



DESENVOLVIMENTO DE UMA FUNÇÃO HIDROPEDOLÓGICA PARA UMIDADE VOLUMÉTRICA SATURADA DE SOLOS BRASILEIROS

DEVELOPMENT OF A PEDOTRANSFER FUNCTION FOR VOLUMETRIC SATURATED WATER CONTENT OF BRAZILIAN SOILS

Lorena Vila Bela Costa¹; Willames de Albuquerque Soares¹

Artigo recebido em: 14/08/2018 e aceito para publicação em: 13/06/2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v19i2.12304>

Resumo: Propriedades hidráulicas do solo geralmente são de difícil aquisição e demandam bastante tempo e recursos financeiros. Nesse contexto, surgem as Funções Hidropedológicas (FHP) que são equações que por meio de modelos matemáticos predizem propriedades do solo a partir de dados de sua composição. Neste artigo, foi desenvolvida uma FHP para a estimativa da umidade volumétrica saturada tomando como base um banco de dados de 84 amostras de solos representativos do Brasil. Para a sua avaliação, o Modelo Proposto foi comparado com outras sete FHP, e ao final mostrou-se a mais eficiente para o caso estudado, já que obteve o melhor desempenho geral nos quatro parâmetros estatísticos aplicados. Verificou-se que a origem dos solos utilizados para o desenvolvimento das equações é fator influenciador na eficiência: modelos aplicados a solos com características pedológicas semelhantes aos utilizados na sua criação tendem a obter melhores resultados.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Predição. Granulometria.

Abstract: Soil hydraulic properties are often difficult to acquire and require considerable time and financial resources. In this context, the Pedotransfer Functions (PTF) are equations that, through mathematical models, predict soil properties based on their composition data. In this paper, a PTF was developed for the estimation of volumetric saturated water content on a database of 84 soil samples representative of Brazil. For its evaluation, the proposed equation was compared with seven other PTF, and in the end it was the most efficient for the case studied, since it obtained the best overall performance in the four statistical parameters applied. It was verified that the origin of the soils used for the development of the equations is an influencing factor in the efficiency: models applied to soils with pedological characteristics similar to those used in their creation tend to obtain better results.

Palavras-chave: Water resources. Prediction. Granulometry.

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do interesse pela gestão do meio ambiente há o crescimento de pesquisa da umidade do solo. Os avanços nas formas de amostragem do solo e nas análises das suas propriedades físicas necessitam de uma base de dados que

¹ Universidade de Pernambuco (UPE) / Escola Politécnica de Pernambuco (Poli), Recife, PE. E-mails: (lorenavilabc@gmail.com, was@poli.br)

inclua propriedades hidráulicas, porém, essas características tem seu processo de obtenção bastante dispendioso (PATIL e SINGH, 2016). Como medida para reverter esse obstáculo foram criadas as Funções Hidropedológicas (FHP), termo introduzido por Bouma (1989) para definir as equações que relacionam retenção de umidade ou condutividade hidráulica com propriedades de obtenção mais fácil. Oliveira et al. (2002) relatam que atualmente essa terminologia tem um sentido mais amplo e é empregada para designar funções que estimam características do solo de obtenção mais difícil a partir de outras de aquisição mais corriqueira e barata.

Ao longo das últimas décadas as FHP foram mais aplicadas para solos de clima temperado e pouco para os de clima tropical. Minasny e Hartemink (2011) ressaltam que a grande escassez de medições de propriedades em muitos países tropicais faz com que as informações dos solos não estejam disponíveis em escala regional, o que leva muitos pesquisadores a encontrarem dados inadequados para o desenvolvimento dos seus trabalhos. No caso do Brasil, esse fato é observado por Michelin et al. (2010) que ressaltam que essa realidade é decorrente da falta de um banco de dados consistente dos diferentes tipos de solos encontrados em todo o território nacional. Van den Berg et al. (1997) e Tomasella, Hodnett e Rossato (2000) podem ser exemplificados como uns dos trabalhos iniciais de referência que utilizaram FHP para estimar parâmetros hidráulicos de solos brasileiros.

