

**CURVA DE RETENÇÃO E DISPONIBILIDADE TOTAL DE ÁGUA EM LATOSSOLOS EMPREGANDO FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA**Philippe Guilherme Corcino Souza¹, João Carlos Ferreira Borges Júnior² & João Herbert Moreira Viana³

1 - Engenheiro Agrônomo, Professor Mestre Adjunto da Faculdade FEAD/Belo Horizonte-MG, philipe.corcino@gmail.com

2 - Engenheiro Agrícola, Professor Doutor Associado na UFSJ/Sete Lagoas-MG, jcborges@ufsj.edu.br

3 - Engenheiro Agrônomo, Pesquisador Doutor na EMBRAPA Milho e Sorgo/Sete Lagoas-MG, joao.herbert@embrapa.br

Palavras-chave:caracterização textural
modelagem
Rosetta**RESUMO**

Estudos sobre a faixa de conteúdo de água disponível para as plantas são geralmente baseados em análises da curva de retenção de água no solo (CRA). A obtenção da CRA envolve determinação em laboratório, por meio de procedimentos morosos e dispendiosos, motivando a avaliação de métodos alternativos. Objetivou-se neste trabalho avaliar o desempenho de funções de pedotransferência para a obtenção de parâmetros da CRA e determinação da disponibilidade total de água no solo (DTA) em horizontes superficiais de Latossolos de Sete Lagoas, MG, sob diferentes usos. Amostras indeformadas e deformadas de solo foram retiradas para a obtenção da CRA e caracterização textural. Funções de pedotransferência (FPT) do programa Rosetta foram utilizadas para determinação das CRAs, comparando-as com as obtidas pelo ajuste aos pontos da curva observados nas análises laboratoriais. Determinou-se a DTA dos horizontes em estudo. Constatou-se que os melhores ajustes para as CRAs foram obtidos com a FPT ROS4. Aplicando-se o teste de Friedman, verificou-se que os valores de DTA, obtidos com as FPTs, diferiram significativamente dos obtidos com método padrão, constatando-se tendência de superestimativa.

Keywords:modeling
Rosetta software
textural characteristics**WATER RETENTION CURVE AND AVAILABLE WATER CONTENT IN OXISOLS EMPLOYING PEDOTRANSFER FUNCTIONS****ABSTRACT**

Studies of the range of water content available to plants are generally based on analysis of the soil water retention curve (SWRC). Obtaining the SWRC involves laboratory work through time-consuming and costly procedures, therefore there is a need for alternative methods. The objective of this work was to evaluate the performance of pedotransfer functions to obtain SWRC parameters and to determine the total available soil water (TAW) in superficial horizons of Oxisol in Sete Lagoas, MG, under different uses. Undisturbed and disturbed soil samples were taken to obtain the SWRC and textural characteristics. Pedotransfer functions (PTF) of the Rosetta software were used to determine the SWRCs and to compare them with SWRCs obtained by adjust to the points of the curve observed in the laboratory analysis. TAW of the horizons under study was determined. The best adjustments for SWRCs were obtained with the PTF ROS4. Applying the Friedman test, TAW values obtained through PTFs differed significantly from those obtained by the standard method, determining an overestimation tendency of the PTF program.

INTRODUÇÃO

Os problemas ligados à retenção e ao movimento da água no solo constituem um importante campo de estudo na área de Física do Solo. As características hidráulicas do solo são dados primordiais à simulação de processos em Engenharia de Água e Solo, com enfoque em Ciências Agrárias e Ambientais (ANDRADE & STONE, 2011; MATULA *et al.*, 2007; MONTEIRO *et al.*, 2009; SUBBAIAH, 2013). Por exemplo, para análise do fluxo da água no solo não saturado, associado a processos como evaporação e redistribuição da água no solo, extração de água pelas raízes, infiltração e escoamento superficial, requer-se a caracterização físico-hídrica dos respectivos estratos do solo. O conhecimento das características físicas determinantes da dinâmica e retenção de água no solo é também essencial para o estabelecimento de condições de manejo adequadas para a proteção ambiental em sistemas agrícolas (SCORZA JÚNIOR *et al.*, 2010).

Estudos sobre a faixa de conteúdo de água disponível para as plantas são geralmente baseados em análises da curva de retenção de cada solo (ANDRADE & STONE 2011; BRITO *et al.*, 2011; DALMAGO *et al.*, 2009). A disponibilidade total de água no solo (DTA), por exemplo, é definida como a diferença entre os teores de água em base volumétrica de capacidade de campo (θ_{CC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PM}), que podem ser obtidos em relação a valores específicos do potencial matricial (SILVA *et al.*, 2014). A DTA interfere diretamente no crescimento radicular, nas reações químicas e na absorção de nutrientes, sendo fator determinante no planejamento agrícola em aspectos relacionados ao balanço hídrico.

