

DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA E DA DISTRIBUIÇÃO DE POROS POR TAMANHO EM SOLOS DE LAVRAS-MG

Matias Siueia Júnior¹, Patriciani Estela Cipriano², Geslin Mars³, Rodrigo Fonseca da Silva⁴, Leandro dos Santos Soares⁵, Emanuely Silva Assis⁶, Juliana Mara de Oliveira⁷, Diego Tassinari⁸, Moacir de Souza Dias Junior⁹

RESUMO

A dinâmica da água no perfil do solo pode influenciar na qualidade física do mesmo, comprometendo sobremaneira os processos químicos, físicos e biológicos que são importantes na qualidade do solo. Neste sentido, objetivou-se determinar as características físico-hídricas para diferentes classes de solos do município de Lavras-MG a partir da curva de retenção de água e comparar o índice S para esses solos. A amostragem decorreu em diferentes áreas do Campus da Universidade Federal de Lavras, em Lavras-MG, onde foram amostradas quatro classes de solo, Cambissolo, Argissolo, Latossolo e Nitossolo, em dois horizontes, A e B. Foi determinada a curva de retenção de água, a partir da qual se determinaram a distribuição de poros por tamanho e o índice S. Observou-se que o Latossolo apresentou uma melhor qualidade física e um maior valor de índice S em razão da sua estrutura granular.

Palavras-chave: Índice S, água disponível, qualidade física, distribuição de poros.

¹ Mestrando em Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - MG, bolsista do CNPq, E-mail: siueia.junior@gmail.com

² Mestrando em Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - MG, bolsista do CNPq, E-mail: patriciani_estela@hotmail.com

³ Mestrando em Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - MG, bolsista da CAPES, E-mail: gemars21@hotmail.com

⁴ Doutorando em Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - MG, bolsista do CNPq, E-mail: rodrigo11.07@hotmail.com

⁵ Doutorando em Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - MG, bolsista da CAPES, E-mail: agroleandro33@hotmail.com

⁶ Mestrando em Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - MG, bolsista da FAPEMIG, E-mail: emanuelyassis04@gmail.com

⁷ Mestrando em Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - MG, bolsista da FAPEMIG, E-mail: jujulianamara@yahoo.com.br

⁸ Doutorando em Ciência do Solo, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - MG, bolsista da CAPES, E-mail: tassinari1420@hotmail.com

⁹ Professor Titular, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras - MG, E-mail: msouzadj@dcs.ufla.br

INTRODUÇÃO

O solo tem a capacidade de atrair e reter água (DIAS JUNIOR et al., 2000). O fenômeno de retenção de água na matriz do solo é essencialmente regido por duas forças principais, as forças capilares (estrutura) e as forças de adsorção (textura) (Vieira, 2006), além disso, os teores de matéria orgânica e mineralogia do solo (Ferreira et al., 2003), e compactação em decorrência as alterações ocorridas na distribuição dos diâmetros de poros, influenciam na quantidade de água retida (Hillel 1980; Silva et al. 2005).

A curva de retenção da água no solo possibilita caracterização do mesmo quanto ao seu comportamento hidráulico, nas interações água-solo-planta, aeração, irrigação e drenagem (Centurion et al., 1997). Com os dados da curva, é possível calcular a difusividade capilar, conhecer a variação do potencial de água no solo e inferir sobre sua disponibilidade às plantas (Correa, 1984).

Com base na curva de retenção de água no solo é possível fazer a avaliação da qualidade física do solo (Nascimento et al., 2010). Isso é conseguido de acordo com Dexter (2004a) pelo valor da inclinação da curva de retenção de água em seu ponto de inflexão, ou seja, onde o ponto de curvatura é zero, sendo chamado este valor de índice S. Vale ressaltar que o ponto de inflexão já foi alvo de estudo de Ferreira & Marcos (1983), os autores propuseram o conceito do ponto de inflexão da curva característica de retenção de água no solo equivalente à capacidade de campo e obtendo significância nos resultados quando este ponto foi correlacionado com a umidade determinada na tensão de 6 kPa.

De acordo com Dexter (2004a), valores do índice S elevados revelam que o solo apresenta uma boa distribuição nos tamanhos dos poros e, por conseguinte uma boa qualidade estrutural. O índice proposto por Dexter (2004a 2004b, 2004c) permite a discussão das suas propriedades físicas (estrutura, estabilidade, porosidade, permeabilidade, etc.) a ser investigada, fornecendo de forma eficaz informações sobre funcionamento hídrico do solo.

