



XXXIII

Congresso Brasileiro de Ciência do Solo

Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas
31 de julho à 05 de agosto - Center Convention - Uberlândia/Minas Gerais

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO A PARTIR DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA: CONTRIBUIÇÃO À TEORIA DO ÍNDICE S

Glenio Guimarães Santos⁽¹⁾; Euzébio Medrado da Silva⁽²⁾; Robélio Leandro Marchão⁽³⁾; Ary Bruand⁽⁴⁾; François James⁽⁵⁾; Pedro Marques da Silveira⁽⁶⁾; Thierry Becquer⁽⁷⁾

⁽¹⁾ Professor do Departamento de Engenharias, CPCE - Universidade Federal do Piauí, CEP 64900-000, Bom Jesus, PI. E-mail: gleniogm@gmail.com; ^(2,3) Pesquisador da Embrapa Cerrados, Caixa Postal 08223, CEP 73310-970, Planaltina, DF; ⁽⁴⁾ Professor da Université d'Orléans, CNRS/INSU, Université François Rabelais – Tours, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) UMR6113, 1A, Rue de la Férolerie 45071 Orléans, Cedex 2, France; ⁽⁵⁾ Professor da Université d'Orléans, CNRS, Mathématiques et Applications, Physique Mathématique d'Orléans (MAPMO), UMR 6628, Rue de Chartres, BP 6759, 45100 Orléans, France; ⁽⁶⁾ Pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Caixa Postal 179, CEP 75375-000, Santo Antônio de Goiás, GO; ⁽⁷⁾ Pesquisador do Institut de Recherche pour le Développement UMR 210 Eco&Sols 2, Place Viala, Bat. 12 F-34060 Montpellier Cedex 1, France

Resumo – Dentre os indicadores propostos para avaliar as propriedades físicas do solo, o índice S, derivado da declividade da curva de retenção de água no seu ponto de inflexão tem sido amplamente utilizado. Neste trabalho, discutem-se os valores da declividade da curva de retenção de água no seu ponto de inflexão de acordo com a variável independente utilizada na construção da curva. Foi demonstrado que a representação gráfica do conteúdo de água utilizando a tensão expressa em sua forma aritmética em detrimento da forma logarítmica influencia significativamente no desempenho do índice S para os solos estudados. Os resultados demonstraram que a curva de retenção construída com a expressão aritmética da tensão, além de aumentar o poder da análise quando comparada ao uso da tensão expressa na forma logarítmica natural ou decimal, é mais consistente do ponto de vista físico e matemático.

Palavras-Chave: estrutura; indicador de qualidade; ponto de inflexão; porosidade; umidade do solo

INTRODUÇÃO

Dentre os diversos indicadores de qualidade física do solo propostos na literatura, o índice S (Dexter e Bird, 2001; Dexter, 2004) tem sido amplamente utilizado para avaliar a qualidade do solo em relação à friabilidade, permeabilidade, estabilidade da estrutura, etc. O índice S também tem sido utilizado para investigar e prover informações sobre o funcionamento físico-hídrico do solo e está relacionado à variáveis como textura, densidade do solo, matéria orgânica e crescimento de raízes. Conceitualmente, o índice S equivale à inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva característica de retenção de água (CRA). É determinado pela CRA expressando-se o conteúdo gravimétrico de água (θ) em função da tensão de água no solo (h) após ajuste utilizando a equação de van Genuchten, utilizando o logaritmo natural da tensão (h).

Inicialmente, Dexter e Bird (2001) observaram que haviam dois pontos de inflexão possíveis, dependendo se a CRA fosse construída plotando-se a umidade em função de $\ln(h)$ ou h . Os autores indicaram que os dois

pontos de inflexão estariam muito próximos para solos com estreita distribuição de poros por tamanho, independentemente da escala utilizada na função, para explicar o uso das curvas de θ traçadas apenas em função de $\ln(h)$ ou sua representação correspondente em termos de $\log(h)$. Outro ponto não esclarecido por Dexter e Bird (2001) concerne à proposta de se obter graficamente o ponto de inflexão plotando-se θ em relação à h de acordo com a equação de van Genuchten em detrimento da inclinação de curva de θ em função de $\ln(h)$, que é mais consistente do ponto de vista matemático.