A curva de retenção de água no solo é geralmente determinada em laboratório, envolvendo o uso de equipamentos como funil de Büchner, mesa de tensão e extrator de Richards. É elevado o requerimento de tempo para obtenção dos pontos da curva em menores potenciais matriciais. Em especial a determinação do ponto da curva referente ao ponto de murcha permanente acarreta considerável morosidade ao trabalho, requerendo-se horas e, em alguns casos, dias de estabilização das amostras de solo. Essa demora pode tornar a pesquisa inviável, quando

se tratar de levantamentos em grandes áreas com prazos restritos, o que tem motivado estudos de formas alternativas de obtenção da curva de retenção da água no solo e da DTA.

Propriedades físico-hídricas do solo, como a curva de retenção, também podem ser estimadas indiretamente por meio de correlações com dados básicos do solo, como a granulometria, densidade e teor de matéria orgânica (ŠIMŮNEK *et al.*, 2012). Esses métodos indiretos são denominados funções de pedotransferência, podendo substituir procedimentos padrões morosos e dispendiosos (BARROS *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2015).

Nesse contexto, objetivou-se neste trabalho avaliar o desempenho de funções de pedotransferência para a obtenção de parâmetros da curva de retenção de água e determinação da disponibilidade total de água no solo (DTA) em horizontes superficiais de Latossolos de Sete Lagoas, MG, sob diferentes usos.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram estabelecidas nove unidades experimentais em área da UFSJ, Campus Sete Lagoas, e nove na área da Embrapa Milho e Sorgo, localizada também no município de Sete Lagoas, MG, nas coordenadas médias de 19,48° latitude sul, 44,18° longitude oeste e 750 m de altitude. Enquanto na área da UFSJ o solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distroférico câmbico, constata-se a ocorrência de Latossolo Vermelho Distroférico típico e Latossolo Vermelho-Amarelo Distroférico típico na área da Embrapa.

Na área experimental da UFSJ havia, no momento da retirada das amostras de solo, uma vegetação rasteira predominante, sendo esta a *Urochloa brizantha* Hochstapf cultivar Marandu e algumas árvores esparsas. Na Embrapa havia uma área de mata nativa, uma área de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) com dois anos e seis meses de implantação, denominada neste trabalho de ILPF nova, e outra área de ILPF com cinco anos de implantação, denominada ILPF velha. As duas áreas com ILPF foram plantadas com o Eucalipto GG 100 com espaçamento de 15 x 2 m. O pasto nas duas áreas de eucalipto era constituído de uma mistura de *Urochloa brizantha* Hochstapf cultivar Marandu, Xaraés e Piatã, *Urochloa ruziziensis*

Stapf e *Urochloa decumbens* Stapf.

No momento de realização do experimento, na área da ILPF velha, havia apenas o pasto na entrelinha do eucalipto. Já na área da ILPF nova havia, além do pasto, restos da cultura do milho AG 8088 PRO, semeado com espaçamento de 0,70 m e adensamento de 65.000 plantas ha⁻¹. Na Embrapa, três unidades experimentais foram estabelecidas na área de ILPF nova, três na área da ILPF velha e três em área de mata nativa.

Trabalhou-se com dados primários, sendo que para cada unidade experimental foi retirada uma amostra de solo indeformada para a determinação dos pontos da curva de retenção na mesa de tensão, aos potenciais matriciais de -1; -3,3; -6 e -10kPa, e extrator de Richards, aos potenciais matriciais de -33; -100; -300 e -1.500kPa. As amostras foram retiradas a partir da superfície, em anéis com altura média de 26,3 mm e diâmetro médio de 48,6 mm. Também foi coletada uma amostra indeformada para a determinação da granulometria, pelo método da pipeta, e densidade do solo, em amostras com volume variando de 85,9 cm³ a 99,0 cm³. Os intervalos de confiança ao nível de 95% para as médias das frações texturais, porosidade e densidade do solo foram determinados por meio da metodologia de “bootstrap” com 1.000 reamostragens, aplicando-se o software @Risk versão 7 (PALISADE, 2016).

