

## XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

### **USO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO NA OBTENÇÃO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DE SOLOS BRASILEIROS**

*Marco Aurélio Calixto Ribeiro de Holanda<sup>1\*</sup>; Diogo Botelho Correa de Oliveira<sup>1</sup>; Camila Barrêto Rique de Barros<sup>1</sup>; Ariela Rocha Cavalcanti<sup>1</sup> & Willames de Albuquerque Soares<sup>2</sup>;*

**RESUMO** – A condutividade hidráulica saturada,  $K_s$ , é um parâmetro hidrodinâmico importante para qualquer estudo de infiltração de água no solo. Deste modo, estimar seu valor de forma rápida, confiável e econômica é de fundamental importância. Sendo assim, objetivou-se realizar ajustes em funções de pedotransferência (FPTs) preexistentes, por meio do uso de regressões, para a obtenção dos valores de  $K_s$ . Para isso, foram escolhidas 10 FPTs de diferentes autores e utilizou-se como parâmetros de comparação os valores do Coeficiente de Determinação Ajustado,  $R^2_{ajus}$ , e do Erro Padrão. Os valores de  $R^2_{ajus}$  para a FPT proposta por Wösten *et al.* (1999) foram os maiores dentre todas as 10 FPTs testadas, chegando a 41 e 42% para os solos arenosos e argilosos respectivamente. Já as funções propostas por Cosby *et al.* (1984) e Campbell (1985) apresentaram os percentuais mais baixos, chegando a 1%. Apesar dos valores de  $R^2_{ajus}$  estarem abaixo de 42%, o resultado obtido não implica que o uso da FPT foi uma escolha incorreta, uma vez que elas não levam em consideração parâmetros geomorfológicos dos solos. Sendo assim, FPTs que utilizem alguma informação relacionada a textura ou ao arranjo dos poros no solo tendem a apresentarem resultados mais expressivos.

**ABSTRACT**– Saturated hydraulic conductivity,  $K_s$ , is an important hydrodynamic parameter for any study of water infiltration into the soil. Therefore, estimating its value quickly, reliably and economically have fundamental importance. Thus, the objective was to make adjustments to pre-existing pedotransfer functions (PTFs), through the use of regressions, to obtain the  $K_s$  values. For this, 10 PTFs from different authors were chosen and the Adjusted Determination Coefficient,  $R^2_{ajus}$ , and Standard Error values were used as comparison parameters.  $R^2_{ajus}$  values for the PTF proposed by Wösten *et al.* (1999) were the highest among all 10 PTFs tested, reaching 41 and 42% for sandy and clay soils, respectively. The functions proposed by Cosby *et al.* (1984) and Campbell (1985) had the lowest percentages, reaching 1%. Although the values of  $R^2_{ajus}$  are below 42%, the result obtained does not imply that the use of PTF was an incorrect choice, since they do not take into account soil geomorphological parameters. Therefore, PTFs that use some information related to the texture or the arrangement of the pores in the soil tend to present more expressive results.

**Palavras-Chave** – condutividade hidráulica saturada, HYBRAS, solos brasileiros

1) Afiliação: Discentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco, Rua Benfica, 455, Recife-PE - CEP: 50.720-001, macrh\_pec@poli.br\*(autor correspondente), dbco\_pec@poli.br, cbrb\_pec@poli.br; arc\_pec@poli.br

2) Afiliação: Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco, Rua Benfica, 455, Recife-PE - CEP: 50.720-001, was@poli.br

## 1 - INTRODUÇÃO

Diversas técnicas podem ser utilizadas para estimar as propriedades hidráulicas do solo, como a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), incluindo ensaios de campo e laboratório, os quais podem ser complexos pois dependem de fatores importantes para a realização, como materiais adequados e específicos, tempo e experiência, o que acaba sendo oneroso (Di Prima, *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2008). Entretanto, estes métodos de determinação destas propriedades são considerados de difícil obtenção, e por isso tem-se buscado maneiras de se determinar estes parâmetros de modo a se reduzir os custos e minimizar o tempo (Michelon *et al.*, 2010).