Partindo deste ponto, serão discutidos neste trabalho as proposições de Dexter e Bird (2001) e realizadas comparações do índice S com a inclinação da CRA no seu ponto de inflexão em função da variável independente quer seja h , $\ln(h)$ ou $\log(h)$. Como exemplo, as novas equações obtidas são aplicadas em amostras compactadas e não compactadas oriundas de um Latossolo Vermelho Acriférico típico (Tabela 1).

MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliação do índice S, foram desenvolvidas novas equações a partir das CRA versus tensão da água no solo (Tabela 2), tendo por base o modelo proposto por van Genuchten (1980).

$$\theta = (\theta_s - \hat{\theta}_r) \left[1 + (\hat{\alpha}h)^{\hat{n}} \right]^{-\hat{m}} + \hat{\theta}_r \quad (1)$$

em que: θ = conteúdo gravimétrico de água do solo (g g^{-1}); θ_s = valor medido na saturação do conteúdo gravimétrico da água do solo (g g^{-1}); $\hat{\theta}_r$ = parâmetro de ajuste do modelo, correspondente ao conteúdo gravimétrico da água do solo (g g^{-1}) quando h tende ao infinito; $\hat{\alpha}$ = parâmetro de ajuste (hPa^{-1}), associado à escala medida de h ; $\hat{n}$ = parâmetro de ajuste (adimensional); $\hat{m}$ = parâmetro de ajuste (adimensional) com valor frequentemente igualado a $1 - \frac{1}{\hat{n}_1}$.

A rotina Solver do programa Microsoft Excel foi utilizada para ajustar os parâmetros θ_r , α e n da CRA. Durante o processo de ajuste, θ_s foi considerado como sendo o valor da umidade de saturação (Reatto et al.,

2008): 0,367 e 0,544 g g⁻¹ para a camada compactada e não compactada, respectivamente e, portanto, não foi ajustado.

Para facilitar a apresentação, admitiu-se que o modelo de van Genuchten poderia ser representado pela Equação 2:

$$\theta = g \left(h \mid \theta_s, \hat{\theta}_r, \hat{n}, \hat{\alpha}, \hat{m} \right) \quad (2)$$

em que g, representa θ como sendo uma função de h, onde os parâmetros θ_s (g g⁻¹), $\hat{\theta}_r$ (g g⁻¹), $\hat{n}$ (adimensional), $\hat{\alpha}$ (hPa⁻¹), e $\hat{m}$ (adimensional) são estimados por meio do ajuste com base na equação (1). O símbolo “chapéu” nas letras foi usado para identificar um parâmetro ajustado ($\hat{m}$ poderia também ser ajustado, mas nesse estudo foi representado por $1 - \frac{1}{\hat{n}}$).

Similarmente, θ como uma função de $\ln(h)$, foi representada por f, conforme Equação 3:

$$\theta = f \left(\ln(h) \mid \theta_s, \hat{\theta}_{r1}, \hat{n}_1, \hat{\alpha}_1, \hat{m}_1 \right) \quad (3)$$

em que: $\hat{\theta}_{r1}$ (g g⁻¹), $\hat{n}_1$ (adimensional), $\hat{\alpha}_1$ (hPa⁻¹) representam os parâmetros ajustados e $\hat{m}_1$ (adimensional). Nesse caso, esses parâmetros são obtidos diretamente da Equação (1), mas considerando os valores de h transformados pela função $\ln$.

Da mesma forma, θ como uma função de $\log(h)$, foi representada por k utilizando a Equação 4, como mostrado abaixo:

$$\theta = k \left(\log(h) \mid \theta_s, \hat{\theta}_{r1}, \hat{n}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{m}_1 \right) \quad (4)$$

em que, somente o parâmetro α_2 foi novamente ajustado como: $\hat{\alpha}_2 = \hat{\alpha}_1 \ln 10$; os outros parâmetros são representados identicamente àqueles determinados na função f.

