

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMAR A CONDUTIVIDADE HIDRAULICA SATURADA E AS UMIDADES DE SATURAÇÃO E RESIDUAL DO SOLO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DO CERRADO

Lineu Neiva Rodrigues¹ & Aline de Holanda N. Maia²

RESUMO - A condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e as umidades de saturação (Θ_s) e residual (Θ_r) são parâmetros de fundamental importância em estudos que envolvem o conhecimento da dinâmica de água no solo. Esses parâmetros apresentam, no entanto, grande variabilidade espacial, o que leva à necessidade de levantamentos mais detalhados, principalmente quando se trabalha em escala de bacia hidrográfica. As funções de pedotransferência (FPTs) têm sido utilizadas como uma alternativa para estimar esses parâmetros a partir de propriedades básicas do solo. O objetivo do presente trabalho foi desenvolver FPTs para estimar K_s , Θ_s e Θ_r em solos de uma bacia hidrográfica do Bioma Cerrado. Para isto, foram analisados dados de noventa e nove perfis de solos, com três repetições em cada uma das seguintes camadas do solo (profundidades): 0-5 cm, 15-20 cm e 55-60 cm. Foi realizada análise de regressão múltipla para obtenção de FPTs para K_s , Θ_s e Θ_r utilizando como preditores argila (ARG), silte (SLT), areia fina (AF), areia grossa (AG), matéria orgânica (MO) e densidade global (DG). A seleção de preditores em cada modelo foi feita via método *stepwise*. As PTFs ajustada apresentaram bom ajuste, com exceção para as PTFs de K_s .

ABSTRACT – Saturated hydraulic conductivity (K_s) and saturation (Θ_s) and residual (Θ_r) water content are soil parameters of crucial importance to study the dynamic of soil water. Those parameters have, however, great spatial variability and as so it is necessary to carry out detailed soil surveys, especially when performing studies in watershed. Pedotransfer functions have been used as an alternative to estimate those parameters based on basic soil properties. The objective of this study was to develop pedotransfer functions to estimate K_s , Θ_s e Θ_r in soils of a Brazilian Savannah Watershed. Ninety nine soil profiles with three replications for each depth (0-5 cm, 15-20 cm and 55-60 cm) were analyzed. Multiple regression analyses was performed to obtain FTPs to K_s , Θ_s e Θ_r , using clay (ARG), silt (SLT), fine sand (AF), coarse sand (AG), organic matter (MO) and bulk density (DG) as predictors. Stepwise method was used to select predictors in each model. PTFs showed good agreement, except to K_s .

Palavras-chave: recursos hídricos, hidrologia, modelagem.

1) Eng. Agrícola, D. Sc., Pesquisador, Bolsista do CNPq, Embrapa Cerrados / Planaltina - DF. Fone: (61) 3388-9959, lineu@cpac.embrapa.br.
2) Eng. Agrônoma, Pesquisadora, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP.

1 - INTRODUÇÃO

A falta de informações edafo-hidroclimáticas representativas das condições do Bioma Cerrado tem dificultado e, em alguns casos, comprometido a realização de estudos que visam o entendimento dos processos hidrológicos e a compreensão do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, conduzindo a resultados duvidosos, principalmente quando se realizam previsões de longo prazo, o que compromete a adequada gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas.

Em trabalhos que envolvem o conhecimento da dinâmica de água no solo é fundamental o conhecimento da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e das umidades de saturação (Θ_s) e residual (Θ_r). Esses parâmetros do solo, entretanto, apresentam grande variabilidade espacial. Além disso, a coleta de solos em campo e a sua análise em laboratório, para estimar esses parâmetros, são procedimentos caros e demorados, o que leva, em geral, a uma amostragem deficiente da área a ser estudada. Isto implica em tomada de decisões muitas vezes inadequadas, baseadas em informações altamente incertas.

Nos estudos envolvendo bacias hidrográficas é necessária uma amostragem detalhada, para representação adequada das características físico-hídricas dos seus solos. Uma alternativa é utilizar funções de pedotransferência (FPTs), as quais, utilizando dados pedológicos mínimos de obtenção simples e de custo acessível, são capazes de gerar, com certo grau de precisão, os parâmetros físico-hídricos do solo de mais difícil obtenção.

Várias funções de pedotransferência já foram desenvolvidas e descritas na literatura (Gupta e Larson, 1979; Rawls e Brakensiek, 1982; Tomasella et al., 2000), mas poucas foram desenvolvidas para a região do Cerrado, o que tem dificultado a sua aplicação de forma confiável. Visando contribuir com o aumento do conhecimento básico sobre o Bioma Cerrado, gerando informações que possam ser utilizadas em trabalhos que favoreçam o uso eficiente da água e a adequada gestão dos recursos hídricos, foi desenvolvido o presente trabalho, cujo objetivo foi obter FPTs para estimar a K_s , o Θ_s e o Θ_r em solos de uma bacia hidrográfica do Bioma Cerrado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Os dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram coletados na área da Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho, localizada na parte leste do Distrito Federal. O Rio Buriti Vermelho, seu curso principal, drena uma área de aproximadamente 940 hectares, sendo seu solo, cobertura vegetal e práticas agrícolas bastante representativas das condições observadas na ecorregião do planalto central. Com predominância de Latossolo Vermelho, ela apresenta diferentes tipos de uso e cobertura vegetal.