Segundo Oliveira et al. (2004) a curva de retenção permite que se obtenha a distribuição de poros por tamanho, relacionando-se o volume de água drenada a cada etapa de equilíbrio ao volume de poros esvaziados. A função distribuição de poros por tamanho é obtida como a inclinação da curva de retenção de água expressa em umidade com base no volume, plotada em relação ao diâmetro equivalente de poros em escala logarítmica (Reynolds et al., 2009)

Neste sentido, o presente trabalho objetivou determinar as características físico-hídrica para as diferentes classes de solos do município de Lavras a partir da curva de retenção de água e comparar o S-índice em seu ponto de inflexão.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado na área do Campus da Universidade Federal de Lavras, em Lavras – MG, as coordenadas latitude 21° 14' 43 Sul e uma longitude 44° 59' 59 Oeste, e altitude de 919 m, tendo um clima segundo a classificação climática de Köppen, subtropical, do tipo Cwa, (Dantas et al., 2007). A amostragem decorreu em diferentes áreas, com diferentes classes de solo (Tabela 1) com recurso ao amostrador de Uhland que posteriormente foram condicionadas de forma indeformada, separadas e devidamente identificadas conforme o ponto de amostragem e o tipo do solo, e por sua vez submetidas ao

processamento e análises físicas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da UFLA.

Tabela 1. Caracterização das classes de solos e seus horizontes do Município de Lavras-MG.

Designação	Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Característica da Estrutura do Solo
CXbd	Cambissolo Háptico Tb distrófico	A	0-15	Fraca, pequena a média granular e moderada, pequena, blocos subangulares
		Bi	28-63	Fraca pequena a média, blocos subangulares
PVAd	Argissolo Vermelho- Amarelo distrófico	A	0-20	Moderada, média, blocos subangulares.
		Bt	67-105+	Moderada, grande, blocos subangulares.
NVdf	Nitossolo Vermelho distrófico	A	0-30	Moderada, média a pequena, granular.
		B	98-127+	Moderada a forte, média, blocos subangulares
LVdf	Latosolo Vermelho distrófico	A	0-26	Moderada, média a grande granular.
		Bw	64-122+	Forte, pequena e muito pequena granular.

Para a determinação da curva de retenção de água, foi usado o método de curva por secagem, onde foram usadas amostras de solo saturadas, submetidas nas sucções de 0,02; 0,04; 0,06 em unidade de sucção; e 0,1; 0,33; 1,0; 5,0 e 15 atm em extratores de placa porosa. Depois de alcançar o equilíbrio, foram pesadas as amostras úmidas e levadas para estufa por 48 horas. Após a secagem em estufa transferiu-se a amostra para um dessecador para resfriamento e posterior pesagem. Calculou-se a umidade, de posse dos dados de umidade das amostras em cada tensão e procedeu-se a confecção das curvas características de umidade do solo através do programa SWRC proposto por Dourado Neto et al. (2000), para gerar a curva utilizando o modelo de van Genuchten (1980), equação 1, assumindo a restrição $m = 1 - \frac{1}{n}$.

$$U = U_r + \frac{U_s - U_r}{\left[1 + (\alpha \psi)^n\right]^m} \quad (1)$$

Onde: U é a umidade do solo;

U_r é a umidade residual, ou seja, a umidade na maior sucção aplicada;

U_s é a umidade de saturação;

ψ é a tensão de água no solo num dado tempo;

α , n e m são parâmetros de ajuste da equação.

Segundo Dexter (2004), o parâmetro S é determinado a partir da curva de retenção de água, coincidindo com o valor de sua inclinação no ponto de inflexão. A inclinação é obtida por meio do ajuste da curva de retenção a um modelo matemático, assim como a distribuição de poros por tamanho (Equação 2).

$$S = -n (\theta_{sat} - \theta_{res}) [1 + 1/m]^{-(1+m)} \quad (2)$$

Onde: m e n são parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), θ_{sat} e θ_{res} são a umidade de saturação e a umidade residual, respectivamente.