A umidade saturada volumétrica é propriedade do solo importante em diversas áreas. Para a Engenharia Civil saber a umidade do solo é de suma importância para a definição da composição e da estrutura dos elementos enterrados e também para as atividades sob os terrenos, como a compactação, onde em solos saturados tende a ser mal sucedida, devido ao fato de que o excesso de água absorve grande parte da energia empregada, ocasionando, assim, o não agrupamento ideal dos grãos (CANCIA, 2013). Para a agricultura a umidade saturada do solo é uma propriedade hídrica determinante para a escolha dos cultivos mais adequados, um solo saturado não é o mais propício para o crescimento de plantas, pois pode afetar a oferta de oxigênio no solo, essencial para a respiração das raízes (LACERDA, 2007).

Para Rossato, Alvalá e Tomasella (2004) a umidade do solo constitui-se em um das variáveis mais importantes para estudos de infiltração, drenagem, condutividade hidráulica e irrigação. A umidade do solo possui grande variabilidade no espaço e no tempo, já que sofre interferência de diversos processos estáticos e dinâmicos e do regime das chuvas. Sendo, portanto, influenciadora no balanço hídrico de uma bacia

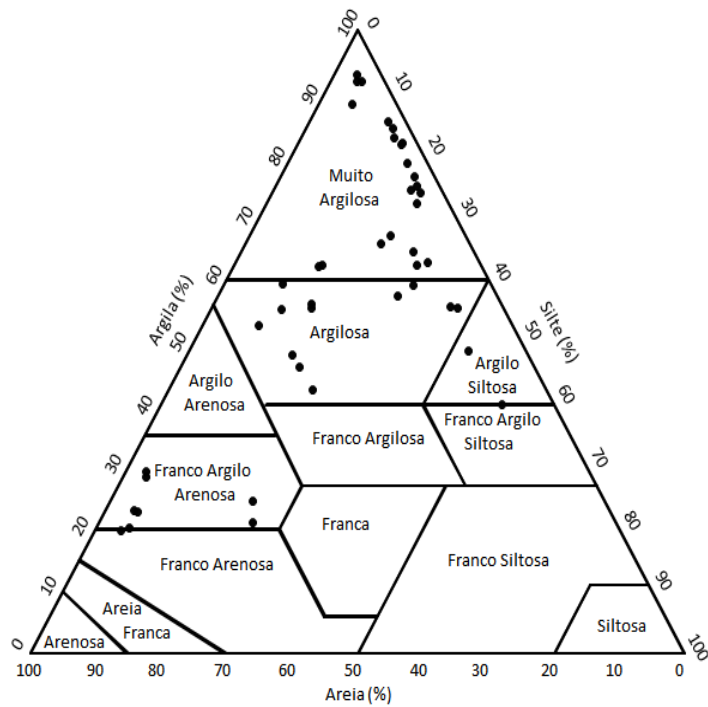
hidrográfica, onde solos saturados tem a tendência de gerar escoamento superficial logo no início das precipitações, já que não haverá grandes perdas por infiltração (MELO e MONTENEGRO, 2015). Por esse seu valor na tomada de decisões em projetos que envolvam recursos hídricos, a umidade volumétrica saturada é tema de muitos estudos, como, por exemplo, o de Rodrigues e Maia (2011) que utilizaram Funções Hidropedológicas para estimar a umidade saturada do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho, Distrito Federal, Brasil, a partir de amostras retiradas de três profundidades de solo, utilizando o método de regressão múltipla para a obtenção da FHP.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficácia de uma Função Hidropedológica proposta para estimar a umidade volumétrica saturada, utilizando propriedades pedológicas do território brasileiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da Função Hidropedológica foram utilizados dados de 84 amostras de solos brasileiros disponíveis na base de dados global *Soil Data Task* (TEMPEL et al. 1996). Série de dados essa que contém os valores em porcentagem de areia, argila, silte e matéria orgânica, dentre outras, além da densidade e os valores medidos das umidades gravimétricas saturadas. Na Figura 1 pode-se observar a distribuição das séries de dados no triângulo de classificação textural.

Figura 1 - Triângulo da classificação textural do conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento da FHP



Para a obtenção da umidade volumétrica saturada uma conversão dos valores das umidades medidas do banco de dados precisou ser realizada e pode ser observada na Equação 01.

$$\theta_s = \theta_{sg} \cdot \frac{BD}{D_a} \quad (1)$$

Sendo θ_s a umidade volumétrica saturada, θ_{sg} a umidade gravimétrica saturada, BD a densidade do solo e D_a a densidade da água.