2.2. Base de dados

Para fins de geração das funções de pedotransferência foram consideradas as camadas de solo superficial (0-5 e 15-20cm) e a sub-superficial (60-65cm), representando, em termos médios, a camada de solo agricultável e o horizonte diagnóstico, respectivamente. Foram retiradas ao todo 891 amostras, oriundas de 99 perfis de solo. Para representar o solo em cada um dos perfis amostrados, foram retiradas três amostras em cada uma das camadas de solo citadas anteriormente.

As amostras de solos, nas profundidades indicadas, foram coletadas com estrutura não deformada e utilizadas para determinação da textura e da densidade global. A umidade do solo na saturação, θ_s , foi estimada diretamente por meio de pesagem das amostras selecionadas, antes de serem submetidas à tensão de 1500 kPa, para estimar a umidade residual. A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada em laboratório, utilizando o método do permeâmetro de carga constante (Klute, 1965). Após uma análise crítica dos dados coletados, alguns foram descartados. Ao final, 92 perfis foram considerados para fins de geração das FPTs.

2.3. Funções de pedotransferência

Foram geradas funções de pedotransferência, para a condutividade hidráulica do solo saturado e para as umidades de saturação e residual, para as camadas de solo superficial (0-5 e 15-20cm) e a sub-superficial (60-65cm).

Para isto foram ajustados modelos de regressão múltipla utilizando-se como preditores argila (ARG), silte (SLT), areia fina (AF), areia grossa (AG), matéria orgânica (MO) e densidade global (DG). A seleção de preditores em cada modelo foi feita utilizando-se a opção 'stepwise' onde a cada passo as variáveis predictoras podem ser incluídas ou excluídas do modelo até que um subconjunto ótimo seja selecionado de acordo com um critério de valor máximo para o nível de significância nominal, que mensura a contribuição de cada possível preditor na explicação da variabilidade da resposta (K_s , θ_s e θ_r).

A qualidade de ajuste dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e gráficos de resíduos padronizados e relação entre valores observados e preditos pelas FPTs. Adicionalmente a precisão das FPTs foi quantificada utilizando-se a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) (Draper and Smith, 1966) e o índice de diferença normalizado (Mcfeeters, 1996).

Por fim, as FPTs obtidas neste trabalho foram comparadas com outras funções de pedotransferências disponíveis na literatura.

Para K_s , foram utilizadas as FPTs desenvolvidas por Campbell (1985), equações 3 e 4 e por Puckett et al. (1985), equação 5.

$$K_s = 70,6 e^{[-4,26 (SLT+ARG)]} \quad (3)$$

$$K_s = C e^{(-6,9 ARG-3,7 SLT)} \quad (4)$$

$$K_s = 157 e^{[-19,75 ARG]} \quad (5)$$

Para Θ_s , foram utilizadas as FPTs propostas por Vereecken et al. (1989), equação 6, e Tomasella et al. (2000), equação 7.

$$\theta_s = 0,803 - 0,283 DG + 0,0013 ARG \quad (6)$$

$$\theta_s = 0,8219 - 0,0177 SLT + 0,2324 \theta_{cc} - 0,2867 DG + 0,000049 AG m_s - X \quad (7)$$

Sendo

$$X = 0,000029 AG ARG + 0,000027 AF ARG - 0,000008 AG^2 \quad (8)$$

Para Θ_r , foram utilizadas as FPTs propostas por Dijkerman (1988), equação 9, por Aina e Periaswamy (1985), equação 10, por Pidgeon (1972), equação 11, e por Oliveira et al. (2002), equação 12.

$$\theta_r = 0,0074 + 0,0039 ARG \quad (9)$$

$$\theta_r = -0,0419 + 0,0019 SLT + 0,0039 ARG + 0,009 MO \quad (10)$$

$$\theta_r = 0,00038 AR + 0,00153 SLT + 0,00341 ARG + 0,030861 DG \quad (11)$$

em que

ARG	=	argila,	%;
SLT	=	silte,	%;
AR	=	areia total,	%;
AG	=	areia total,	%;
AF	=	areia fina,	%;
DG	=	densidade global,	g cm ⁻³ ;
MO	=	materia orgânica,	%;
Θ_{cc}	=	umidade do solo na capacidade de campo,	decimal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Base de dados

Nas Figuras 1 e 2, são apresentados box-plots mostrando a variabilidade dos preditores (matéria orgânica, areia fina, areia grossa, silte e argila) e das variáveis-resposta (umidade residual,

umidade do solo na saturação e condutividade do solo saturado) no conjunto de dados utilizado para ajuste das FTPs.