Os dados foram submetidos à análise de variância, as médias em relação às classes de solos e métodos de análises nos diferentes horizontes dos solos foram avaliadas pelo teste de Skott Knott ($p \leq 0,05$) (Borges & Ferreira, 2002). A obtenção da curva de retenção de água, bem como, os testes paramétricos foram efetuados utilizando-se o software R 3.2.1 (RDCT, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Curva de retenção de água

Os parâmetros das curvas de retenção de água das diferentes classes solos (PVAd, CXdb, LVdf, NVdf) com 9 pontos de tensão (0, 2, 4, 6, 10, 33, 100, 500, 1500 kPa), ajustadas ao modelo de Genuchten (1980), estão apresentados no Tabela 2.

No processo de otimização não linear, estabeleceu-se que os valores dos parâmetros θ_r , n e α fossem maiores do que zero, não sendo necessário impor a restrição para θ_r ser igual ao teor de água em equilíbrio com a tensão próximo de 1500 kPa, conforme indicado por Assouline et al. (1998).

Assim, observa-se que o modelo de Genuchten (1980) explicou mais de 91% da variação dos dados referentes a curva de retenção de água no solo nos diferentes solos e horizontes (Tabela 2). Embora não tenha ocorrido um ajuste significativo para alguns valores de α , os demais coeficientes de ajuste (θ_s , θ_r e n) foram significativos ($p < 0,01$) na adequação do modelo. Segundo Mello et al. (2005) as menores significâncias observadas em α podem ter ocorrido em função da maior dificuldade de ajuste, gerado pela variabilidade dos dados, fato também constatado por outros trabalhos, como Tomasella et al. (2000) e Hodnett & Tomasella (2002).

Tabela 2. Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água, segundo o modelo de Genutchen (1980), para diferentes classes de solos, determinados pelo procedimento de regressão não linear, utilizando 9 pontos de tensão⁽¹⁾.

Parametro	Classe de solo			
	PVAd	CXdb	LVdf	NVdf
	Horizonte A			
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	0,16**	0,18**	0,21 ^{ns}	0,24**
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0,46**	0,55**	0,57**	0,59**
α (kPa ⁻¹)	97,17 ^{ns}	15,19 ^{ns}	479,94 ^{ns}	4,19 ^{ns}
N	1,11**	1,24**	1,13**	1,25**
R ²	0,94	0,96	0,91	0,97
	Horizonte B			
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	0,27**	0,22**	0,28**	0,30**
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0,54**	0,50**	0,66**	0,59**
α (kPa ⁻¹)	3,98 ^{ns}	3,33**	1,26**	2,67**
N	1,28**	1,34**	1,64**	1,42**
R ²	0,98	0,99	0,99	0,99

⁽¹⁾ Modelo de Genutchen (1980): $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \{1 + (\theta\Psi)^n\}^{-(1-1/n)}$, em que θ é o conteúdo volumétrico da água no solo (cm³ cm⁻³); θ_r é o conteúdo volumétrico residual da água no solo (cm³ cm⁻³); θ_s é o conteúdo volumétrico saturado da água no solo (cm³ cm⁻³); n é o fator de ajuste (sem dimensão); α é o fator de ajuste (kPa⁻¹). PVAd= Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; CXdb= Cambissolo Háplico Tb distrófico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférico; NVdf= Nitossolo Vermelho distroférico. ^{ns}: F não significativo; *: F significativo a 5 %; **: F significativo a 1 %.

Observando a Figura 1 é possível inferir que houve diferenças na capacidade de retenção de água para as tensões aplicadas nas diferentes classes de solos nos horizontes avaliados. Sendo que a maior variação na retenção de água, é evidenciada pela maior inclinação da curva, essa ocorreu nas tensões inferiores a 33 kPa, enquanto que para tensões mais elevadas, o teor de umidade variou pouco. A maior constância na umidade nas tensões maiores que 33 kPa é devido à água prontamente disponível ser diminuída a altas tensões restando a água adsorvida, sendo mais dificilmente retirada do solo. Nesse sentido, avaliando a retenção em solos inseridos na região Cerrado brasileiros, Silva et al. (2006), relatam que com aumento dos valores de tensão a uma tendência a diminuição nos valores de umidade. Esses autores sugerem ainda uma quantidade de oito pontos (1, 3, 6, 10, 35, 84, 611 e 1515 kPa) como recomendados para o levantamento das curvas de retenção de água desses solos.