Sendo assim, Pequeno *et al.* (2018) destacam que a utilização de modelos matemáticos para estimar propriedades físicas do solo tem sido amplamente empregados nas ciências edáficas, obtendo informações, normalmente difíceis de se determinar em campo ou laboratório. Essas expressões são chamadas de funções de pedotransferência (FPT) e são comumente utilizadas como uma alternativa para estimar as propriedades hidrodinâmicas do solo, de forma mais fácil e com custos mais baixos.

Klein *et al.* (2015) mostraram que o uso destas FPTs na estimativa da condutividade hidráulica saturada, tem sido uma alternativa simples. Porém a confiabilidade das estimativas destes parâmetros depende integralmente das variáveis utilizadas na montagem das funções de pedotransferência testadas. Para avaliar a confiabilidade dos valores de  $K_s$  estimados, Rodrigues e Maia (2011) utilizaram o coeficiente de determinação como parâmetro.

As FPT são comumente utilizadas para determinação de parâmetros físicos do solo como a condutividade hidráulica saturada e a curva de retenção de água no solo. Os fatores que mais afetam a estimativa destes parâmetros são a umidade, a porosidade e a densidade do solo (Silva *et al.*, 2008). Entretanto, Saxton *et al.* (1986), Vereecken *et al.* (1990) e Wösten *et al.* (1999) enunciaram que os percentuais de carbono orgânico, areia, silte e argila também influenciam nas estimativas.

Nemes *et al.* (2009) mostraram que funções de pedotransferências específicas para uma certa localidade não devem ser extrapoladas para qualquer outra área de estudo, pois há a possibilidade de se aumentar os erros associados a predição dos parâmetros hidrodinâmicos do solo. Além disso, Dashtaki *et al.* (2010) também mostraram que quanto maior for a similaridade entre as classes texturais dos solos estudados, melhor será o desempenho obtido com as FPTs.

Deste modo, pretende-se utilizar a regressão para propor ajustes em funções de pedotransferência preexistentes, as quais são utilizadas na estimativa da condutividade hidráulica saturada de solos, mediante o uso de outras informações como os percentuais de areia, silte, argila

carbono orgânico, densidade aparente do solo, umidade volumétrica saturada e porosidade, visando a adequação delas aos solos brasileiros.

## 2 - METODOLOGIA

As informações utilizadas neste estudo foram obtidas a partir do banco de dados hidrofísicos de solos brasileiros, Hydrophysical Database for Brazilians Soils (HYBRAS) (Ottoni *et al.*, 2018), o qual foi criado pelo Serviço geológico do Brasil. O banco conta com aproximadamente 1075 amostras, das quais foram utilizadas apenas 419, uma vez que apenas estas possuem valores para a condutividade hidráulica saturada,  $K_s$ , densidade aparente, umidade saturada,  $\theta_s$  e para a composição granulométrica (percentuais de areia, silte e argila).

Dentre as propriedades hidrodinâmicas das amostras dos solos, presentes no banco de dados do HYBRAS, foram utilizadas a composição granulométrica, ou seja, os percentuais de areia, silte e argila, a densidade aparente do solo, os percentuais de carbono orgânico, a umidade do solo saturado, e a condutividade hidráulica saturada, os quais possuem valores máximos e mínimos representados na Figura 1.