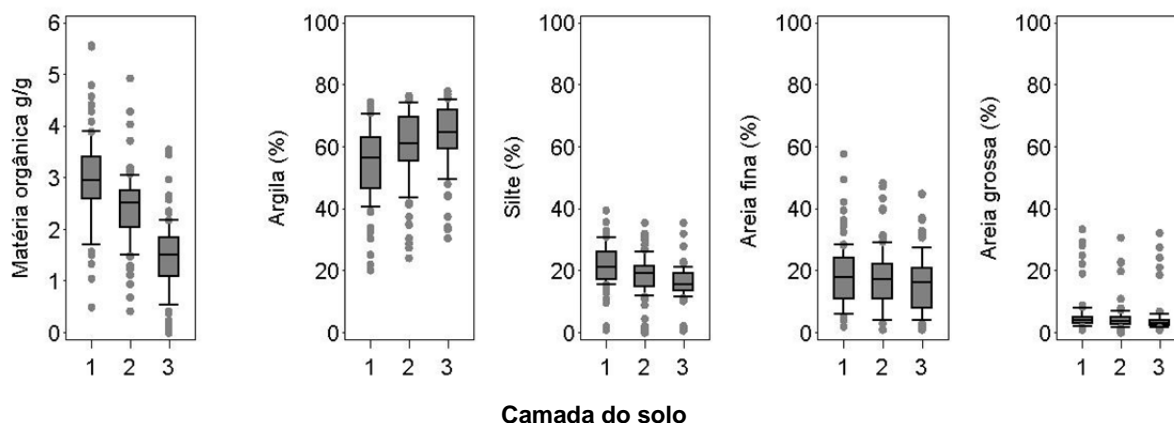


Figura 1- Variabilidade do conteúdo de matéria orgânica e propriedades texturais do solo, em três camadas de solo (1- 0-5cm; 2- 15-20cm; 3- 60-65cm), na área da bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho, DF.

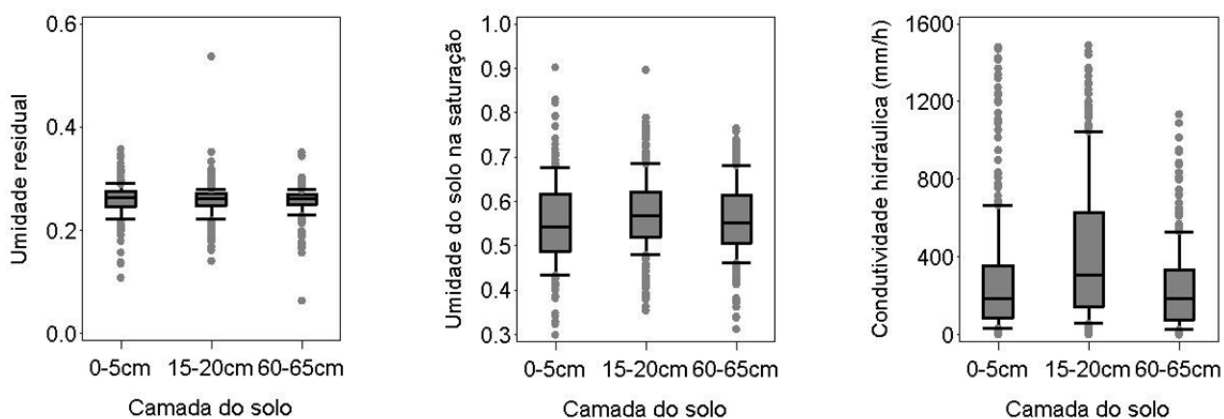


Figura 2- Variabilidade de propriedades hidráulicas do solo, em três camadas de solo, na área da Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho, DF.

Para a camada de solo de 0-5cm, os teores de MO variaram de 0,5% a 6,6%; argila de 20,1% a 74,5%; silte de 0,9% a 39,5%; areia fina de 2% a 57,8%; areia grossa de 1,3% a 33,5%; densidade global de $0,84 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,39 \text{ g cm}^{-3}$ e teor de umidade na capacidade de campo de $0,23 \text{ g g}^{-1}$ a $0,54 \text{ g g}^{-1}$, com médias, respectivamente, de 2,94%, 54,0%, 21,2%, 19,4%, 5,5%, $1,03 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,42 \text{ g g}^{-1}$. O valor de K_s variou de $4,2 \text{ mm h}^{-1}$ a 2.619 mm h^{-1} ; a umidade na saturação de 34% a 89%; a umidade residual de 13% a 35%, com médias, respectivamente de $354,5 \text{ mm h}^{-1}$, 55% e 26%.