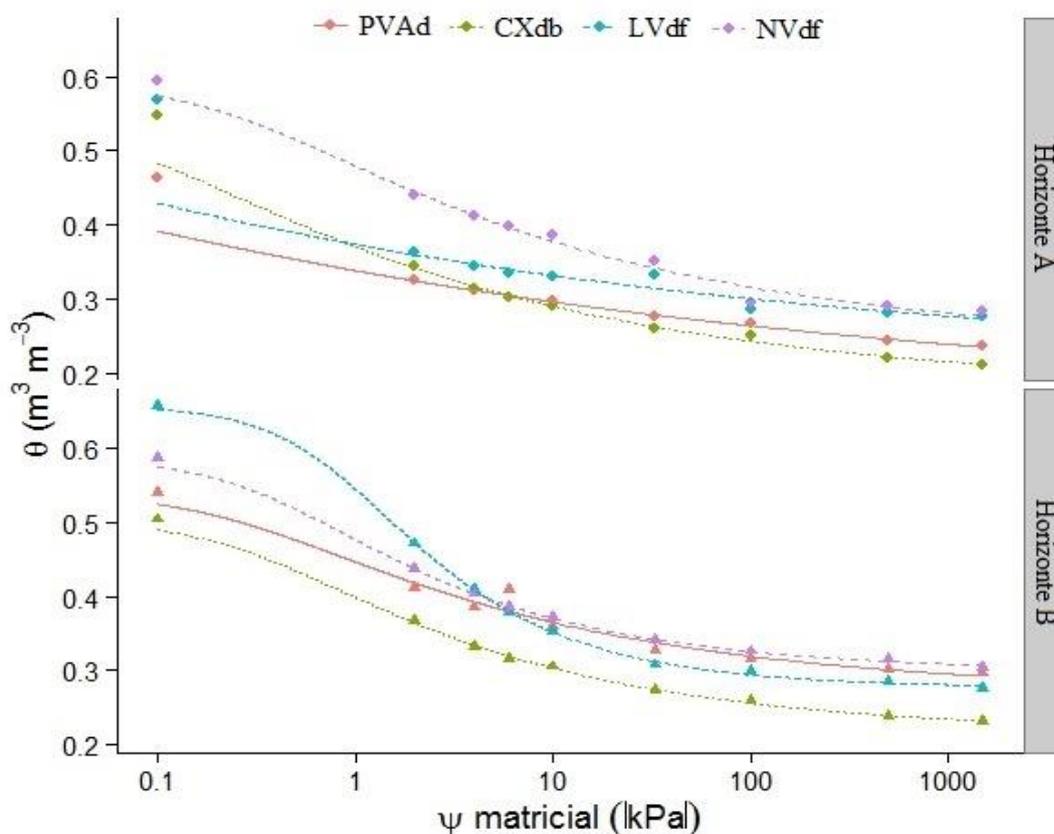


Figura 1. Curva de retenção de água de quatro classes de solo ajustadas nos horizontes A e B. PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; CXdb = Cambissolo Háptico Tb distrófico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférico; NVdf = Nitossolo Vermelho distroférico.

Ainda com base na Figura 1 podemos perceber que em tensões mais elevadas (>100 kPa), a retenção de água foi maior para o LVdf e NVdf no horizonte A, já para o horizonte B as maiores umidades foram obtidas nas classes de solo LVdf, NVdf e PVAd. Esses resultados podem estar associados ao maior conteúdo de minerais argila encontrados nesses horizontes para as respectivas classes de solos. Nesse sentido Beutler et al. (2002) relatam que em solos de textura mais fina a distribuição dos poros por tamanho é maior e mais uniforme, proporcionando a adsorção de maior conteúdo de água e decréscimo mais suave da umidade do solo com o aumento da tensão.

Ao se observar a variação da curva de retenção de água dos diferentes horizontes (Figura 2), dentro das classes de solos, percebe-se que horizonte B apresenta os maiores valores de umidade para o LVdf e PVAd, principalmente em tensões mais baixas. Esse resultado pode estar associado a quantidade de minerais secundários presentes nesses solos o que favorece a estruturação do solo. Segundo Ferreira et al. (1999) a maior retenção de água em baixas tensões ocorre em função da mineralogia oxidada da fração argila dos Latossolos que promove a formação de microagregados com menos de 1 mm e arredondados predominado poros de empacotamento composto entre eles com grãos não envolvidos de

plasma, formando um aspecto maciço poroso, promovendo maior proporção de poros grandes e menos densidade do solo.