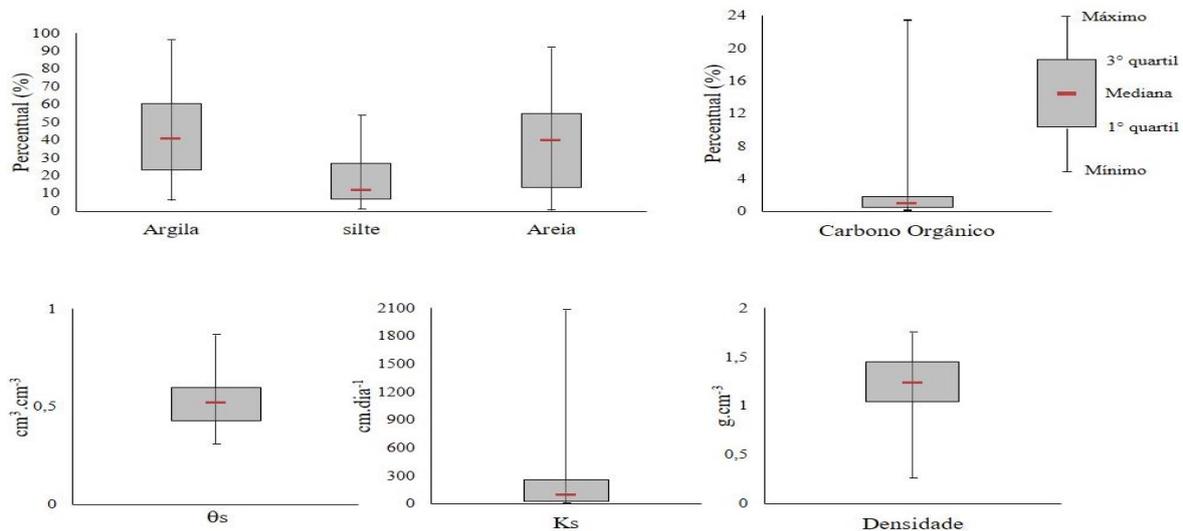


Figura 1 – Gráfico de caixa dos parâmetros hidrodinâmicos das 419 amostras de solos

Para estas variáveis, foram realizadas as análises da covariância, da correlação, a montagem dos gráficos de dispersão entre cada uma das variáveis independentes e a condutividade hidráulica saturada (variável independente) e a regressão múltipla ou simples, dependendo da necessidade de

cada variável dependente. Caso seja necessário, a exclusão de alguma variável independente deve ser feita mediante a análise dos valores de Variance Inflation Factor (VIF), Equação 1. Neste caso, o critério de exclusão utilizado foi o *VIF* maior que 10. No caso das regressões múltiplas, foram utilizadas as funções de pedotransferência propostas por: Campbell (1985), Cosby *et al.* (1984), Cosby *et al.* (Modificado) (1984), Brakensiek *et al.* (1984), Wösten (1997) para solos arenosos e argilosos, Wösten *et al.* (1999), Saxton *et al.* (1986), Vereecken *et al.* (1990) e Rawls e Brakensiek (1989), Equações 2-11, respectivamente.

$$VIF = \frac{1}{1-R^2} \quad (1)$$

$$K_S = x_1 * e^{-x_2(S+A)} \quad (2)$$

$$K_S = x_3 * 10^{-x_4+x_5A-x_6C} \quad (3)$$

$$K_S = x_3 * 10^{-x_4+x_5A-x_6C+D} \quad (4)$$

$$K_S = x_7 * \quad (5)$$

$$e^{x_8\theta_s-x_9-x_{10}C+x_{11}A^2-x_{12}C^2-x_{13}\theta_s^2+x_{14}A*\theta_s-x_{15}A^2*\theta_s^2-x_{16}C^2*\theta_s^2+x_{17}A^2*C+x_{18}C^2*\theta_s+x_{19}A^2*\theta_s-x_{20}C^2*S} \quad (5)$$

$$K_S = x_{21} * e^{x_{22}-x_{23}D^2-x_{25}CO+x_{26}CO^2-x_{27}\ln(CA)} \quad (6)$$

$$K_S = x_{21} * e^{-x_{28}D-x_{29}D^2-x_{30}CO+x_{31}CO^2+x_{32}\ln(CO)-x_{33}C*CO-x_{34}D*CO} \quad (7)$$

$$K_S = x_{21} * \quad (8)$$

$$e^{x_{35}+x_{36}S+x_{37}topsoil-x_{38}D^2-x_{39}C^2-x_{40}S^2+x_{41}S^{-1}-x_{42}CO^{-1}-x_{43}\ln(S)-x_{44}D*C-x_{45}D.CO+x_{46}topsoil*C-x_{47}topsoil*S} \quad (8)$$

$$K_S = x_7 * e^{x_{48}-x_{49}S+\frac{-x_{50}+x_{51}S-x_{52}C+x_{53}C^2}{\theta_s}} \quad (9)$$

$$K_S = x_{21} * e^{x_{54}-x_{55}\ln(C)-x_{56}\ln(S)-x_{57}\ln(CO)-x_{58}D} \quad (10)$$

$$K_S = e^{x_8P-x_9-x_{10}C+x_{11}-x_{12}C^2-x_{13}P^2+x_{14}P*C-x_{15}P^2*S^2-x_{16}P^2*C^2+x_{17}S^2*C+x_{18}P*C^2+x_{19}P*S^2-x_{20}C^2*S} \quad (11)$$

Onde *A*, *S* e *C*, representam respectivamente os percentuais de areia, silte e argila, *CO* o percentual de carbono orgânico, *D* é a densidade aparente do solo em g.cm<sup>-3</sup>, *CA* é a soma entre os percentuais de areia e argila, *topsoil* é uma constante unitária ou nula caso a amostra seja superficial ou subsuperficial, respectivamente, *P* representa a porosidade e *x<sub>1</sub>* - *x<sub>58</sub>* são constantes.