Para a camada de solo de 15-20cm, os teores de MO variaram de 0,4% a 4,0%; argila de 24,1% a 76,5%; silte de 0,5% a 39,5%; areia fina de 1,0% a 48,3%; areia grossa de 0,9% a 30,7%;

densidade global de $0,78 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,23 \text{ g cm}^{-3}$ e teor de umidade na capacidade de campo de $0,31 \text{ g g}^{-1}$ a $0,52 \text{ g g}^{-1}$, com médias, respectivamente, de 2,36%, 59,1%, 17,6%, 18,5%, 4,7%, $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,41 \text{ g g}^{-1}$. O valor de K_s variou de $6,3 \text{ mm h}^{-1}$ a $1.590,5 \text{ mm h}^{-1}$; a umidade na saturação de 40% a 78%; a umidade residual de 19% a 55%, com médias, respectivamente de $610,1 \text{ mm h}^{-1}$, 57% e 26%.

Para a camada de solo de 60-65cm, os teores de MO variaram de 0,2% a 3,6%; argila de 30,5% a 78,0%; silte de 0,70% a 35,5%; areia fina de 0,2% a 59%; areia grossa de 0,9% a 32,2%; densidade global de $0,83 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,26 \text{ g cm}^{-3}$ e teor de umidade na capacidade de campo de $0,31 \text{ g g}^{-1}$ a $0,52 \text{ g g}^{-1}$, com médias, respectivamente, de 1,43%, 63,4%, 15,6%, 16,8%, 4,4%, $1,00 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,43 \text{ g g}^{-1}$. O valor de K_s variou de $10,1 \text{ mm h}^{-1}$ a 1.180 mm h^{-1} ; a umidade na saturação de 38% a 73%; a umidade residual de 18% a 33%, com médias, respectivamente de $281,3 \text{ mm h}^{-1}$, 56% e 26%.

3.2. Funções de pedotransferência

As análises apresentadas neste trabalho, relativas ao ajuste de modelos e estimativas de parâmetros são aproximadas e de caráter exploratório pois não foram consideradas as possíveis correlações espaciais decorrentes da localização geográfica dos perfis e profundidades sequenciais das camadas do solo dentro de um mesmo perfil.

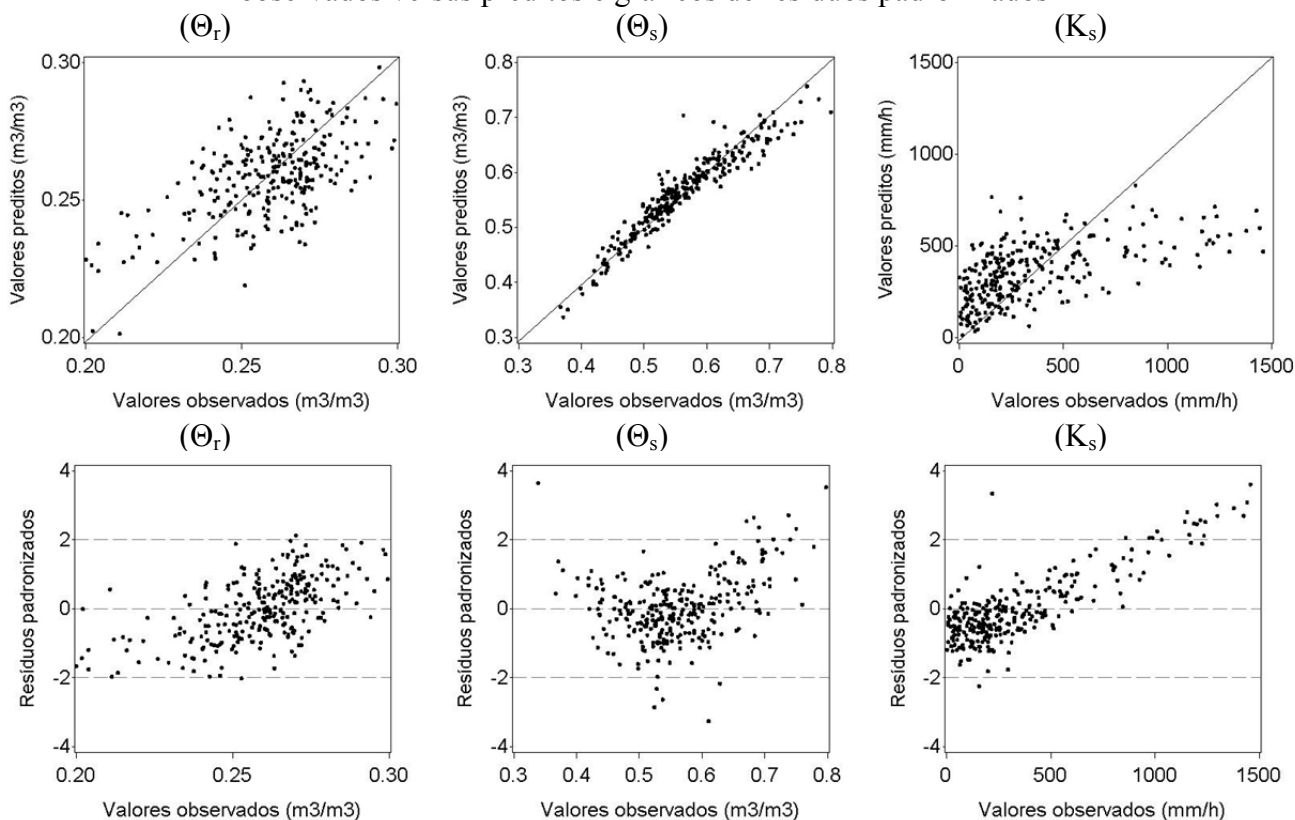
Na Tabela 1 são apresentadas as FTP estimadas para cada variável resposta (K_s , Θ_s e Θ_r), considerando todas as profundidades do solo conjuntamente (FTP gerais). Nota-se, nesta tabela, uma baixa capacidade preditiva na FTP estimada para a variável resposta K_s , indicada pelo baixo valor do R^2 , 0,30, e elevado valor do RMSE.