A partir das três funções apresentadas, como representação da CRA e utilizando a Equação 1, foi possível obter os pontos de inflexão de h_i , $[\ln(h)]_i$ e $[\log(h)]_i$.

Dessa forma, a curvatura S_h , da função g foi obtida por substituição, através da Equação 5:

$$S_h = -(\hat{\alpha})(\hat{n} - 1)(\theta_s - \hat{\theta}_r)(\hat{m})^{\hat{m}}(1 + \hat{m})^{-\hat{m}-1} \quad (5)$$

Similarmente, a curvatura, $S_{\ln(h)}$, da função f foi obtida por substituição, por meio da Equação 6:

$$S_{\ln(h)} = -(\hat{\alpha}_1)(\hat{n}_1 - 1)(\theta_s - \hat{\theta}_{r1})(\hat{m}_1)^{\hat{m}_1}(1 + \hat{m}_1)^{-\hat{m}_1-1} \quad (6)$$

E a curvatura, $S_{\log(h)}$, da função k, também foi obtida por substituição, por meio da Equação 7:

$$S_{\log(h)} = -(\hat{\alpha}_2)(\hat{n}_1 - 1)(\theta_s - \hat{\theta}_{r1})(\hat{m}_1)^{\hat{m}_1}(1 + \hat{m}_1)^{-\hat{m}_1-1} \quad (7)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A inclinação do ponto de inflexão da CRA, utilizando a Equação 5 (ou seja, usando h como variável independente) foi de 0,0020 e 0,0046, para o solo compactado e não compactado, respectivamente. Estes valores foram 41 e 72 vezes menores do que aqueles correspondentes para o índice S quando se utilizou a escala $\ln(h)$ (Tabela 3). A sucção no ponto de inflexão utilizando a equação que leva em consideração

h, como sendo a variável independente, (h_i) foi 6 e 22 hPa, para o solo compactado e não compactado, enquanto que utilizando as equações propostas por Dexter (2004) encontrou-se 52 e 43 hPa, respectivamente. Ainda, de acordo com a lei de Jurin (Bruand e Prost, 1987), foi calculado o diâmetro equivalente dos poros correspondente a sucção do ponto de inflexão da CRA. Os resultados mostraram que os valores do diâmetro equivalente de poros foram próximos para o solo compactado e não compactado, no ponto de inflexão, quando a CRA foi construída utilizando $\ln(h)$ ou $\log(h)$, como variável independente (60 e 74 μm) e, 58 e 70 μm , conforme Dexter (2004). Por outro lado, o diâmetro equivalente de poros do ponto de inflexão da CRA foi cerca de quatro vezes mais elevado para o solo compactado (510 μm), do que para o solo não compactado (134 μm), quando a CRA foi traçada considerando h como a variável independente. Finalmente, o conteúdo de água no ponto de inflexão foi 31% maior no solo não compactado, em comparação ao solo compactado (Tabela 3).

A CRA mostrou um ponto de inflexão que está relacionado com uma distribuição contínua do diâmetro equivalente de poros, dos últimos poros que foram desestruturados, por meio da compactação, resultantes da união de partículas elementares, dentro do microagregados. A Figura 1 ilustra esquematicamente que: de acordo com essa transformação da porosidade, é possível passar de um CRA, com um determinado ponto de inflexão e seu respectivo diâmetro equivalente de poros em um solo não compactado, para outra CRA, com um ponto de inflexão correspondente ao maior diâmetro equivalente de poros para o solo compactado.