Para a realização da regressão múltipla destas funções de pedotransferência, utilizou-se o software M.S. Excel. Estas funções de pedotransferência foram analisadas para solos: i) apenas arenosos, ii) apenas argilosos e iii) para todos os tipos de solos em conjunto, com exceção da FPT de Wösten (1997) a qual não pode ser utilizada para a combinação de todos os solos. Neste caso, foram analisados o Erro Padrão e o R<sup>2</sup><sub>ajust</sub>, respectivamente Equações 12 e 13, como critérios de análise.

$$Erro\ Padrão = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

$$R_{ajust}^2 = 1 - \left( \frac{n-1}{n-(k+1)} \right) (1 - R^2) \quad (13)$$

Onde,  $n$  representa o tamanho da amostra,  $\sigma$  o desvio padrão e  $k$  o grau de liberdade. Para estas análises, foi adotado um nível de significância de 5%, logo quanto mais próximos de 0,95 estiverem os valores de  $R^2_{\text{ajust}}$  melhor foi o desempenho da FPT. Contudo, valores acima de 56% serão muito bem apreciados, pois alguns autores como Dalbianco *et al.* (2008) obtiveram valores inferiores a este e ainda assim foram considerados bons resultados.

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises de covariância e da correlação, Tabelas 1 e 2, mostraram que as variáveis independentes não se correlacionam muito bem com a variável dependente, de modo que uma única variável independente pudesse ser utilizada para expressar o  $K_s$ . Isso fica claro quando se analisa, por exemplo, a covariância e a correlação entre o  $K_s$  e o percentual de areia, onde o valor da covariância foi o maior dentre todas as variáveis testadas (2619,98), porém a correlação entre elas foi baixa (0,32), uma vez que o maior valor que se pode obter é um.

Além disso o valor da correlação, entre a condutividade hidráulica saturada e o percentual de areia, é o maior dentre todos os obtidos e por isso a correlação não foi satisfatória, uma vez que foi bem inferior aos 95%. Deste modo, não é possível se utilizar apenas os percentuais de areia ou de qualquer de qualquer outra variável para justificar o uso de uma regressão simples. Ou seja, os baixos valores do coeficiente de correlação mostram que é necessário a realização de uma regressão múltipla para avaliar a sinergia destas variáveis na previsão dos valores de  $K_s$ .

Tabela 1 – Valores de covariância entre as variáveis

	Argila	Silte	Areia	C. Orgânico	$\theta_s$	Densidade	$K_s$
Argila	564,30						
Silte	-15,01	193,73					
Areia	-549,28	-178,72	728,00				
C. Orgânico	-9,60	14,97	-5,37	8,06			
$\theta_s$	1,26	0,88	-2,14	0,18	0,01		
Densidade	-3,28	-1,81	5,09	-0,52	-0,03	0,08	
$K_s$	-2824,58	204,60	2619,98	56,71	-3,43	13,08	91575,10

Tabela 2 – Valores de correlação entre as variáveis

R	Argila	Silte	Areia	C. Orgânico	$\theta_s$	Densidade	$K_s$
Argila	1,00						
Silte	-0,04	1,00					
Areia	-0,86	-0,48	1,00				
C. Orgânico	-0,14	0,38	-0,07	1,00			
$\theta_s$	0,47	0,56	-0,71	0,58	1,00		
Densidade	-0,48	-0,45	0,65	-0,63	0,94	1,00	
$K_s$	-0,39	0,05	0,32	0,07	0,10	0,15	1,00

Além disso, foram calculados os valores de  $R^2$  e VIF presentes nas Tabelas 3 e 4. Como os valores dos coeficientes de determinação entre as variáveis independente e o  $K_s$  não chegam a 0,95, bem como pode ser observado Tabela 3, infere-se que não é possível deixar de utilizar uma das variáveis independentes. Entretanto como o valor do  $R^2$  entre a densidade e  $\theta_s$ , por exemplo, é alto (mesmo que não chegue a 0,95), não se faz necessário o uso de ambas as variáveis, sendo possível deixar de utilizar uma delas. Tal fato é evidenciado nas funções de pedotransferência apresentadas, Equações 2-11, onde nenhuma delas faz o uso simultâneo da densidade e do  $\theta_s$ .