A capacidade preditiva das FTPs pode ser avaliada visualmente por meio da comparação do valor estimado com o valor observado e pela análise dos resíduos padronizados, Figura 3. O diagnóstico desses gráficos de resíduos para avaliação de adequação dos modelos (FTPs) indicam: a) a FPT ajustada para estimar Θ_s apresenta melhor qualidade de ajuste, quando comparadas às FPTs para Θ_r e K_s , indicado pela menor dispersão dos pontos em torno da diagonal, Figura 3; b) para K_s , há uma forte tendência de superestimativa (subestimativa) para valores mais baixos (altos) de K_s (Figuras 1) e c) para K_s , uma considerável fração dos resíduos padronizados está fora do intervalo (-2, 2) caracterizando baixa precisão do modelo; o padrão sistemático dos resíduos também indica claramente a presença de viés.

Tabela 2- Parâmetros das funções de pedotransferência para as variáveis umidade residual (Θ_r), umidade de saturação (Θ_s) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), com respectivos erros-padrão, níveis de significância nominais (valores p), coeficientes de determinação dos modelos ajustados (R^2) e raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE). As funções foram estimadas considerando dados de três profundidades (0, 15 e 60 cm) simultaneamente

Variável resposta	R^2	RMSE	Preditor	Parâmetro	Estimativa	Erro-padrão	Valor p*
Θ_r	0,59	0,02	Intercepto	β_0	1673,84	194,20	<0,0001
			Densidade global	β_1	-1576,94	184,67	<0,0001
			Areia fina	β_2	13,84	2,04	<0,0001
			Areia grossa	β_3	-19,67	3,69	<0,0001
			Matéria orgânica	β_4	4,56	17,32	0,0076
Θ_s	0,90	0,02	Intercepto	β_0	0,3442	0,0143	<0,0001
			Densidade global	β_1	-0,1372	0,0116	<0,0001
			Matéria orgânica	β_2	0,0105	0,0011	<0,0001
			Argila	β_3	0,0007	0,0001	<0,0001
			Silte	β_4	-0,0007	0,0002	<0,0001
K_s	0,30	274,77	Intercepto	β_0	1,4064	0,0176	<0,0001
			Densidade global	β_1	-0,8527	0,0170	<0,0001
			Silte	β_2	0,0011	0,0003	<0,0001
			Matéria orgânica	β_3	-0,0059	0,0017	0,0005
			Areia grossa	β_4	0,0007	0,0003	0,0348

Figura 3- Padrões gráficos de resíduos das funções de pedotransferência ajustadas para as variáveis umidade residual, umidade de saturação e condutividade saturada, respectivamente: valores observados versus preditos e gráficos de resíduos padronizados



As FTPs estimadas para cada uma das camadas de solo estudadas, com os respectivos valores de R^2 , para as variáveis respostas K_s , Θ_s e Θ_r , estão representadas pelas equações: 12, 13 e 14 (camada de solo de 0-5cm); 15, 16 e 17 (camada de solo de 15-20cm); 18, 19 e 20 (camada de solo de 60-65cm).