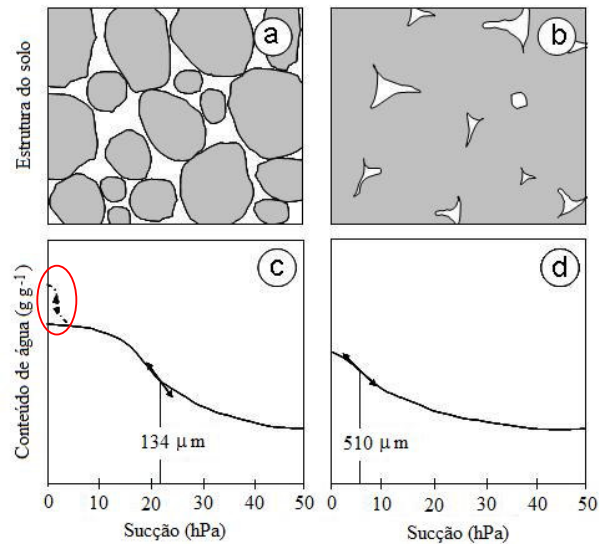


Figura 1: Figura esquemática da estrutura do solo não compactado (a) e compactado (b), e curva de retenção de água do solo correspondente ao solo não compactado (c) e o solo compactado (d) com o valor equivalente para o diâmetro do poro em μm , no ponto de inflexão.

Em geral, os resultados mostraram que a expressão da CRA em $\ln(h)$ ou $\log(h)$, em vez de h, como variável

independente poderia limitar a possibilidade de discutir as propriedades físicas dos solos.

CONCLUSÕES

1. A expressão da CRA em função de $\ln(h)$ ou $\log(h)$ ao invés de h como variável independente, resulta em valores diferentes do índice S , o que pode limitar a discussão das propriedades físicas do solo.

2. O cálculo do índice S quando a CRA é expressa com h sendo a variável independente é mais consistente do ponto de vista matemático e físico e, para as amostras selecionadas, esta forma de cálculo aumenta significativamente a relevância da análise em comparação ao S proposto por Dexter, (2004).

3. Mais estudos deverão ser conduzidos para verificar em que proporção o índice S é afetado em diferentes tipos de solos e sob diferentes manejos, visando verificar se realmente o uso de h como variável independente efetivamente aumenta a sensibilidade da análise.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, por concessão de bolsa de doutorado, à Embrapa Cerrados e ao Institut de Recherche pour Le Développement (França), por financiar parte deste estudo.

REFERÊNCIAS

- BRUAND, A. e PROST, R. Effect of water content on the fabric of a soil material: an experimental approach. *J. Soil Sci.*, 38:461-472, 1987.
- 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, 2004.
- DEXTER, A.R. e BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Till Res.*, 57:203-212, 2001.
- DEXTER, A.R., e CZYZ, E.A. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. *Land. Degrad. Dev.* 18:369-381, 2007.
- REATTO, A.; SILVA, E.M.; BRUAND, A.; MARTINS, E.S. e LIMA, J.E.F.W. Validity of the centrifuge method for determining the water retention properties of tropical soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72:1547-1553, 2008.
- 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.

Tabela 1. Principais características físico-químicas da camada compactada (0-0,05 m) e da camada não compactada (0,70-0,75 m)

Solo	Distribuição das partículas			Carbono orgânico	Densidade do solo
	Argila	Silte	Areia		
			g kg ⁻¹		g cm ⁻³
Compactado (C)	485	71	444	0,70	1,27
Não compactado (NC)	548	72	380	0,16	1,03

Tabela 2. Conteúdo gravimétrico de água do solo (θ_v) obtidos na camada compactada (0-0,05 m) e da camada não compactada (0,70-0,75 m), de acordo com as tensões aplicadas (hPa)

Tensão (hPa)	Umidade (θ) da camada compactada			Umidade (θ) da camada não compactada		
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3
0	0,366	0,356	0,380	0,558	0,549	0,523
10	0,356	0,346	0,355	0,540	0,542	0,516
30	0,332	0,324	0,306	0,456	0,455	0,432
60	0,297	0,290	0,281	0,337	0,360	0,333
100	0,277	0,287	0,271	0,287	0,278	0,277
330	0,237	0,242	0,237	0,240	0,231	0,227
800	0,222	0,230	0,226	0,218	0,213	0,214
4000	0,199	0,206	0,204	0,201	0,195	0,195
10000	0,185	0,190	0,190	0,193	0,184	0,187
15000	0,178	0,180	0,181	0,182	0,176	0,175