Entretanto, é possível decidir pela exclusão de alguma variável independente mediante os valores do VIF. Esta exclusão aumenta a confiabilidade dos valores estimados de condutividade hidráulica saturada, a qual diminui com a multicolinearidade das variáveis (Araujo *et al.*, 2011).

Tabela 3 –Valores do coeficiente de determinação entre as variáveis

$R^2$	Argila	Silte	Areia	C. Orgânico	$\theta_s$	Densidade	$K_s$
Argila	1,00						
Silte	0,01	1,00					
Areia	0,73	0,23	1,00				
C. Orgânico	0,02	0,14	0,01	1,00			
$\theta_s$	0,22	0,32	0,50	0,34	1,00		
Densidade	0,23	0,20	0,42	0,39	0,89	1,00	
$K_s$	0,15	0,01	0,10	0,01	0,01	0,02	1,00

Tabela 4 – Valores de Variance Inflation Factor (VIF) para as variáveis utilizadas

VIF	Argila	Silte	Areia	C. Orgânico	$\theta_s$	Densidade	$K_s$
Argila	1,00						
Silte	1,00	1,00					
Areia	3,76	1,29	1,00				
C. Orgânico	1,02	1,17	1,00	1,00			
$\theta_s$	1,29	1,47	2,01	1,51	1,00		
Densidade	1,29	1,25	1,73	1,65	8,86	1,00	
$K_s$	1,18	1,00	1,11	1,00	1,01	1,02	1,00

Por meio das Equações 2-11 foi possível realizar a regressão múltipla não linear dos dados obtidos no HYBRAS, afim de verificar o quanto as variáveis dependentes estão correlacionadas com a condutividade hidráulica saturada. Como resultado destas regressões obteve-se os valores do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajus}$ ) e do Erro Padrão, presentes na Tabela 5.

Os valores dos coeficientes de determinação ajustado, presentes na Tabela 5, estão entre 1 e 42%, o que podem ser considerados baixos. Entretanto, como a maior parte das variáveis utilizadas não estão relacionadas com o arranjo e a geometria dos poros, então era de se esperar que os valores de  $R^2_{ajus}$  não fossem altos (Klein *et al.*, 2014). Tais resultados corroboram com o que foi encontrado por Rodrigues e Maia (2011), onde os autores utilizaram os dados percentuais de areia, silte e argila, densidade e matéria orgânica para encontrar as FPT e coeficientes de determinação ajustados inferiores a 34%.

Tabela 5 – Valores de  $R^2_{ajus}$  e Erro Padrão para as diferentes FPT e texturas

Referência	Textura	$R^2_{ajus}$	Erro Padrão (m.s <sup>-1</sup> )
Wösten <i>et al.</i> (1999)	Arenosos	0,41	1,33
	Argilosos	0,42	1,31
	Todos	0,36	1,41
Wösten (1997)	Arenosos	0,30	1,45
	Argilosos	0,26	1,46
	Todos	*	*
Vereecken <i>et al.</i> (1990)	Arenosos	0,29	1,46
	Argilosos	0,05	1,46
	Todos	0,25	1,52
Saxton <i>et al.</i> (1986)	Arenosos	0,17	1,46
	Argilosos	0,18	1,25
	Todos	0,21	1,36
Rawls <i>et al.</i> (1998)	Arenosos	0,32	0,32
	Argilosos	0,15	1,60
	Todos	0,16	1,56
Brakensiek <i>et al.</i> (1984)	Arenosos	0,32	1,44
	Argilosos	0,36	1,11
	Todos	0,30	1,28
Cosby <i>et al.</i> (1984)	Arenosos	0,18	0,65
	Argilosos	0,01	0,75
	Todos	0,02	0,73
Cosby <i>et al.</i> (1984) (Modificado)	Arenosos	0,26	0,62
	Argilosos	0,01	0,75
	Todos	0,03	0,73
Campbell (1985)	Arenosos	0,18	1,49
	Argilosos	0,01	1,73
	Todos	0,02	1,67

\* A FPT proposta é exclusiva para solos arenosos ou argilosos, mas não para todos juntos.