Foram utilizadas quatro funções de pedotransferência (FPT) do programa Rosetta (SCHAAPet al., 2001) para obtenção dos parâmetros α , n e θ_r do modelo da curva de retenção de água (CRA) proposto por VAN GENUCHTEN (1980), descrito na Equação 1:

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

em que,

θ_r = teor de água residual do solo (m³ m⁻³);

θ_s = teor de água do solo na saturação (m³ m⁻³),

que, para esse experimento, foi considerado como sendo o encontrado em laboratório;

h = carga de pressão ou potencial matricial (kPa);

α = parâmetro com dimensão igual ao inverso da dimensão do potencial (kPa⁻¹); e

n e m = parâmetros empíricos adimensionais. Considerou-se como sendo obtido pela expressão $1-1/n$ (ŠIMŮNEK et al., 2012).

As FPTs foram nomeadas como ROS1, ROS2, ROS3 e ROS4, sendo que para os dados de entrada de cada FPT foram utilizados, respectivamente, a granulometria do solo; a granulometria e a densidade do solo; a granulometria, a densidade e o teor de água ao potencial matricial de -33 kPa; a granulometria, a densidade, o teor de água ao potencial matricial de -33 kPa e o teor de água ao potencial matricial de -1.500kPa. De posse dos parâmetros do modelo de van Genuchten, a curva de retenção de água no solo foi obtida para cada FPT.

Como método padrão para definição dos parâmetros do modelo de van Genuchten, aplicou-se o software RETC, o qual se baseia no ajuste aos dados observados com base na minimização da soma de quadrado dos erros.

As curvas de retenção de água no solo obtidas pelas FPTs foram avaliadas frente às obtidas em laboratório utilizando-se os parâmetros estatísticos erro absoluto médio (EAM, Equação 2), coeficiente de correlação de Pearson (r , Equação 3), coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância (d , Equação 4), índice de confiança (C , Equação 5), raiz do erro quadrático médio (REQM, Equação 6) e coeficiente de eficiência (E , Equação 7). Abaixo as respectivas equações empregadas para cada parâmetro estatístico:

$$EAM = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (2)$$

em que,

O_i = dado observado;

P_i = dado predito; e

N = número de pares de dados observados e preditos.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2\right]^{0,5} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2\right]^{0,5}} \quad (3)$$

em que,

\bar{O} = a média do dado observado; e

\bar{P} = a média do dado predito.

O índice de concordância (Equação 4) é definido como (CAMARGO & SENTELHAS, 1997; WILLMOTT et al., 2012):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (4)$$

O índice d varia de 0 a 1, sendo que os valores mais próximos de 1 indicam maior concordância entre os dados preditos e os observados.

O índice de confiança, C , foi definido por CAMARGO & SENTELHAS(1997) para indicar o desempenho dos modelos para estimativa de médias mensais de evapotranspiração de referência, sendo o produto de uma medida de exatidão (d) por uma de precisão (r):

$$C = d \cdot r \quad (5)$$

Para este índice, os resultados são interpretados segundo critérios apresentados na Tabela 1:

Tabela 1. Critério para avaliação do parâmetro “C” proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997)

Valor de C	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

A raiz do erro quadrático médio é definida como:

$$REQM = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad (6)$$

Observa-se que $REQM \geq EAM$ e o grau com que a $REQM$ excede o EAM pode indicar a presença e dimensão de erros discrepantes (outliers) ou a maior variação existente entre os dados observados e os dados preditos. O coeficiente de eficiência de

Nash e Sutcliffe é definido por meio da expressão (WILLMOTT et al., 2012):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

Este coeficiente de eficiência varia de $-\infty$ até 1, sendo que os valores mais próximos de 1 indicam maior concordância entre os dados preditos e os observados.

O potencial de -33 kPa, que frequentemente aparece na literatura como sendo o da capacidade de campo, refere-se a solos comumente encontrados em regiões de clima temperado, onde há presença de argilas de maior atividade. Assim, para a capacidade de campo, levando-se em consideração o padrão comumente encontrado em Latossolos tropicais, adotou-se o teor de água equivalente ao potencial matricial de -6 kPa, configurando-se assim o limite superior da DTA (ANDRADE & STONE, 2011; SILVA et al., 2014). Como limite inferior, ou seja, para o ponto de murcha permanente, considerou-se o teor de água para o potencial matricial de -1.500kPa.

Aos resultados de DTA, foram aplicados o teste de Lilliefors para verificação da normalidade e o teste de Levene para análise de homogeneidade de variâncias. Verificou-se que nem todos os conjuntos amostrais de valores de DTA apresentam normalidade, mostrando diferenças nos padrões de simetria, e que os conjuntos de valores de DTA obtidos com os diferentes modelos não apresentam variância comum (homocedasticidade). Assim, foi constatado que a aplicação da análise de variância em esquema fatorial pelo teste F não seria adequada. Utilizou-se então o teste de Friedman para comparação dos valores de DTA obtidos por meio das diferentes FPTs em relação à obtida com o programa RETC, considerado como referencial.