Tabela 3. Valores dos parâmetros ajustados para umidade versus h , $\ln(h)$, ou $\log(h)$, correspondentes aos valores da tensão, curvatura, diâmetro equivalente de poros, conteúdo de água no ponto de inflexão e os respectivos valores dos erros padrões, na camada de 0-0,05 m para solo compactado (C) e 0,70-0,75 m para solo não compactado (NC)

Variáveis	Variáveis independentes						Dexter (2004a)	
	h		$\ln(h)$		$\log(h)$		C	NC
	C	NC	C	NC	C	NC		
$\theta_s (g\ g^{-1})$	0,367 ± 0,0120	0,544 ± 0,0184	0,367 ± 0,0120	0,544 ± 0,0184	0,367 ± 0,0120	0,5435 ± 0,0184	0,367 ± 0,0120	0,544 ± 0,0184
$\theta_r^{(1)} (g\ g^{-1})$	0,160 ± 0,0096	0,192 ± 0,0039	0,147 ± 0,0122	0,188 ± 0,0040	0,147 ± 0,0122	0,1881 ± 0,0058	0,147 ± 0,0096	0,188 ± 0,0039
$n^{(2)}$	1,314 ± 0,0448	2,057 ± 0,0875	3,182 ± 0,2538	6,396 ± 0,3640	3,182 ± 0,2538	6,3964 ± 0,3639	3,182 ± 0,0448	6,396 ± 0,0875
$\alpha^{(3)}$	0,057 ± 0,0088	0,032 ± 0,0020	0,227 ± 0,0058	0,263 ± 0,0025	0,524 ± 0,0134	0,8437 ± 0,0040	-	-
$m^{(2)}$	0,239 ± 0,0251	0,514 ± 0,0198	0,686 ± 0,0232	0,844 ± 0,0084	0,686 ± 0,0232	0,6062 ± 0,0084	0,686 ± 0,0251	0,844 ± 0,0198
Suc. PI ⁽⁴⁾	5,876	22,421	3,948	3,699	1,6959	1,6064	1,7146	1,6317
Curv. PI (índice S) ⁽⁵⁾	0,0020	0,0046	0,0350	0,1416	0,0805	0,3261	0,0816	0,329
$\varnothing_{eq}\ PI^{(6)}$	510	134	60	74	60	74	58	70
Cont. Água PI ⁽⁷⁾	0,300	0,394	0,266	0,373	0,266	0,365	0,266	0,365
RMSE ⁽⁸⁾	0,00652	0,01140	0,00645	0,01060	0,00645	0,01060	0,00652	0,01140
r^2	0,9872	0,9910	0,9875	0,9921	0,9875	0,9921	0,9872	0,9872

⁽¹⁾ Em todos os casos: $\theta_r \geq 0$; ⁽²⁾ parâmetros adimensionais; ⁽³⁾ unidade em hPa^{-1} para h , $\ln\ hPa^{-1}$ para $\ln\ h$ e $\log\ hPa^{-1}$ para $\log\ h$; ⁽⁴⁾ Suc. PI = sucção no ponto de inflexão - unidades em hPa para h , $\ln\ hPa$ para $\ln\ h$ e $\log\ hPa$ para $\log\ h$; ⁽⁵⁾ Curv. PI = curvatura no ponto de inflexão - unidades para S_h ($g\ g^{-1}\ hPa^{-1}$), $S_{\ln\ h}$ ($g\ g^{-1}\ \ln\ hPa^{-1}$) e $S_{\log\ h}$ ($g\ g^{-1}\ \log\ hPa^{-1}$); ⁽⁶⁾ $\varnothing_{eq}\ PI$ = diâmetro equivalente de poros no ponto de inflexão - unidade em μm ; ⁽⁷⁾ Cont. Água PI = conteúdo de água no ponto de inflexão - unidade em $g\ g^{-1}$; ⁽⁸⁾ RMSE = raiz quadrada do erro médio obtido a partir dos desvios entre os valores observados e preditos.