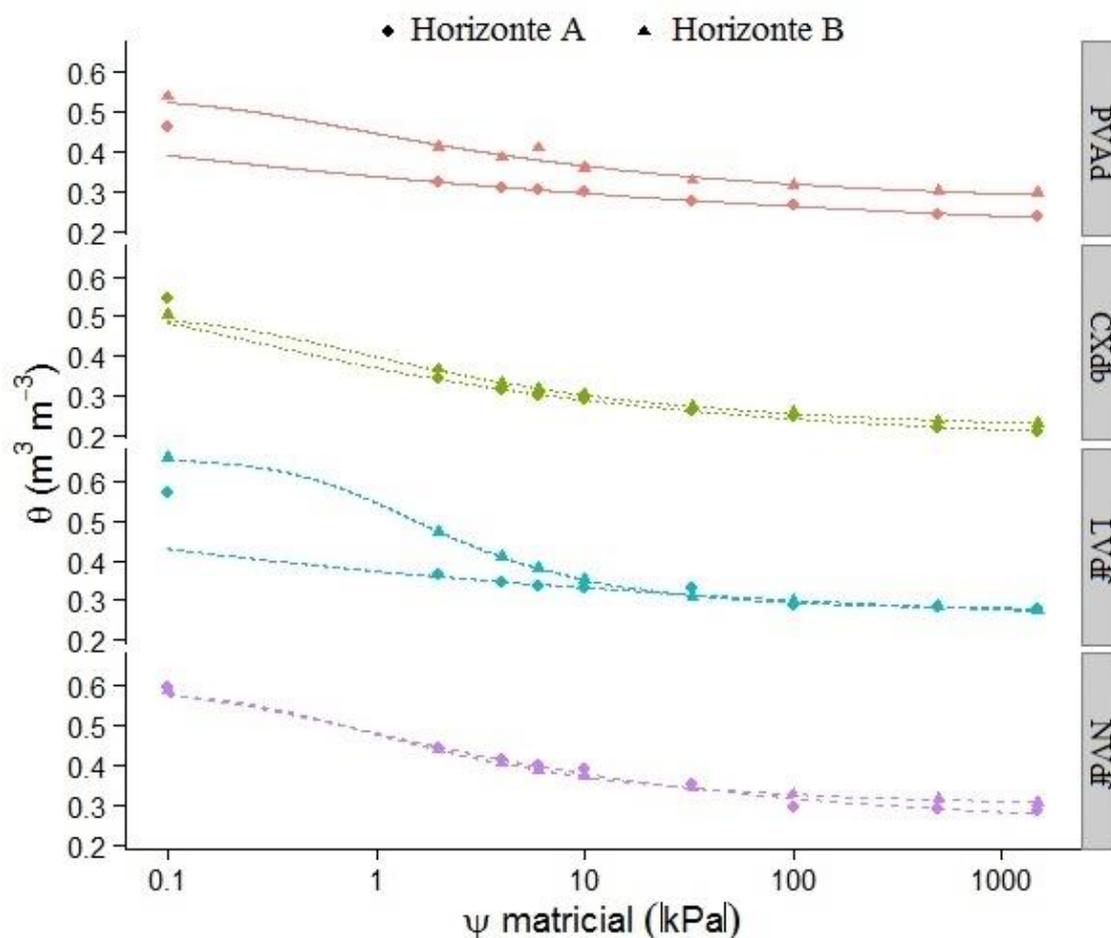


Figura 2. Curva de retenção de água dos horizontes A e B ajustados para as quatro classes de solo. PVA_d = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; CX_b_d = Cambissolo Háplico Tb distrófico; LV_d_f = Latossolo Vermelho distroférico; NV_d_f = Nitossolo Vermelho distroférico.

Distribuição de poros por tamanho

As curvas de distribuição de poros por tamanho nos solos estudados podem ser visualizadas nas Figuras 3 e 4. De uma maneira geral, quanto mais alta encontra-se a curva de distribuição de poros por tamanho no eixo das ordenadas, maior tende a ser a densidade de frequência do tamanho dos poros em dado intervalo de diâmetros equivalentes. Por ser uma distribuição de frequência, a área abaixo da curva em qualquer intervalo representa o volume de poros de dimensões definidas pelos limites do intervalo considerado. Dessa forma, observa-se que para o horizonte A (Figura 3), o LV_d_f foi o que apresentou maior quantidade de poros em toda a faixa de sucções aplicadas uma vez que a curva de distribuição de seus

poros encontra-se acima das curvas dos demais solos. Essa maior quantidade de poros encontrada para o LVdf pode estar relacionada a estrutura granular característica para essa classe de solo e muito bem expressa no solo avaliado.