Os dados foram considerados emparelhados, já que para cada amostra de solo foram geradas curvas de retenção de água no solo pelas diferentes FPTs. Para o teste de Friedman, cada unidade experimental, sendo nove na área da Embrapa e nove na área da UFSJ, foi considerada como um bloco. Considerou-se o nível de significância de

5% para os testes de Levene, Lilliefors e Friedman. Os testes de Levene e Friedman foram aplicados utilizando-se, respectivamente, os pacotes CAR e AGRICOLAE do programa R, versão 3.2.5. O teste de Lilliefors foi aplicado com o programa StatTools 7 (PALISADE, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na distribuição granulométrica dos solos estudados, sintetizada na Tabela 2, os teores de argila se destacaram por serem superiores a 68%, resultado esperado para estratos superficiais dos Latossolos considerados. Os maiores teores de argila foram verificados na área da ILPF velha, seguido pela mata e pela ILPF nova. Na área da UFSJ, os teores de argila foram menores, ficando em torno de 70%. O maior coeficiente de variação foi verificado para a fração silte, sendo igual a 38,5%, e o menor para a fração argila, igual a 7,9%. Ressalta-se os elevados valores obtidos para porosidade e conseqüentemente baixos valores de densidade do solo, características de um estrato superficial com elevada capacidade de infiltração.

As densidades dos estratos de solos nas áreas da Embrapa foram, em geral, inferiores à dos solos da UFSJ. Maiores densidades foram verificadas na área da ILPF velha e em seguida na área da ILPF nova, o que pode ser explicado pelo maior tempo de compactação causado pelo pisoteio dos animais na área com atividades mais antigas. A área de mata nativa apresentou os menores valores de densidade, assim como nos estudos de CENTURION et al. (2007).

Nas tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados das estatísticas referentes aos ajustes das curvas de retenção de água no solo em relação aos dados observados, obtidas com o RETC e com as FPTs. Observa-se nestas tabelas o elevado ajuste obtido com a aplicação do software RETC, aqui considerado como método padrão, com coeficiente de confiança superior a 0,99 para todas as amostras, indicando a adequação do modelo de van Genuchten na descrição das curvas de retenção.

A FPT ROS4, que requer o maior número de dados de entrada (frações texturais, densidade do solo e teores de água aos potenciais matriciais de -33 kPa e -1.500 kPa), propiciou melhores ajustes

que as demais FPTs, segundo todas as estatísticas de ajuste consideradas, conforme se constata nas tabelas 3 e 4. Os valores do índice de confiança, C, foram superiores a 0,86 para todas as unidades experimentais, caracterizando o desempenho como “ótimo” conforme a classificação de CAMARGO & SENTELHAS (1997). Com este critério, os valores médios gerais de C obtidos com a aplicação de ROS1 e ROS2 são classificados como de “bom” desempenho, enquanto ROS3 tem desempenho classificado como “muito bom”.

A FPT ROS4, por necessitar apenas de dois pontos da curva de retenção, se mostra uma alternativa vantajosa aos métodos tradicionais nos quais são requeridos vários pontos para a obtenção da curva, podendo tornar o trabalho de obtenção da curva mais rápido e menos laborioso.

Considerando-se os índices estatísticos EAM, REQM e E, o segundo melhor ajuste foi apresentado pela FPT ROS1, sendo esta aquela com menor requerimento de dados de entrada. Esta posição no rank é alterada se considerados os parâmetros estatísticos r, d e C, sendo ocupada pela FPT ROS3. A inserção da densidade do solo, em acréscimo às frações texturais no conjunto de dados de entrada, não propiciou ganho de desempenho para a FPT ROS2, comparativamente à ROS1, a não ser quando considerado o coeficiente de correlação ou o índice de concordância como medida classificatória.

Trabalhando com redes neurais na formulação de funções de pedotransferência, assim como é feito no programa ROSETTA, SCHAAP et al. (1998) encontraram valores semelhantes de REQM (média de $0,061 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para uma FPT que requereu os mesmos dados de entrada da FPT ROS4. Para esta FPT, os dados de REQM para cada unidade experimental variaram de $0,027$ a $0,077 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, tendo gerado valores médios para cada local apresentados na Tabela 3.

GHANBARIAN-ALAVIJEH et al. (2010) aplicaram o programa Rosetta para prever a curva de retenção em solos dos Estados Unidos e obtiveram um valor de $0,136 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a REQM, utilizando uma FPT com requerimento de teores de areia, silte e argila, assim como a ROS1. Este valor está acima do intervalo apresentado para a FPT ROS1 na Tabela 3.