2.1 Modelo Proposto (MP)

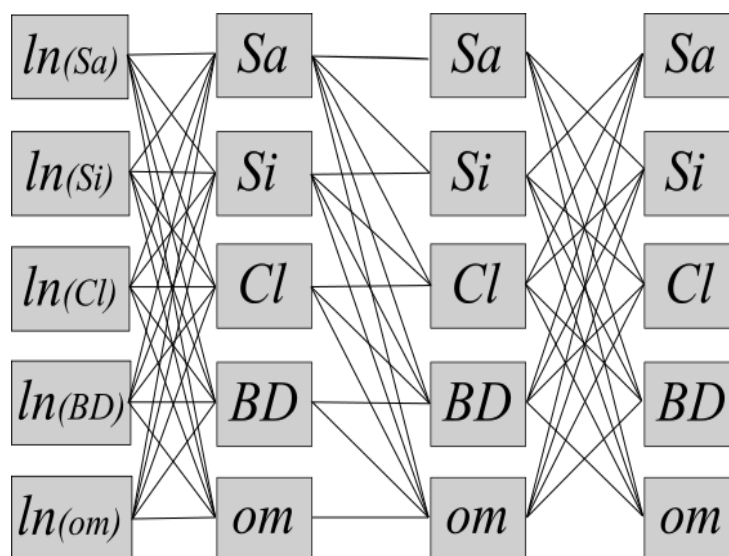
Utilizou-se cinco propriedades básicas do solo (areia, argila, silte, matéria orgânica e densidade) e suas combinações, além dos logaritmos de cada uma, para compor diferentes FHP (Figura 2), utilizando a técnica da análise de regressão múlti-

pla. Os critérios utilizados para a escolha do melhor conjunto de interações que justificavam os valores das umidades medidas foram o de R^2 ajustado (Equação 2), que mede a proporção da variação que pode ser explicada pelos modelos de regressão (Li et al., 2007), além do valor-p.

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \left[\frac{N - 1}{N - M - 1} \right] \quad (2)$$

Sendo N o número de observações, M o número de variáveis independente na FHP e R^2 o coeficiente de determinação.

Figura 02 - Esquema das combinações analisadas para a proposição da FHP



Após análises, a melhor equação encontrada para a predição da umidade volumétrica saturada depende dos teores de argila (Cl) e areia (Sa) e da densidade do solo (BD), como apresentada abaixo (Equação 3):

$$\theta_s = -1.15 \cdot 10^{-3} \cdot Cl - 0.31209 \cdot BD^2 + 0.990718 \cdot BD - 0.00158 \cdot Sa \cdot BD \quad (3)$$

Para avaliação da eficiência do MP outras Funções Hidropedológicas que estimam a umidade volumétrica saturada foram empregadas para o mesmo conjunto de banco de dados.

2.2 Modelos existentes na literatura

Neste estudo, considerou-se as diferentes Funções Hidropedológicas de Vereecken et al. (1989), Nemes, Wösten e Lilly (2001), Ghorbani e Homae (2004), Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004), Barros et al. (2013) e Medrado e Lima (2014), onde foram avaliadas a acurácia na estimativa da umidade volumétrica saturada do solo. Elas são descritas da seguinte forma:

2.2.1 Vereecken (Modelo VE)

A FHP desenvolvida por Vereecken et al. (1989) para estimar a θ_s baseia-se em um conjunto de dados de 182 solos belgas.

$$\theta_s = 0.81 - 0,283 BD + 1 \cdot 10^{-3} Cl \quad (4)$$

2.2.2 Nemes (Modelo NE)

Utilizando 5500 horizontes de solo europeus, de onze diferentes classes texturais, Nemes, Wösten e Lilly (2001) desenvolveram a seguinte FHP para estimar a umidade volumétrica saturada:

$$\begin{aligned} \theta_s = & 0.7919 + 0.001691 \cdot Cl - 0.29619 \cdot BD - 0.000001491 \cdot Si^2 + \\ & 0.0000821 \cdot om^2 + 0.02427 \cdot Cl^{-1} + 0.01113 \cdot Si^{-1} + 0.01472 \cdot \\ & \ln(Si) - 0.0000733 \cdot om \cdot Cl - 0.000619 \cdot BD \cdot Cl - 0.001183 \cdot BD \cdot \\ & om - 0.0001664 \cdot topsoil \cdot Si \end{aligned} \quad (5)$$

Sendo *topsoil* o valor 1 para o topo do solo e 0 para o subsolo.