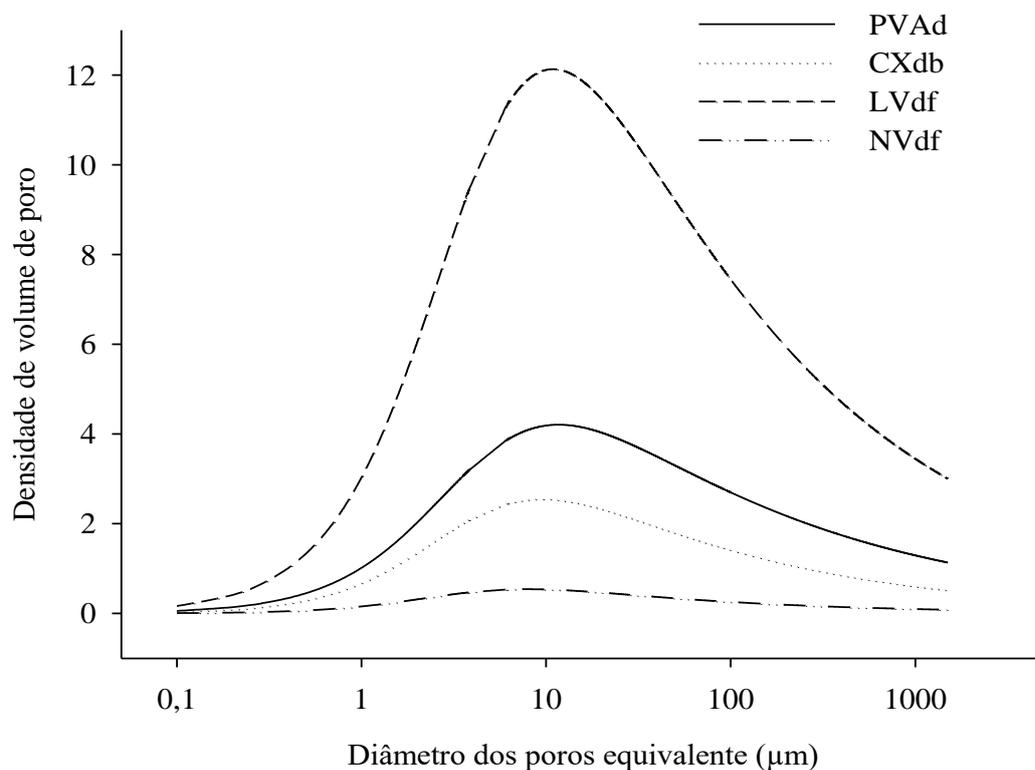


Figura 3. Distribuição de poros nas quatro classes de solo ajustadas no horizonte A. PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; CXbd = Cambissolo Háptico Tb distrófico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférico; NVdf = Nitossolo Vermelho distroférico.

Com base na Figura 4, pode-se observar que os solos CXbd, PVAd e NVdf apresentaram uma maior quantidade de poros nos diâmetros correspondentes as tensões de 0,1 a 100kPa no horizonte B.