Para o índice de eficiência (E), foram

Tabela 2. Resultados da análise granulométrica, porosidade e densidade para os horizontes superficiais dos Latossolos considerados

Atributo	Média	LI (*)	LS (*)	Desvio padrão	Máximo	Mínimo
Fração Areia (dag kg ⁻¹)	13,69	12,60	14,85	2,39	18,00	10,35
Fração Silte (dag kg ⁻¹)	12,08	9,95	14,34	4,65	18,50	5,25
Fração Argila (dag kg ⁻¹)	74,23	71,56	77,09	5,85	84,35	68,01
Porosidade (m ³ m ⁻³)	0,629	0,597	0,663	0,070	0,763	0,513
Densidade do solo (Mg m ⁻³)	0,963	0,898	1,033	0,143	1,189	0,716

(*) Limites inferior (LI) e superior (LS) do intervalo de confiança ao nível de 95% para média, obtidos por bootstrap.

Tabela 3. Erro absoluto médio (EAM), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), índice de confiança (C) e raiz do erro quadrático médio (REQM) dos ajustes das curvas de retenção de água no solo, obtidas com o programa RETC e funções de pedotransferência ROS1, ROS2, ROS3 e ROS4

Medida	Modelo	Local					
		EL1(*)	EL2	EL3	UL1	UL2	UL3
EAM (m ³ m ⁻³)	RETC	0,0078	0,0040	0,0038	0,0036	0,0046	0,0038
	ROS1	0,0493	0,0684	0,0970	0,0776	0,0725	0,0497
	ROS2	0,0464	0,0827	0,1419	0,0903	0,1318	0,0930
	ROS3	0,0730	0,0649	0,0944	0,0682	0,0755	0,0695
	ROS4	0,0298	0,0340	0,0430	0,0310	0,0254	0,0291
r	RETC	0,997	0,999	0,999	0,999	0,998	0,998
	ROS1	0,917	0,873	0,750	0,798	0,842	0,883
	ROS2	0,948	0,915	0,814	0,822	0,897	0,919
	ROS3	0,963	0,940	0,790	0,884	0,921	0,947
	ROS4	0,979	0,981	0,917	0,951	0,991	0,989
d	RETC	0,998	0,999	1,000	0,999	0,999	0,999
	ROS1	0,865	0,844	0,750	0,796	0,841	0,907
	ROS2	0,947	0,884	0,712	0,788	0,749	0,822
	ROS3	0,914	0,937	0,822	0,896	0,908	0,902
	ROS4	0,973	0,972	0,946	0,962	0,984	0,976
C	RETC	0,995	0,998	0,999	0,998	0,998	0,997
	ROS1	0,795	0,739	0,568	0,638	0,708	0,802
	ROS2	0,899	0,810	0,582	0,650	0,671	0,757
	ROS3	0,880	0,881	0,652	0,793	0,836	0,855
	ROS4	0,952	0,953	0,868	0,916	0,975	0,965
REQM (m ³ m ⁻³)	RETC	0,0096	0,0056	0,0047	0,0044	0,0060	0,0052
	ROS1	0,0732	0,0886	0,1037	0,0867	0,0818	0,0561
	ROS2	0,0555	0,0944	0,1605	0,1058	0,1459	0,1044
	ROS3	0,0826	0,0758	0,1222	0,0778	0,0882	0,0804
	ROS4	0,0400	0,0450	0,0611	0,0393	0,0316	0,0341

(*) EL1 - área da Embrapa, ILPF velha; EL2 - área da Embrapa, ILPF nova; EL3 - área da Embrapa, mata nativa; UL1, UL2 e UL3 - área da UFSJ. Em cada local foram feitas três determinações.

Tabela 4. Coeficiente de eficiência (E), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente angular da regressão (b) e coeficiente linear de regressão (a) dos ajustes das curvas de retenção de água no solo, obtidas com o programa RETC e funções de pedotransferência ROS1, ROS2, ROS3 e ROS4