2.2.3 Ghorbani e Homae (Modelo GH)

Ghorbani e Homae (2004) desenvolveram a equação a seguir para a umidade volumétrica saturada a partir de 34 amostras de solos europeus escolhidas aleatoriamente:

$$\theta_s = 0.933 - 7.07 \cdot 10^{-4} Sa - 0.311 \quad (6)$$

2.2.4 Rajkai (Modelo RK)

Usando um banco de dados de solos da Hungria, com 80 perfis de solo Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) desenvolveram duas FHP para estimar a umidade volumétrica saturada:

Modelo RK1

$$\theta_s = 0.01(118.76 - 60.02 \cdot BD - 0.25 \cdot om - 7 \cdot 10^{-4} Cl^2 - 1.99 \ln(Cl) + 9.78 BD^2 - 0.04 \cdot BD \cdot Sa + 0.116 \cdot Sa \cdot Si^{-1} + 7.8 \cdot 10^{-4} \cdot BD^2 \cdot Cl^2) \quad (7)$$

Modelo RK2

$$\theta_s = 0.01 (123.76 - 65.37 \cdot BD - 0.28 \cdot om - 4,8 \cdot 10^{-5} Cl^2 - 1,99 \ln(Cl) + 12.46 \cdot BD^2 - 0.054 \cdot D \cdot Sa + 0.14 \cdot Sa \cdot Si^{-1} + 4.9 \cdot 10^{-4} BD^2 \cdot Cl^2) \quad (8)$$

Sendo *om* o conteúdo de matéria orgânica e *Si* a porcentagem de silte.

2.2.5 Barros (Modelo BR)

Barros et al. (2013) desenvolveram uma FHP para a umidade volumétrica saturada a partir de um conjunto de 786 amostras de dados dos solos representativos do Nordeste brasileiro.

$$\theta_s = 0.5526 - 0.2320 \cdot Sa - 0.1178 \cdot Cl \quad (9)$$

2.2.6 Medrado e Lima (Modelo LM)

Medrado e Lima (2014) criaram um banco de dados para o cerrado brasileiro de um total de 413 locais e desenvolveram uma FHP para a umidade volumétrica saturada.

$$\theta_s = (-0.01831805 \cdot Cl^{0.89935543} - 0.01131157 \cdot Sa^{1.00134021} - 0.00684340 \cdot Si^{1.11564515} + 0,01622120 \cdot om^{0.48555009} + 2.01973831) \cdot (BD^{-1} \cdot p_b^{-1}) \quad (10)$$

Sendo p_b a densidade das partículas do solo (admitida como 2,65g/cm³ para efeito de cálculos).

A Tabela 1 demonstra uma revisão dos parâmetros de entrada necessários para as diferentes Funções Hidropedológicas utilizadas neste estudo.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada* requeridos pelas Funções Hidropedológicas estudadas

Função Hidropedológica	Cl	Si	Sa	BD	om
Modelo Proposto	Sim	Não	Sim	Sim	Não
Nemes, Wösten e Lilly (2001)	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Ghorbani e Homaei (2004)	Não	Não	Sim	Não	Não
Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) – RK1	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) – RK2	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Barros et al. (2013)	Sim	Não	Sim	Não	Não
Medrado e Lima (2014)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

* om = matéria orgânica, BD = densidade do solo, Cl = argila, Si = silte, Sa = areia

2.3 Avaliação do modelo

Para a análise do desempenho das FHP foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos: o erro quadrático médio (EQM), a eficiência de modelagem (EM), o coeficiente de massa residual (CMR) e a razão dos desvios (RD), cujos valores ótimos são 0, 1, 0 e 1, respectivamente.

$$EQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{N} \right]^{1/2} \cdot \frac{100}{\bar{M}} \quad (11)$$