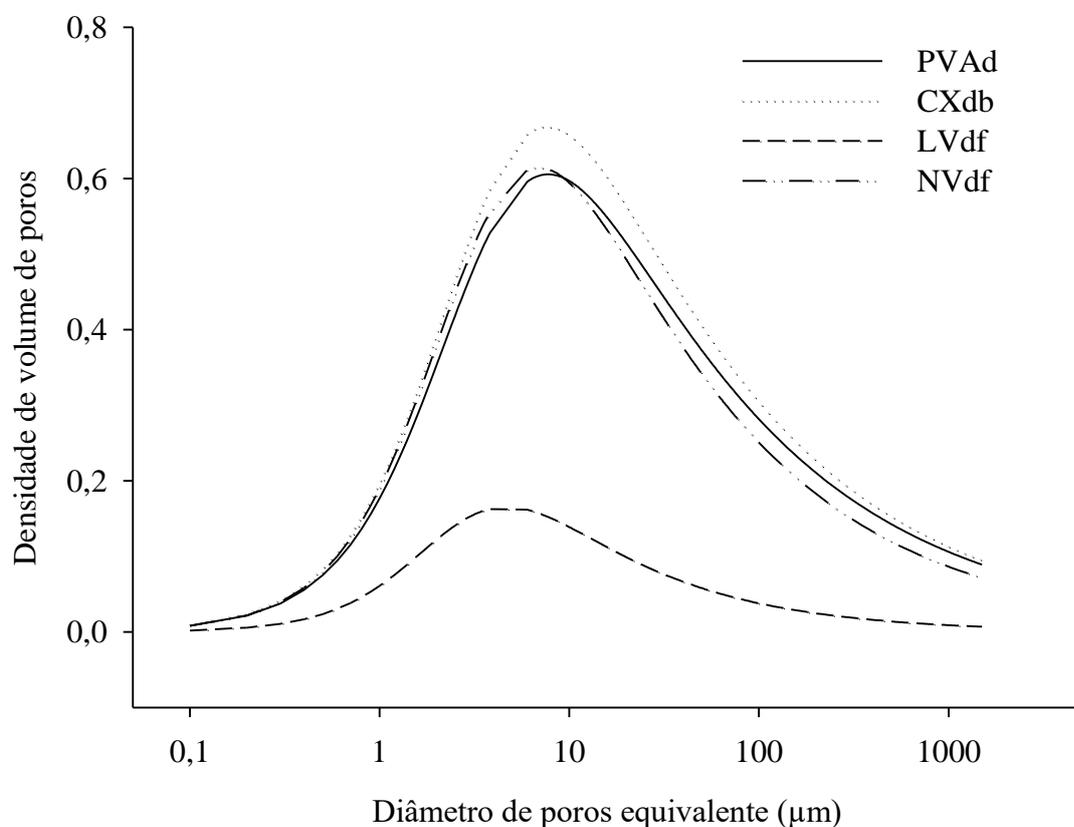


Figura 4. Distribuição de poros nas quatro classes de solo ajustadas no horizonte B. PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; CXdb = Cambissolo Háptico Tb distrófico; LVdf = Latossolo Vermelho distroférico; NVdf = Nitossolo Vermelho distroférico.

Índice S

A partir dos parâmetros estabelecidos pelas curvas de retenção de água, foram obtidos os valores de índice S (Figura 5). Em todos os solos estudados foi obtido o valor de $S \geq 0,04$, valor, que segundo Dexter (2004a) é favorável para o crescimento das raízes, que indica adequada distribuição de tamanho de poros e qualidade física do solo. Andrade & Stone (2009) indicam, $S \geq 0,045$ para solos de Cerrado. Stone et al. (2005), observa ainda, uma correlação positiva da macroporosidade com o índice S em um Latossolo Vermelho Distrófico sob vegetação de Cerrado.

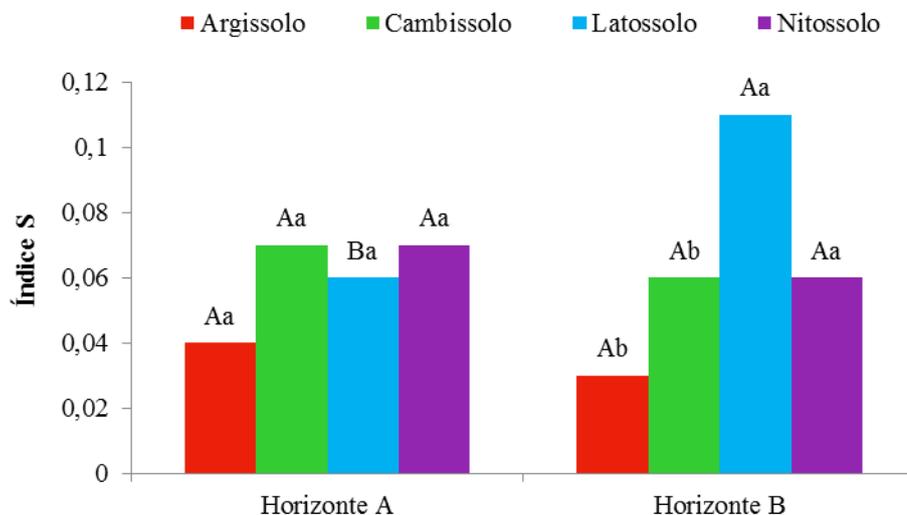


Figura 5. Índice S. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas comparam os Horizontes A e B dentro do mesmo solo e letras minúsculas comparam os diferentes solos dentro do mesmo horizonte.