Medida	Modelo	Local					
		EL1(*)	EL2	EL3	UL1	UL2	UL3
E	RETC	0,993	0,998	0,998	0,998	0,997	0,996
	ROS1	0,665	0,611	0,311	0,168	0,494	0,670
	ROS2	0,807	0,480	-0,670	-0,192	-0,603	-0,158
	ROS3	0,563	0,712	0,006	0,409	0,411	0,309
	ROS4	0,896	0,898	0,755	0,832	0,921	0,869
R^2	RETC	0,993	0,998	0,998	0,998	0,997	0,997
	ROS1	0,842	0,764	0,566	0,638	0,710	0,780
	ROS2	0,899	0,838	0,664	0,676	0,804	0,845
	ROS3	0,928	0,884	0,630	0,782	0,848	0,897
	ROS4	0,959	0,963	0,842	0,905	0,982	0,978
b	RETC	0,997	0,999	0,998	0,998	0,995	0,990
	ROS1	0,562	0,549	0,487	0,652	0,621	0,832
	ROS2	0,906	0,875	0,906	0,949	1,084	1,266
	ROS3	1,171	1,072	1,155	1,275	1,444	1,591
	ROS4	0,968	0,925	1,074	1,037	1,182	1,284
a	RETC	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004
	ROS1	0,164	0,175	0,235	0,174	0,183	0,088
	ROS2	0,059	0,106	0,167	0,096	0,103	-0,016
	ROS3	-0,139	-0,064	-0,031	-0,109	-0,142	-0,233
	ROS4	-0,004	0,010	-0,013	0,000	-0,049	-0,101

(*) EL1 - área da Embrapa, ILPF velha; EL2 - área da Embrapa, ILPF nova; EL3 - área da Embrapa, mata nativa; UL1, UL2 e UL3 - área da UFSJ. Em cada local foram feitas três determinações.

encontrados valores muito baixos e até negativos para as FPTs ROS1, ROS2 e ROS3. Para a ROS2, a média geral de E foi a mais baixa, igual a -0,056, variando, por unidade experimental, de -1,601 a 0,874. Segundo KRAUSE et al. (2005), na avaliação de modelos hidrológicos, valores de E menores que zero indicam que a própria média das repetições dos dados observados em laboratório é um melhor valor que o obtido com o modelo em questão. A maior média geral de E foi obtida para a FPT ROS4, igual a 0,862, com variações por unidade experimental de 0,684 a 0,953.

Em relação à análise de regressão linear, obteve-se para a FPT ROS4 elevados valores do coeficiente de determinação, sendo superiores a 0,9 para 14 unidades experimentais e inferior a 0,8 em apenas uma. Os valores dos coeficientes angular e linear foram, respectivamente, mais próximos a

um e zero, comparativamente às demais FPTs. Na sequência, em geral os melhores desempenhos na análise de regressão foram verificados para ROS3, ROS2 e ROS 1, havendo exceções em dois locais com mata nativa na área da Embrapa, entre ROS2 e ROS3. Estes resultados corroboram com obtidos por SCHAAP et al. (2001), que ao aplicarem o programa Rosetta para avaliar 5 funções de pedotransferência identificaram um melhor ajuste entre os valores preditos e observados quando mais dados de entrada foram adicionados às funções de pedotransferência.

O bom desempenho da FPT ROS4 mostra a possibilidade de aplicar funções de pedotransferências obtidas para solos de clima temperado a solos em regiões tropicais. Essa possibilidade também foi observada por MELO et al. (2015), que utilizaram funções de pedotransferência

originadas de clima mediterrâneo e temperado para predizer a curva de retenção de solos brasileiros e obtiveram resultados satisfatórios. Contudo, estudos de checagem da qualidade de ajustes a solos específicos devem preceder a análise.

Na Tabela 5 são apresentados os valores da disponibilidade total de água no solo (DTA, mm m⁻¹) para os estratos superficiais de cada unidade experimental. Pelo teste de Lilliefors ao nível de 5% de significância, constatou-se que as distribuições de valores de DTA se ajustam à distribuição Normal, exceto para aqueles obtidos com a FTP ROS3 (estatística do teste igual a 0,2238 frente a um valor crítico de 0,2019). Contudo, na aplicação do teste de Levene na análise da homogeneidade de variâncias para os conjuntos de valores de DTA obtidos por modelo, obteve-se o p-valor igual a 0,001895, implicando na rejeição da hipótese de nulidade ao nível de significância de 5% e indicando o não atendimento a uma das premissas para aplicação da análise de variância a um esquema experimental fatorial (fatores local e

modelo) paramétrico.

