 50p. (Documento, 45).
- 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 Tillage Res.*, 43:205-217, 1997.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 33:519-523, 1990.
- CERQUETANI, G.E. & MARTINS FILHO, M.V. Rotina computacional e equação simplificada para modelar o transporte de sedimentos num Latossolo Vermelho distrófico. *Eng. Agríc.*, 26:617-626, 2006.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214, 2004a.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. *Geoderma*, 120:215-225, 2004b.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120:227-239, 2004c.
- DEXTER, A.R.; CZY, E.A. & GATE, O.P. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Tillage Res.*, 93:412-419, 2007.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, Sistema de Produção de Informação, 2006. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part.1. p.383-411.
- GRUNWALD, S.; McSWEENEY, K.; ROONEY, D.J. & LOWERY, B. Soil layer models created with profile cone penetrometer data. *Geoderma*, 103:181-201, 2001.
- HAIR JUNIOR, J.F.; ANDERSON, R.E. & BLACK, W.C. Análise multivariada de dados. 5.ed. Porto Alegre, Bookman, 2005. 593p.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part. 1. p.635-662.
- LEGATES, D.R. & McCABE JÚNIOR, G.J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Sci. Res.*, 35:233-241, 1999.
- LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:217-223, 2006.
- MARTINS FILHO, M.V. Modelagem do processo de erosão entressulcos em Latossolos de Jaboticabal. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1999. 140p. (Tese de Doutorado)
- McBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R. & VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109:41-73, 2002.
- MIELKE, L.N.; POWERS, W.L.; BADRI, S. & JONES, A.J. Estimating soil water content from soil strength. *Soil Tillage Res.*, 31:199-209, 1994.
- MINASNY, B. Predicting soil properties. *J. Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 7:54-67, 2007.
- RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A., eds. Análise química para a avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.

- RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).
- SOJKA, R.E.; BUSSCHER, W.J. & LEHRSCHE, G.A. In situ strength, bulk density and water content relationships of a Durinodic Xeric Haplocalcid soil. *Soil Sci.*, 166:520-529, 2001.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:229-235, 1991.
- TEDESCHI, L.O. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agric. Syst.*, 89:225-247, 2006.
- 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.
- 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.
- van GENUCHTEN, M.T.A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-897, 1980.
- 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 Tillage Res.*, 84:18-27, 2005.