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 - \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (12)$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^N M_i - \sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N M_i} \quad (13)$$

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{M})^2} \quad (14)$$

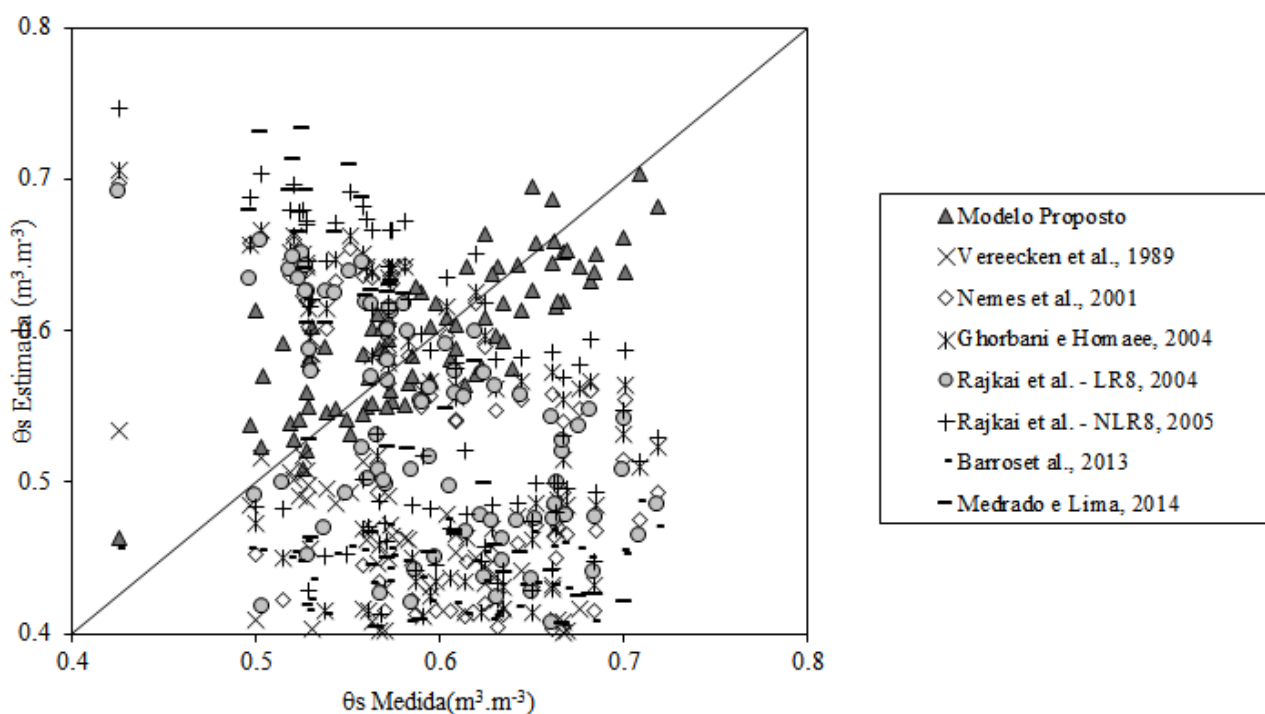
Sendo T_i os valores simulados, M_i os valores medidos, \bar{M} a média dos valores medidos e N o número de observações.

Com o intuito de classificar o desempenho das Funções Hidropedológicas estudadas, foi realizada uma linearização dos valores obtidos por cada modelo. Considerou-se os valores ideais como correspondentes a 10,0 pontos e aos mais afastados o valor de 0,0 pontos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos das umidades volumétricas medidas *versus* estimadas das oito equações analisadas foram reunidos na Figura 3. Pode-se observar que o Modelo Proposto apresentou o gráfico com distribuição e valores mais próximos da linha 1:1, o que é resultante de uma melhor correlação das umidades medidas e estimadas. As equações de Vereecken et al. (1989) e Barros et al. (2013) apresentaram gráficos semelhantes, onde quase todos os pontos ficaram abaixo da linha 1:1, o que sugere que as FHP tendem a subestimar os valores das umidades saturadas. As equações empregadas de Ghorbani e Homaei (2004), Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) RK1, Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) RK2, Medrado e Lima (2014) e Nemes, Wösten e Lilly (2001) resultaram em gráficos semelhantes, com dados dispersos em relação a linha 1:1.