Além disso, também é notório, mediante o uso da Tabela 5, que os valores de Erro Padrão encontrados, entre 0,32 e 1,73 m s<sup>-1</sup> não são pequenos quando comparados com os obtidos por Rodrigues e Maia (2011). Contudo, se as funções de pedotransferências utilizadas, tivessem alguma ligação com a geometria e com o arranjo dos poros, ou seja, com o formato dos grãos e com o modo como os vazios estão distribuídos dentro perfil do solo, se esperaria que os valores de correlação encontrados fossem mais robustos, (Michelon *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2015).

Além disso, observa-se que os valores de R<sup>2</sup><sub>ajus</sub> são maiores quando os solos foram separados por classe textural, principalmente para os solos arenosos, em detrimento aos valores obtidos para todos os solos, sem segregação. Isto indica uma melhor capacidade de previsão do K<sub>s</sub>, por parte das FPTs testadas, para os solos arenosos do que para os solos argilosos, ou para todo um banco de dados, sem nenhuma segregação quanto a classe textural, corroborando com o que foi enunciado por Dashtaki *et al.* (2010).

Os resultados obtidos para a função de pedotransferência de Cosby (1984) (modificada) foram superiores aos encontrados para a FPT inalterada, uma vez que a alteração resultou em valores de R<sup>2</sup> iguais a 1 e 26%, enquanto que função de pedotransferência proposta por Cosby (1984) obteve valores de R<sup>2</sup><sub>ajus</sub> iguais a 1 e 18%, para os solos argilosos e arenosos, respectivamente. Além disso, os valores de erro padrão para a função modificada, 0,62 m s<sup>-1</sup>, foi inferior ao valor apresentado pela FPT proposta 0,65 m s<sup>-1</sup>.

#### 4 - CONCLUSÕES

Os valores do coeficiente de determinação ajustados encontrados para os solos arenosos foram maiores que os valores encontrados para os solos argilosos, indicando que as equações de pedotransferência utilizadas, Equações 2-6 e Equações 8-11, se adequam melhor aos solos com esta classe textural. E os valores de erro padrão encontrados não são baixos, entre 0,32 e 1,73 m s<sup>-1</sup>.

A função de pedotransferência proposta por Wöston (1997) foi criada exclusivamente para solos arenosos ou solos siltosos ou argilosos, e por isso não há estimativas da condutividade hidráulica saturada quando se pretende analisar todas as 419 amostras de solos juntas. Além disso, os resultados obtidos para a função modificada de Cosby (1984) foram melhores que os obtidos para a FPT inalterada.

As funções de pedotransferência que tenham alguma variável independente que esteja relacionada com o arranjo ou com a geometria dos poros possuem uma maior chance de obter valores

de  $K_s$  mais confiáveis, uma vez que os coeficientes de determinação ajustados costumam ser maiores nestes casos. Entretanto, dentre as FPTs testadas a de Wöisten *et al.*, (1990) foi a que apresentou os melhores resultados, com  $R^2_{ajus}$  de 42% para solos argilosos e 41% para solos arenosos, enquanto que as FPTs de Cosby *et al.* (1984) e de Campbell (1985) apresentaram os piores resultados,  $R^2 = 1\%$  para solos argilosos e 18% para solos arenosos.

Apesar dos valores de  $R^2_{ajus}$  estarem abaixo de 42%, o resultado obtido não implica que o uso da FPT foi uma escolha incorreta, uma vez que elas não levam em consideração parâmetros geomorfológicos dos solos. Sendo assim, funções de pedotransferência que utilizem alguma informação relacionada a textura ou ao arranjo dos poros no solo tendem a apresentarem valores de correlação mais expressivos.