Assim, aplicou-se o teste de Friedman com posterior comparação de médias aos dados apresentados na Tabela 5, obtendo-se o p-valor igual a $5,412 * 10^{-13}$, com rejeição da hipótese de nulidade em que os efeitos dos tratamentos (modelos) são iguais. Na Tabela 6 apresenta-se a comparação de médias de valores de DTA obtidos com os modelos considerados, após o teste de Friedman. Apesar da classificação positiva dos ajustes de pontos da CRA conforme valores de C na Tabela 3, constatou-se que todas as FPTs apresentaram valores médios de DTA diferentes dos obtidos com o RETC, aqui considerado como o método padrão, havendo tendência de superestimativa. Esta tendência foi menos pronunciada para a FPT ROS4 e, em seguida, para a ROS1, respectivamente as que requerem maior e menor quantidade de dados de entrada. Nota-se que os valores de DTA são decorrentes da inclinação da CRA entre os pontos considerados de capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Tabela 5. Valores da disponibilidade total de água no solo (DTA, mm m⁻¹) obtidos com a aplicação do software RETC e com as funções de pedotransferência ROS1, ROS2, ROS3 e ROS4

Local(*)	Modelo				
	RETC	ROS1	ROS2	ROS3	ROS4
1	193,2	184,8	264,2	286,6	251,4
2	184,9	185,7	272,8	258,1	217,0
3	203,4	184,1	249,5	271,1	228,6
4	158,3	214,8	304,8	247,6	204,3
5	163,5	195,1	281,2	248,3	166,9
6	181,7	208,0	273,5	262,0	222,1
7	99,1	187,0	294,7	280,2	142,1
8	125,0	185,6	288,1	269,0	171,0
9	110,8	186,7	271,4	261,7	178,3
10	105,7	195,9	269,8	237,9	154,9
11	75,2	199,2	257,6	178,8	117,0
12	85,5	197,9	264,8	260,9	152,5
13	85,1	206,0	292,4	249,1	141,9
14	121,6	204,2	300,3	258,6	102,5
15	128,9	199,4	294,8	250,2	166,7
16	120,6	214,8	301,1	246,5	164,4
17	121,8	212,3	288,2	279,5	179,0
18	108,8	212,6	274,4	271,7	177,0

(*) Locais 1 a 3: área da Embrapa, ILPF velha; locais 4 a 6: área da Embrapa, ILPF nova; locais 7 a 9: área da Embrapa, mata nativa; locais 10 a 18: área da UFSJ.

Tabela 6. Resultados da comparação de médias, ao nível de significância de 5%, da disponibilidade total da água no solo (DTA, mm m⁻¹) obtidas com a aplicação do software RETC e com as funções de pedotransferência ROS1, ROS2, ROS3 e ROS4, com respectivos ranks para o teste de Friedman

Modelo	Média da DTA (*)	Rank
ROS2	280,2a	88
ROS3	256,5b	73
ROS1	198,6c	49
ROS4	174,3d	39
RETC	131,8e	21

(*) Médias seguidas de letras diferentes são significativamente diferentes.

A percepção a partir da Tabela 6 é corroborada na análise do gráfico boxplot apresentado na Figura 1. Observa-se nesta figura a divergência entre as medianas dos modelos utilizados, sendo as FPTs ROS2 e ROS3 as que mais se distanciaram do modelo padrão, apresentando não apenas as medianas, mas toda a dispersão de dados superior à verificada para o RETC. Já as FPT ROS4 e ROS1 foram, nesta sequência, novamente as que apresentaram resultados mais próximos aos do RETC. Também se evidencia a assimetria nos dados obtidos com o RETC e a ROS4, diferindo em especial do que se verificou para os resultados obtidos com a ROS1 e ROS 3. Um outlier foi verificado nos resultados da aplicação da ROS3, decorrente de um baixo valor estimado para o potencial matricial de -6 kPa com esta função de pedotransferência. O ponto discrepante refere-se ao local 11 (Tabela 5), para o qual foram obtidos os menores valores observados de DTA e teor de água ao potencial de -33 kPa e a maior densidade do solo. A especialmente baixa DTA neste local para o conjunto de valores de ROS3 indica uma provável elevada sensibilidade desta FPT aos dados de densidade de solo e teor de água ao potencial matricial de -33 kPa.

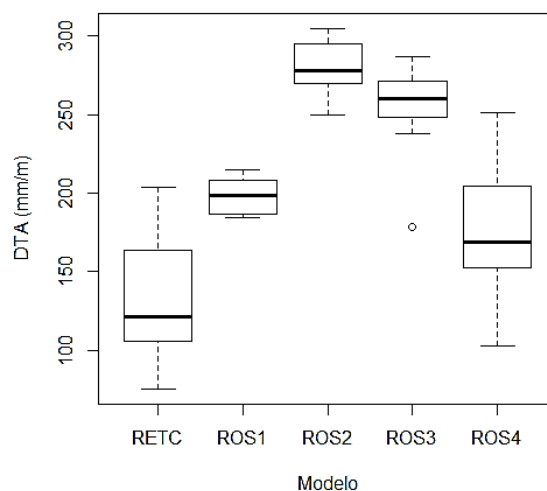


Figura 1. Boxplot para as distribuições de valores de disponibilidade total de água no solo (DTA, mm m⁻¹) obtidas com a aplicação do software RETC e com as funções de pedotransferência ROS1, ROS2, ROS3 e ROS4.