Figura 03 - Umidades volumétricas saturadas estimadas *versus* medidas obtidas pelas funções hidropedológicas.



Os valores dos parâmetros estatísticos estão reunidos na Tabela 2. Observa-se que para o parâmetro EQM o Modelo Proposto apresentou o melhor resultado, seguido pelas duas FHP de Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004), com valores muito próximos entre si. A quarta posição ficou com a Ghorbani e Homae (2004). O quinto e o sexto melhor EQM ficou com os modelos de Nemes, Wösten e Lilly (2001) e de Barros et al. (2013), respectivamente. Os dois últimos foram os modelos de Verrecken et al. (1989) e de Medrado e Lima (2014).

Para o índice EM a Função Hidropedológica que apresentou melhor desempenho foi o Modelo Proposto, seguido por Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) RK1 e RK2, Ghorbani Dashtaki e Homae (2004), Nemes, Wösten e Lilly (2001), Barros et al. (2013), Vereecken et al. (1989) e Medrado e Lima (2014).

Para o parâmetro estatístico CMR o Modelo Proposto ficou em primeiro lugar, seguido por Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) RK2 e RK1, Ghorbani Dashtaki e Homae (2004), Nemes, Wösten e Lilly (2001), Medrado e Lima (2014) e por último Vereecken et al. (1989) e Barros et al. (2013) com valores iguais.

Para o quarto parâmetro analisado, RD, Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) RK1 apresentou o valor mais próximo do ótimo, seguida por Modelo Proposto, Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) RK2, Ghorbani Dashtaki e Homae (2004), Nemes,

Wösten e Lilly (2001), Barros et al. (2013) e Vereecken et al. (1989), esses dois últimos com valores iguais, e Medrado e Lima (2014).

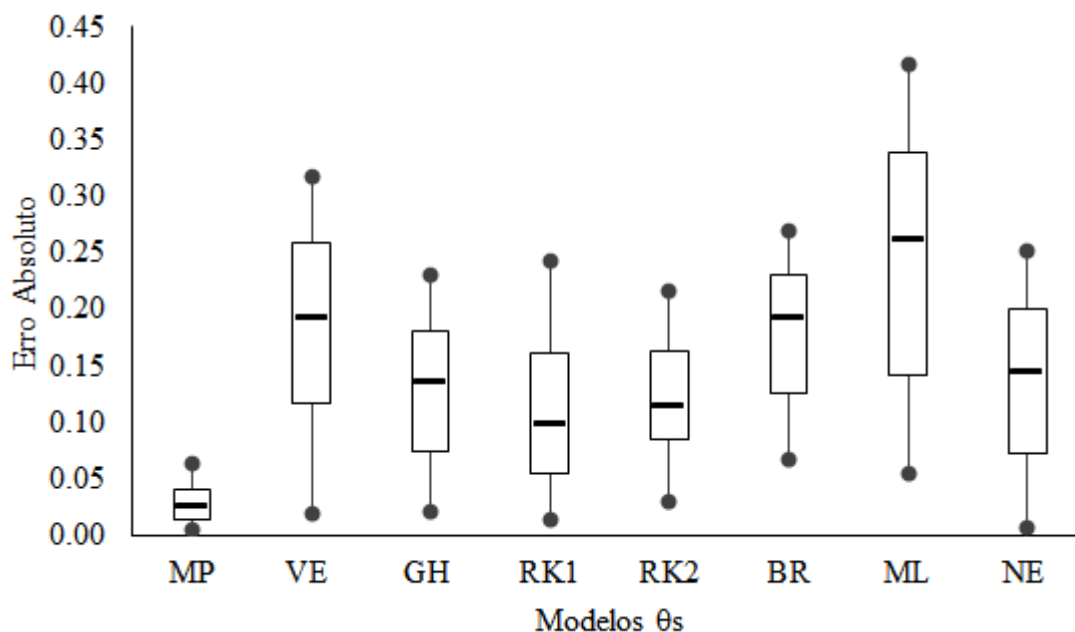
Tabela 2 - Valores dos parâmetros estatísticos, pontuação obtida e classificação das Funções Hidropedológicas