## REFERÊNCIAS

- ARAUJO, G. L.; REIS, E. F.; MOREIRA, G. R. (2011). “*Correlações entre variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração de referência*”. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada 5, pp. 96-104.
- BRAKENSIEK, D.L., RAWLS, W.J., STEPHENSON, G.R. (1984) “*Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils*”. American Society of Agricultural Engineering.
- CAMPBELL, G. S. (1985). *Soil physics with basic: transport models for soil plant systems*. Elsevier, Amsterdam, 150 p.
- COSBY, B.J.; HORNBERGER, G.M.; CLAPP, R.B. and GINN, T.R. (1984). “*A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils*”. Water Resources Research 20(6), pp. 682-690.
- DALBIANCO, L; REICHERT, J.M.; RODRIGUES, M. F.; WINK, C.; REINERT, D.J. (2008). “*Relações entre a condutividade hidráulica de solo saturado e atributos físicos de uma microbacia hidrográfica*” in Anais da VII Reunião Sul-brasileira de Ciência do Solo, Santa Maria, 2008, pp. 1-6.
- DASHTAKI, S. G.; HOMAEE, M.; KHODABERDILOO, H. (2010); “*Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data*”. Soil Use and Management 26(1), pp. 68-74.
- DI PRIMA, S.; LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLHO, R.; PIRASTRU, M.; CERDÀ, A.; KEESSTRA, S. (2018). “*Laboratory testing of Beerkan infiltration experiments for assessing the role of soil sealing on water infiltration*”. Catena, 167, pp. 373-384.
- KLEIN, C.; KLEIN, V. A.; LEVINSKI, F.; BORTOLANZA, D. R. (2015). “*Predição da condutividade hidráulica do solo saturado a partir de propriedades físicas do solo*”. Vivências 11, pp. 191-198.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B. ; KNIES, A. ; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. (2010). “*Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul*”. *Ciência Rural* 40, pp. 848-853.

NEMES, A.; TIMLIN, D. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. (2009). “*Evaluation of the pedotransfer functions for their applicability at the U.S. National Scale*”. *Soil Science Society of America Journal* 73(5), pp. 1638-1645.

OTTONI, M. V. T. B.; OTTONI FILHO, M. G.; SCHAAP, M. L.; LOPES-ASSAD, R. C.; ROTUNNO FILHO, O. C. (2018). “*Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention*”. *Vadose Zone Journal* 17(1), pp. 1-17.

PEQUENO, P. L. L.; FAGUNDES, F. P.; SANTOS, R. C.; SANTINI, C. L. A.; RAMBO, M. A.; SCHLINDWEIN, J. A. (2018). “*Uso de funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em um latosso no estado de Rondônia*”. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil* 14(2), pp. 229-239.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L. (1989). “*Estimation of soil water retention and hydraulic properties*”. In *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling Theory and Practice*. Org. por MOREL-SEYTOUX, H. J., Kluwer Academic Publisher, pp. 275-300.

RODRIGUES, L. N.; MAIA, A. H. N. (2011). “*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 *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió. A água no mundo em transformação, 2011*, pp. 1-12.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J. S.; PAPENDICK, R.I. (1986). “*Estimating generalized soil water characteristics from texture*”. *Soil Science Society of America Journal* 50, pp. 1031–1036.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; (2008). “*Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração*”. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32(1), pp. 1-10.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; JARAMILLO, R. A.; NETTO, A. M.; (2008). “*Caracterização hidrodinâmica de solos: aplicação do método beerkan*”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12(2), pp. 128-135.

WAGNER, B.; TARNAWSKI, V. R.; HENNINGS, V.; MULLER, U.; WESSOLEK, G.; PLAGGE, R. (2001). “*Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set*”. *Geoderma* 1(102), pp. 275-297.

VERECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J. (1990). “*Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties*”. *Soil Science* 149, pp. 1-12.

WÖSTEN, J. H. M. (1997). “*Pedotransfer functions to evaluate soil quality*”. In *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soils Science*. Org. por GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R., Elsevier, pp. 221-245.

WÖSTEN, J. H. M.; LILLY, A.; NEMES, A.; LE BAS, C. (1999). “*Development and use of a database of hydraulic properties of European soils*”. *Geoderma* 90, pp. 169-185.

ZHANG, X.; ZHU, J.; WENDROTH, O.; MATOCHA, C.; EDWARDS, D. (2019). “*Effect of macroporosity on pedotransfer function estimates at the field scale*”. *Vadose Zone* 18(1), pp. 1-15.