$$K_s = 2874,57 - 1772,17 DG - 11,75 ARG - 18,73 AG \quad \therefore R^2 = 33,8\% \quad (12)$$

$$\theta_s = 1,4897 - 0,8700 DG - 0,0087 MO - 0,0004 ARG \quad \therefore R^2 = 92,6\% \quad (13)$$

$$\theta_r = 0,3303 - 0,1682 DG + 0,0123 MO + 0,0010 ARG \quad \therefore R^2 = 66,1\% \quad (14)$$

$$+ 0,0006 AF$$

$$K_s = 2291,68 - 2063,68 DG + 21,57 AF - 33,64 AG \quad \therefore R^2 = 33,9\% \quad (15)$$

$$\theta_s = 1,4653 - 0,8890 DG - 0,0134 MO + 0,0007 SLT \quad \therefore R^2 = 87,3\% \quad (16)$$

$$\theta_r = 0,3621 - 0,1759 DG + 0,0105 MO + 0,0007 ARG \quad \therefore R^2 = 68,1\% \quad (17)$$

$$+ 0,0006 AG$$

$$K_s = 1921,08 - 984,53 DG + 59,46 MO - 5,43 ARG \quad \therefore R^2 = 33,6\% \quad (18)$$

$$- 25,11 AG - Z$$

$$\theta_s = 1,4690 - 0,8760 DG - 0,0141 MO - 0,0007 AF \quad \therefore R^2 = 87,3\% \quad (19)$$

$$\theta_r = 0,2621 - 0,0765 DG + 0,0084 MO + 0,0012 ARG \quad \therefore R^2 = 54,7\% \quad (20)$$

$$+ Y$$

sendo

$$Z = 20,74 SLT;$$

$$Y = 0,0008 AG - 0,0013 SLT.$$

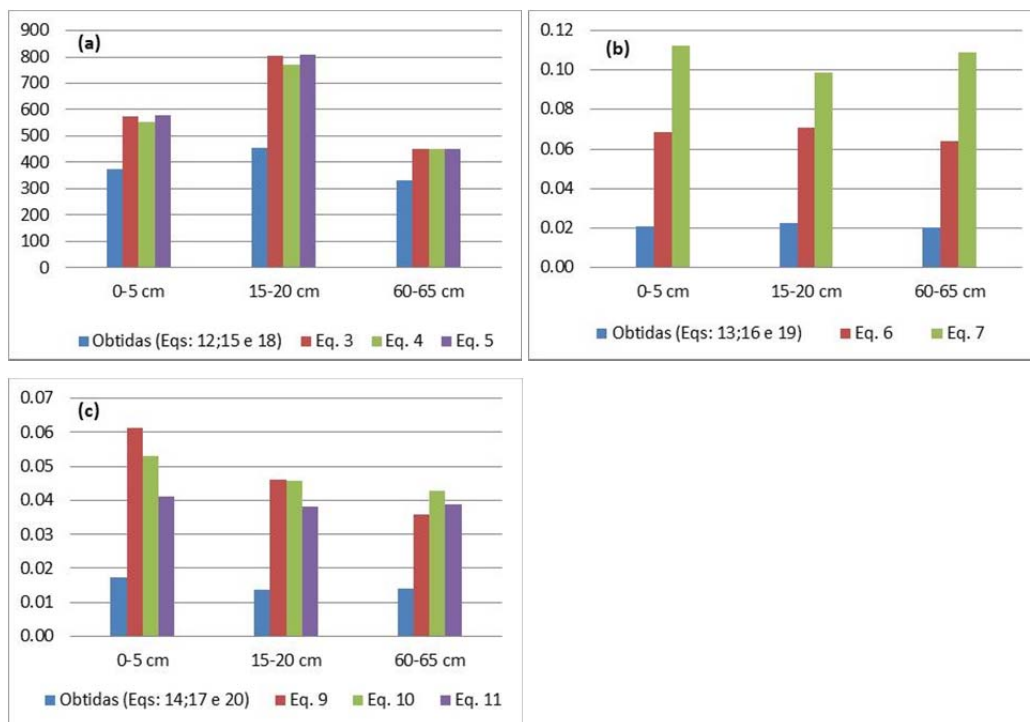
A análise dos R^2 das equações indica uma melhor qualidade de ajuste para as FTPs de estimativa de Θ_s e Θ_r . As FTPs ajustadas para estimar K_s apresentaram baixa qualidade de ajuste.

A análise dos gráficos de resíduos, das medidas de qualidade de ajuste (R^2) e precisão dos modelos (RMSE) para as FTPs específicas (ajustadas para cada camada do solo) indica o mesmo padrão observado para as FTPs gerais: melhor ajuste e viés menos intenso para a umidade de saturação (Θ_s). As FTPs para K_s apresentam baixa qualidade de ajuste ($R^2=0,34$ em todas as camadas), baixa precisão (RMSE > **) e presença clara de viés, comprometendo seu uso na modelagem de processo hidrológicos.

Na Figura 4 apresentam-se gráficos do RMSE, calculado com base nas FTPs obtidas neste trabalho e encontradas na literatura, para as variáveis respostas K_s (a), Θ_s (b) e Θ_r (c), para as camada de solo de 0-5cm, 15-20cm e 60-65cm. Observa-se que os valores de RMSE calculados com base nas FTPs obtidas neste trabalho (FTPST) foram menores, em todos os casos, que os valores das FTPs obtidas na literatura (FTPSTL). Isto evidencia a necessidade de desenvolver FTPs específicas para a região de estudo.