Modelo	MP	VE	NE	GH	RK1	RK2	BR	ML
EQM (%)	5.87	34.27	26.47	24.36	21.93	22.91	32.35	45.44
Pontuação	8,71	2,46	4,17	4,64	5,17	4,96	2,88	0,00
EM	0.65	-10.97	-6.14	-5.05	-3.90	-4.35	-9.67	-20.04
Pontuação	9,83	4,31	6,61	7,13	7,67	7,46	4,93	0,00
CMR	0.00	0.30	0.15	0.12	0.10	0.07	0.30	0.29
Pontuação	10,00	0,10	5,16	6,09	6,61	7,56	0,00	0,31
RD	1.65	0.10	0.20	0.25	0.38	0.33	0.10	0.06
Pontuação	3,15	0,44	1,49	2,03	3,45	2,84	0,46	0,00
Total	31,69	7,30	17,42	19,89	22,91	22,81	8,27	0,31
Posição	1 ^a	7 ^a	5 ^a	4 ^a	2 ^a	3 ^a	6 ^a	8 ^a

Após essas análises, foram somadas as pontuações de cada posição nos quatro parâmetros estatísticos, gerando os seguintes totais: Modelo Proposto – 31,69 pontos; Vereecken et al. (1989) – 7,30 pontos; Ghorbani e Homaei (2004) – 19,89 pontos, Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) RK1 – 22,91 pontos, Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) RK2 – 22,81 pontos, Barros et al. (2013) – 8,27 pontos; Medrado e Lima (2014) – 0,31 pontos; Nemes, Wösten e Lilly (2001) – 17,42 pontos. Com isso, foi possível realizar uma classificação dos modelos estudados.

Na Figura 4 estão expostos os diagramas de caixa dos erros absolutos encontrados entre os valores medidos e estimados por cada modelo. Pode-se observar que as variabilidades acompanham os resultados dos parâmetros estatísticos. Quanto menor a variabilidade do erro, melhor é o desempenho do modelo. Para o Modelo Proposto, que obteve o melhor desempenho a partir dos parâmetros estatístico, os erros chegam a valores um pouco superior a $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Já para o Modelo Proposto por Medrado e Lima (2014), os erros variaram entre $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ a quase $0,45 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, com uma vasta variabilidade.

Figura 4 - Diagrama de caixa dos erros nas estimativas das umidades volumétricas saturadas



Segundo Tomasella e Hodnett (2004), os fatores importantes para o desempenho de uma FHP são as características pedológicas dos solos que foram utilizados para o desenvolvimento das suas equações, pois as diferenças entre esses e os solos que se queiram estimar propriedades podem ser a causa do baixo desempenho de um determinado modelo. Eles relatam que essa pode ser a causa da tendência de Funções Hidropedológicas modeladas sobre solos de clima temperado serem mal sucedidas quando aplicadas para solos de clima tropical. E essa característica é observada no presente estudo. O Modelo Proposto foi desenvolvido a partir de dados representativos de todo o território brasileiro, Barros et al. (2013) utilizaram solos do Nordeste do Brasil, Medrado e Lima (2014) solos da conhecida savana brasileira, Ghorbani Dashtaki e Homae (2004) solos europeus, Rajkai, Kabo e Van Genuchten (2004) solos húngaros e Vereecken et al. (1989) solos da Bélgica. Assim, quando aplicados dados medidos de solos do Brasil, FHP originadas de um banco de dados da mesma região climática apresentaram melhores resultados do que a originada em solos de clima temperado e a que ficou na primeira colocação foi justamente a que não se ateve a apenas um microclima do país e sim a todo o território nacional.

4 CONCLUSÕES

Os teores de argila e areia e a densidade do solo foram identificados como com-

ponentes significativos para a nova FHP estimar a umidade volumétrica do solo. O Modelo Proposto demonstrou um ótimo desempenho na estimativa da umidade volumétrica saturada para solos brasileiros, ficando na primeira posição em relação aos aspectos comparativos com as demais FHP estudadas no artigo.

A nova FHP teve alta capacidade preditiva, com erros absolutos inferiores a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Quando os valores previstos foram comparados com os valores determinados por outras FHP existentes na literatura, a nova FHP resultou em maiores EM e RD e menores EQM e CMR, e apresentou uma variabilidade baixa.