CONCLUSÕES

- Os melhores ajustes para as curvas de retenção de água no solo foram obtidos com a FPT ROS4, que requer o maior número de dados de entrada, segundo todas as estatísticas de ajuste consideradas.
- Considerando-se as estatísticas erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (REQM) e coeficiente de eficiência (E), o segundo melhor ajuste foi obtido com a aplicação da FPT ROS1, com o menor requerimento de dados de entrada.
- Os valores de disponibilidade total de água no solo, obtidos com as FPTs, diferiram significativamente dos obtidos com o programa RETC, constatando-se tendência de superestimativa.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa concedida e à FAPEMIG pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, R.S.; STONE L.F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.2, p.111-116, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-4366201100020000>.
- BARROS, A.H.C.; VAN LIER, Q.J.; MAIA, A.H.N.; SCARPARE, F.V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, p.379-391, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000200009>.
- BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.6 p.1939-1948, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000600010>.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; ARATANI, R.G.; METZNER, A.F.M.; BEUTLER, A.N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.199-209, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000200002>.
- DALMAGO, G.A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I.; KRÜGER, C.A.M.B.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.855-864, 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000700007>.
- GHANBARIAN-ALAVIJEH, B.; LIAGHAT, A.; HUANG, G.; VAN GENUCHTEN, MTH. Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data. **Pedosphere**, China, v.20, p.456-465, 2010. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60035-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60035-5).
- KRAUSE, P.; BOYLE, D.P.; BASE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, Munique, v.5, p.89-97, 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>.
- MATULA S.; MOJROVÁ, M.; ŠPONGROVÁ, K. Estimation of soil water retention curve (SWRC) using pedotransfer functions (PTFs). **Soil & Water Research**, República Checa, p.113-122, 2007.
- MELO, T.M.; BRETANHA, S.S.F.; PEREIRA, M.; CASTRO, N.M.R.; LOUZADA, J.A.S.; OLIVEIRA, M.H.C. Comparação de Modelos para Determinação Indireta da Curva de Retenção de Água no Solo: Aplicação em Solos da Bacia do Arroio Taboão, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.20, n.3, p.571-582, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v20n3.p571-582>.
- MONTEIRO, A.L.N.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.; SANTOS, F.X. Avaliação de lavagem parcial de saís em neossolo flúvico irrigado, utilizando modelagem computacional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.2 p.207-220, 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000200004>.
- PALISADE CORPORATION - GUIDE TO USING @RISK. Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft® Excel - Versão.7.0.1, **New York**, Palisade Corporation. <http://www.palisade.com/>. p.880, 2016.
- SCHAAP, M.G.; LEIJ F.J.; VAN GENUCHTEN, M.T.H. ROSSETA: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Function. **Journal of Hydrology**, EUA, v.1, p.163-176, 2001.

SCHAAP, M.G.; LEIJ F.J.; VAN GENUCHTEN, M.TH. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America**, EUA, v.62, p.847-855, 1998. doi: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200040001x>.

SCORZA JÚNIOR, R.P.; SILVA, J.P.; RIGITANO, R.L. Simulation of moisture profiles in a Latossol in Dourados region, in the State of MatoGrosso do Sul, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, p.22-32, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162010000100003>.

SILVA, B.M.; SILVA, E.A.; OLIVEIRA, G.C.; FERREIRA, M.M.; SERAFIM, M.E. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, p.464-475, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000200011>.

SILVA, E.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; VOLPATO, M.M.L.; SANTOS, W.J.R.; SILVA, S.H. G.Pedotransfer functions for water retention in the main soils from the brazilian coastal plains. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.39, n.4, p.331-338, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542015000400003>.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. TH.; ŠEJNA, M. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical Manual Version 2.0. **PC Progress**, Praga, República Tcheca, 258 p., 2012. <https://www.pc-progress.com/downloads/Pgm_Hydrus3D2/HYDRUS3D%20Technical%20Manual.pdf>. Acesso em: 17 Nov. 2016.

SUBBAIAH, R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. **Irrigation Science**, v.31, p.225-258, 2013. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s00271-011-0309-x>.

VAN GENUCHTEN, MTH. Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, EUA, v.44, p.892-898. 1980. doi: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

WILLMOTT, C.J.; ROBESON, S.M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, EUA, v.32, p.2088-094, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3487>.