Analisando-se a Figura 4 nota-se que nenhuma das FTPsL simulou a K_s adequadamente, sendo o resultado um pouco melhor para a camada de solo de 60-65 cm. Uma possível explicação é fato dessa camada apresentar maior teor de argila que as demais, uma vez que a argila é o único preditor utilizado nas FTPsL para estimar K_s .

Figura 4- Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), calculado com base nas FTPs obtidas neste trabalho e encontradas na literatura, para as variáveis respostas K_s (a), Θ_s (b) e Θ_r (c), para as camadas de solo de 0-5cm, 15-20cm e 60-65cm



Para a umidade de saturação a FTP proposta por Vereecken et al. (1989), equação 6, apresentou melhor resultado que a proposta por Tomasella et al. (2000), equação 7. Para a umidade residual as FTPsL estudadas não apresentaram resultados satisfatórios.

Na Figura 4 apresenta-se os gráficos com os índices de diferença normalizado (IDN) para as variáveis respostas K_s (a), Θ_s (b) e Θ_r (c), apenas para para a camada de solo de 0-5cm, uma vez que os resultados e as tendências observadas foram similares a este para as outras profundidades analisadas.

Os valores de IDN variam de -1 a 1. Valores mais próximos a zero indicam um melhor ajuste das FTPs, enquanto valores próximos aos extremos (-1 ou 1) indicam maiores desvios. O valor negativo incica que a FTP está superestimando o valor da variável resposta. Como já constatado, a FTPsT e as FTPsL apresentaram baixa qualidade para estimar K_s , Figura 4 (a). As equações 12 e 4, entretanto, apresentaram um comportamento bastante semelhante, enquanto as equações 3 e 5 apresentaram tendência de subestimar essa variável, sendo este fato mais evidente para a equação 5.

A FTPsT apresentou uma melhor capacidade preditiva para as variáveis respostas Θ_s e Θ_r , Figuras 4 (b) e (c), indicado pelos valores concentrados em sua maioria em torno do valor zero. A FTPsL utilizada para simular a variável resposta Θ_s , equação 7, foi a que apresentou pior resultado, com tendência a superestimar o valor da variável. Para Θ_r , entretanto, as FTPsL apresentaram, em geral, tendência a subestimar a variável.