Dessa forma, o Modelo Proposto pode ser uma ferramenta utilizada em estudos onde a umidade saturada é necessária, e serve de ampliação para o campo das Funções Hidropedológicas desenvolvidas para regiões de clima tropical.

REFERÊNCIAS

- BARROS, A. H. C.; LIER Q. J. V.; MAIA, A. H. N.; SCARPARE, F. V. Pedotransfer functions to estimate water retention parameters of soils in northeastern. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.3 7, p.379-391, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200009>
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land valuation. **Advances in Soil Science**, v. 9, 1989, p.177–213. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4
- CANCIAN, M. A. **Influência do teor de umidade, porosidade e do tempo de aplicação na mistura solo cimento para pavimento rodoviário de um solo da Bacia do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo, Londrina, Paraná, 2013. 201p.
- GHORBANI, S.; D.; HOMAEE, M. Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions. In: Nicole Whrle and Maik Scheurer (Eds.). 2004. **EuroSoil 2004**. 10:30(1-10). International Conference, September 4-12, Freiburg, Germany. 1999.
- LACERDA, C. F. **Relações solo-água-plantas em ambientes naturais e agrícolas do nordeste brasileiro**. Recife: Universidade Rural de Pernambuco, 2007. 78 p.
- LI, Y.; CHEN, D.; WHITE, R. E.; ZHU, A.; ZHANG, J. Estimating soil hydraulic properties of Fengqiu County soils in the North China Plain using pedo-transfer functions. **Geoderma**, v.138, p.261-271, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.11.018>
- MEDRADO, E.; LIMA, J. E.F. M. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of Brazilian savanna. **Goderma Regional** 1, p. 55-66, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.08.003>
- MELO, R. O.; MONTENEGRO, A. A. A. Dinâmica temporal da umidade do solo de uma bacia hidrográfica no semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n.2, p. 430-441, 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p430-441>
- MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio

Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p.848-853, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000055>

MINASNY, B.; HARTEMINK, A. E. Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews**, v. 106, p. 52-62, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.005>

NEMES, A.; WÖSTEN, J. H. M.; LILLY, A. Development of Soil Hydraulic Pedotransfer Functions on a European scale: Their Usefulness in the Assessment of Soil Quality. Pages 541-549. In: D.E. STOTT, R.H. MOHTAR AND G.C. STEINHARDT (eds). **Sustaining the Global Farm**. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V.; MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 26, n. 26, p.315-323, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200004>

PATIL, N. G.; SINGH, S. K. Pedotransfer Functions for Estimating Soil Hydraulic Properties: A Review. **Pedosphere**, v. 26, n. 4, p. 417-430, 2016. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60054-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60054-6)

RAJKAI, K.; KABO, S.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. **Soil & Tillage Research**, v.79, p.145–152, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.003>

RODRIGUES, L. N.; MAIA, A. H. Funções de Pedotransferência para estimar a condutividade hidráulica saturada e as umidades de saturação e residual do solo em uma bacia hidrográfica do cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Alagoas. **Anais...** Maceió: ABRH, 2011. Artigos, p.1-12.

ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; TOMASELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: Análise das condições médias para o período de 1971-1990. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.2, p.113-122., 2004.

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**, v. 64, p.327–338, 2000. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641327x>

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. Pedotransfer functions for tropical soils. **Geoderma**, v.30, p.415-429, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(04\)30021-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)30021-8)

TEMPEL P; BATJES N; VAN ENGELEN. V, IGBP-DIS. Soil data set for pedotransfer function development (**International Soil Reference and Information Centre**: Wageningen, The Netherlands, 1996). Disponível em: <https://www.isric.org/documents/document-type/isric-report-199605-igbp-dis-data-set-pedotransfer-function-development>. Acesso em: 19 set. 2017.

VAN DEN BERG, M.; KLAMT, E.; VAN REEUWIJK, L. P.; SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v. 78, p.161-180, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00045-1)

VERECKEN, H., FEYEN, J., MAES, J., DARIUS, P. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. **Soil Sci.**, v.148, p.389–403, 1989. <https://doi.org/10.1097/00010694-198912000-00001>