O LVdf na camada subsuperficial, apresentou maiores valores de índice S. Indicando, de acordo com Streck et al. (2008), solo de boa qualidade estrutural, com boa distribuição de tamanho de poros, permitindo que o solo exerça suas funções físicas, com menor restrição física (aeração, mecânica, retenção de água) para o crescimento das raízes das plantas. O menor índice S foi observado no horizonte B do Argissolo, possivelmente indicando uma condição de adensamento, porém sem impor restrições severas ao desenvolvimento radicular já que o valor manteve-se acima do considerado crítico.

CONCLUSÕES

1. O Latossolo apresentou melhor qualidade física, apresentando maiores valores de retenção de água tensões mais baixas assim como maiores valores de índice S.
2. O Latossolo apresentou maior quantidade de poros no horizonte A, e Cambissolo, Argissolo e Nitossolo para o horizonte B.
3. Todos os solos apresentaram índice S acima do valor considerado crítico.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG, CNPq e CAPES pela concessão das bolsas de estudos. Ao Laboratório de Física do Solo do Departamento do Solo da Universidade Federal de Lavras ao apoio no desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R.S. & STONE, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do Cerrado brasileiro. *R. Bras. Eng. Agri. Amb.*, 13:382-388, 2009a.
- ANDRADE, A. R. S. **Características físico-hídricas dos solos da estação experimental da Embrapa-Algodão: Variabilidade espacial**. Campina Grande, Paraíba, UFPB, 1997. 101p. (Dissertação de Mestrado).
- ASSOULINE, S.; TESSIER, D.; BRUAND, A. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research*, 34: 223-231, 1998.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *Revista Brasileira de*
- BORGES, L. C.; FERREIRA, D. F. Poder e taxas de erro tipo I dos testes Scott-Knott, Tukey e Student-newmankeuls sob distribuições normal e não normais dos resíduos. *Rev. Mat. Estat.*, 21: 67-83, 2002.
- CENTURION, J. F.; MORAES, M. H.; DELLA LIBERA, C. L. F. Comparação de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21: 173-179, 1997.
- CORREA, J. C. Características físico-hídricas dos solos Latossolo Amarelo, Podzólico Vermelho-Amarelo e Podzol Hidromórfico do estado do Amazonas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 19: 347-360, 1984.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendência climática em Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, 31: 1862-1866, 2007.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. theory, effects of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-204, 2004.
- 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, tilth 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.
- DIAS JUNIOR, M. de S.; BERTONI, J. C.; BASTOS, A. R. R. **Física do solo**. Lavras: UFLA, 2000. 147 p. Apostila.
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model water retention curves (SWRC, version 2.00). *Scientia Agricola*, v. 57, n.1, p. 191-192, 2000.

FERREIRA, M. M. & MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e Regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática** 7: 96–101, 1983.

FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; MESQUITA, M. G. B. F.; ALVES, E. A. B. F. **Física do solo**. Lavras: UFLA, 2003. 79 p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23: 507-514, 1999.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, 44: 892-898, 1980.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic, 1980. 413 p.

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.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M.; LOPES, D. Modelos para determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 9: 23-29, 2005.

NASCIMENTO, P. S.; BASSOI, L. H.; PAZ, V. P. S.; VAZ, C. M. P.; NAIME & MANIERI, J. M. Estudo comparativo de métodos para determinação da curva de retenção de água no solo. **Irriga**, 15: 193-207, 2010.

OLIVEIRA, G. C.; JUNIOR, M. S. D.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 1, p. 327- 336, 2004.

R DEVELOPMENT CORE TEAM - RDCT. R: **A language and environment statistical computing**. Vienna, R Foundation for Statistical Computing, 2015.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. S.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 125, p. 252-263, 2009.

SILVA, E. M.; LIMA, J. E. F. W.; AZEVEDO, J. A.; RODRIGUES, L. N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41: 323-330, 2006.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A. ; BAYER, C. ; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao ar azenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, 35:544-552, 2005.

STONE, L. F.; BALBINO, L. C.; CUNHA, E. Q. Índice S como indicador da qualidade física do solo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 34, 2005, Canoas. **Resumos...** Canoas: Universidade Luterana do

STRECK, C.A. et al. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v.32, 2008.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**. 63: 327-338, 2000.

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

VIEIRA, M. L. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2006.115f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.