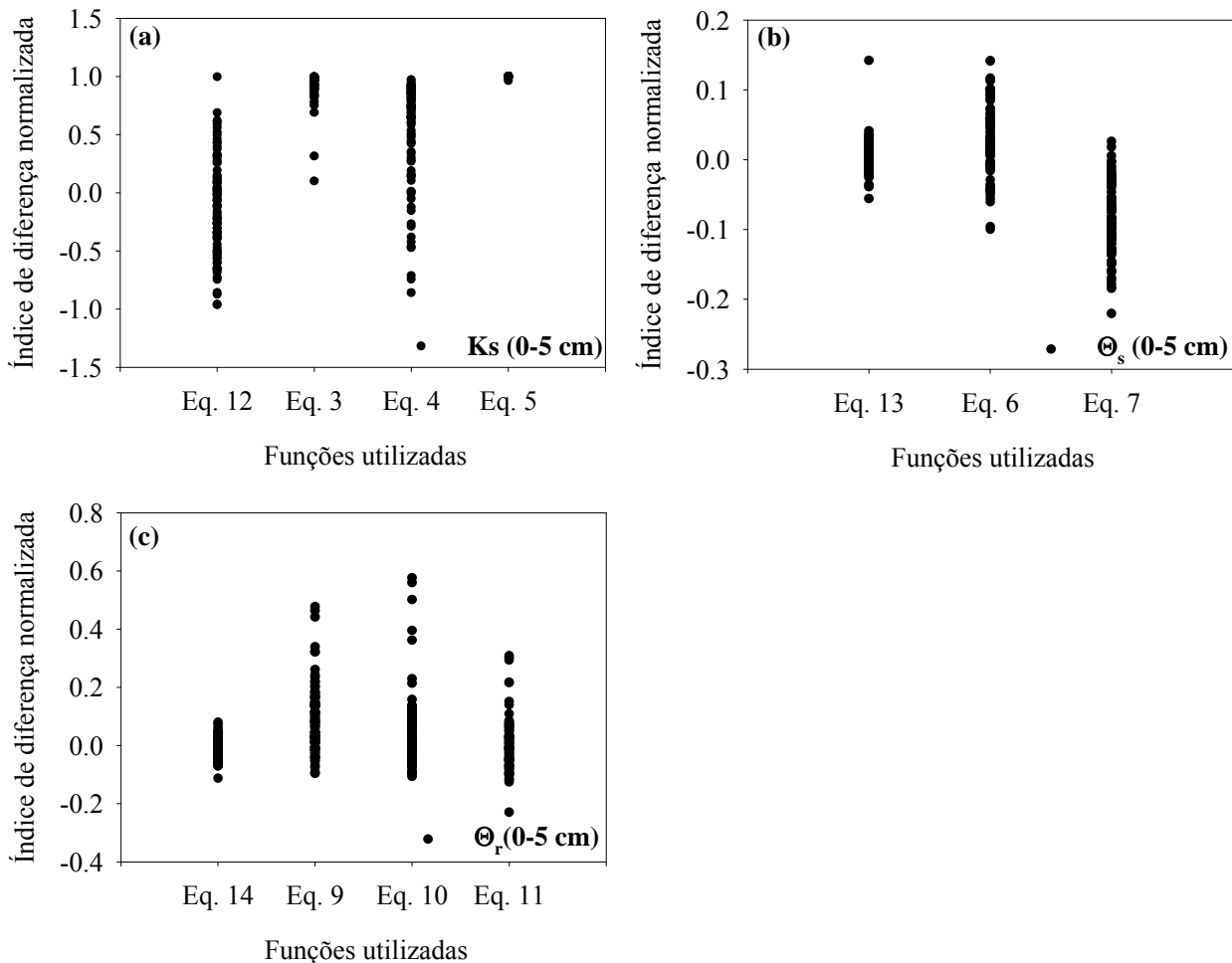


Figura 4 - Índices de diferença normalizado (IDN) para as variáveis respostas K_s (a), Θ_s (b) e Θ_r (c), para a camada de solo de 0-5cm.

4. CONCLUSÕES

As funções de pedotransferência ajustadas para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado apresentaram baixa qualidade de ajuste, sendo esta a classe de funções que deve ser utilizada com maior cuidado.

As funções de pedotransferência para a umidade de saturação foram as que produziram melhor qualidade de ajuste, com R^2 variando de 87% a 92%. Das funções obtidas na literatura a proposta por Vereecken et al. (1989) foi a que apresentou melhor resultado para a região em estudo.

As funções de pedotransferência ajustadas para estimar a umidade residual apresentaram, em geral, uma boa qualidade de ajuste, com R^2 variando de 54% a 66%. As funções obtidas da literatura, entretanto, tendência a subestimar essa variável.

Funções de pedotransferência, dado a grande variabilidade das características do solo, devem ser desenvolvidas especificamente para o local de estudo. Na falta de dados suficientes para gerar essas funções, entretanto, podem ser utilizadas funções disponíveis na literatura, desde que elas sejam adequadamente testadas com dados da região de interesse.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Embrapa Cerrados pelo apoio na realização deste trabalho. Ao CNPq pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa N. 552570/2007-9.

BIBLIOGRAFIA

AINA, P.O., PERISAWAMY, S.P. Estimating available water-holding capacity of western Nigerian soils from texture and bulk density, using core and sieved samples. *Soil Sci.* 140, 55-58. 1985.

CAMPBELL, G. S. *Soil physics with basic: transport models for soil plant systems*. Amsterdam: Elsevier, 1985. 150p. *Developments in Soil Science*, 14.

DIJKERMAN, J.C. An Ustult-Agult-Tropept catena in Sierra Leone, West Africa. II. Land qualities and land evaluation. *Geoderma* 42, 29-49. 1988.

GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content and bulk density. *Water Resource Research*, Washington, D.C., v.15, n.6, p.1633-1635, 1979.

KLUTE, A. Laboratory measurements of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARK, F. E. *Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. American Society of Agronomy: Madison, 1965. p. 210-221.

McFEETERS, S. K. (1996): The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of open water features. In: *Int. J. Remote Sensing* (17), No. 7, 1996, pp. 1425-1432.

OLIVEIRA, L.B., RIBEIRO, M.R., JACOMINE, P.K.T., RODRIGUES, J.J.V., MARQUES, F.A. Funções de pedotransferência para predição de umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Ver. Bras. Ci. Solo.* 26, 315-323. 2002.

PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. *Development of pedotransfer functions in soil hydrology*. New York: Elsevier, 2004. 512 p. *Developments in soil science*, 30. PIDGEON, J.D. The measurement and prediction of available water capacity of ferralitic soils in Uganda. *J. Soil Sci.* 23, 431-441.

PUCKET, W.E., DANE, J.H., HAJEK, B.F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulics properties. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 49, 831-836. 1985.

RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil properties. Journal of Irrigation Drainage Division. ASCE, New York, v.108, n.1R2, p.166-171, 1982.

SMETTEM, K. et al. Data availability and scale in hydrologic applications. In: PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. New York: Elsevier, 2004. p. 253-271. Developments in soil science, 30.

TOMASELLA, J., HODNETT, M.G., ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention Brazilian soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 64, 327-338. 2000

VERECKEN, H., MAES, J., FEYEN, J., DARIUS, P. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. Soil Sci. 148, 389-403. 1989.