

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES FORMULAÇÕES DO MODELO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE VAN GENUCHTEN-MUALEM

TIRZAH MOREIRA DE MELO* E JOSÉ ANTÔNIO LOUZADA*

* Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil, tirzahmelo@hotmail.com; louzada@iph.ufrgs.br.

1 RESUMO

O fluxo de água na zona não saturada é regido pela interação entre as condições naturais na superfície e as propriedades hidráulicas do solo, sendo que dentre essas últimas a condutividade hidráulica tem grande importância. Dentre os vários modelos existentes que procuram representar analiticamente sua relação com a umidade ou com o potencial matricial, o mais amplamente utilizado é o que resulta da combinação das equações de Mualem (1976) e van Genuchten (1980). Na sua versão mais difundida, uma limitação é a imposição da dependência entre os parâmetros de forma m e n . Mais recentemente, Dourado Neto et al. (2011) propuseram uma nova formulação para as funções de condutividade hidráulica propostas por van Genuchten-Mualem e van Genuchten-Burdine, onde é possível tratar os parâmetros m e n de forma independente. O presente trabalho teve por objetivo comparar o desempenho da formulação original do modelo de van Genuchten-Mualem com o desempenho da nova formulação proposta por Dourado Neto et al. (2011), considerando diferentes tipos de solos e diferentes bases de dados. Segundo os índices estatísticos calculados, os modelos apresentaram desempenhos semelhantes e seus resultados se mostraram fortemente dependentes dos valores do parâmetro n . Adicionalmente, os dois modelos apresentaram desempenhos superiores quando a base de dados utilizada para ajuste dos parâmetros incluiu, além de dados da curva de retenção, dados de condutividade hidráulica não saturada. Também verificou-se o número de termos da série infinita que compõe o segundo modelo para que houvesse sua convergência ao valor da condutividade hidráulica saturada. Os resultados obtidos mostraram que não houve convergência para valores de n próximos de 1 ($n = 1,12887$ na simulação S2 e $n = 1,06688$ na simulação S6) e que houve convergência para valores de n ligeiramente superiores a 2 ($n = 2,35755$ na simulação S4 e $n = 2,06719$ na simulação S8).

Palavras-chave: Modelagem, parâmetros do solo, convergência matemática.

MELO, T. M. de; LOUZADA, J. A.

EVALUATION OF DIFFERENT FORMULATIONS OF THE VAN GENUCHTEN-MUALEM HYDRAULIC CONDUCTIVITY MODEL

2 ABSTRACT

Water flow in vadose zone is driven by the interaction between natural conditions in the surface and hydraulic properties of the soil, and among the latter, hydraulic conductivity has a great importance. Among several existing models to analytically represent its relationship with water moisture and pressure head, the most widely used is the resulting model of the

Mualem (1976) and Genuchten (1980) combination. A significant limitation of the van Genuchten-Mualem model is the assumption of dependency between m and n shape parameters of retention curve. More recently, Dourado Neto et al. (2011) proposed a new formulation for hydraulic conductivity functions developed by van Genuchten-Mualem and van Genuchten-Burdine, which considers m and n as independent parameters. The objective of this study was to compare the performance of the original van Genuchten-Mualem model to that of the modified model for m and n proposed by Dourado Neto et al. (2011), considering different types of soil and database. According to the statistical indexes, the models had similar performance and their results were highly dependent from values of the parameter n . In addition, the 2 models had better performance when the database used for adjustment of parameters included not only data of retention curve, but also data of unsaturated hydraulic conductivity. Moreover, the number of terms of the infinite series that takes part in the second model was verified, so that there was its convergence to the value of the saturated hydraulic conductivity. Results showed that no convergence was observed for n values close to 1 ($n = 1.12887$ in simulation S2 and $n = 1.06688$ in simulation S6), and convergence was observed for n values slightly higher than 2 ($n = 2.35755$ in simulation S4 and $n = 2.06719$ in simulation S8).

Keywords: modeling, soil parameters, mathematical convergence.

3 INTRODUÇÃO

O fluxo na zona não saturada é regido pela interação entre as condições naturais na superfície e as propriedades hidráulicas do solo, sendo que, dentre essas últimas, a condutividade hidráulica tem grande importância. Tal propriedade reflete a maior ou menor resistência que a matriz do solo oferece ao escoamento de um determinado fluido. As características do fluido que a afetam mais significativamente são a densidade e a viscosidade dinâmica, enquanto o solo interfere com suas propriedades de distribuição dos diâmetros dos poros, tortuosidade, área específica, porosidade, estrutura, grau de saturação, entre outras (Bunsri et al., 2011; Pinheiro & Teixeira, 2009).

Muitas aplicações práticas dependem fortemente dos processos que regem o movimento da água no solo, tais como: irrigação, transporte de contaminantes, funções do ecossistema, conexão entre os processos atmosféricos e terrestres, ciclo de nutrientes, desenvolvimento do solo, bem como desastres naturais no que se refere a inundações e deslizamentos de terra; e, portanto, seu entendimento é de extrema relevância.

Embora dotada de uma apresentação teórica simples, a condutividade hidráulica é de difícil experimentação devido, principalmente, a sua grande variabilidade espacial. Como mencionado por Ippisch et al. (2006), estimativas precisas do transporte de água e nutrientes no solo continuam representando um desafio no campo da física do solo, uma vez que o ponto crucial para a utilização da equação de Richards é a correta medição e descrição das propriedades hidráulicas do meio. Essas propriedades são a curva de retenção de água no solo ($\theta(h)$) e a função de condutividade hidráulica ($K(\theta)$), onde θ é o conteúdo volumétrico de água, h é o potencial matricial e K é a condutividade hidráulica.

Existem inúmeras expressões matemáticas para representação dessas funções (Burdine, 1953; Brooks & Corey, 1964; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980; Hutson & Cass, 1987; Rossi & Nimmo, 1994; Jarvis, 1991; Vogel et al, 2000; Schaap & van Genuchten, 2005; Børgesen et al., 2006). No caso específico do modelo de condutividade hidráulica que

resulta da combinação das equações de van Genuchten (1980) e Mualem (1976), algumas alterações foram propostas na sua formulação original. Um exemplo importante diz respeito à melhor representação da condutividade hidráulica próximo à condição de saturação (Borgensen et al., 2006; Ippisch et al., 2006; Schaap & van Genuchten, 2005; Vogel et al., 2000).

Adicionalmente, uma limitação do modelo original de van Genuchten-Mualem em sua formulação mais comum é a imposição de dependência entre os parâmetros m e n , representada pela relação $m = 1 - 1/n$. As equações que permitem um tratamento independente para m e n na função da condutividade foram inicialmente desenvolvidas por van Genuchten & Nielsen (1985). A complexidade dessas equações, que utilizam, por exemplo, funções beta incompletas, fez com que fossem muito pouco utilizadas ao longo do tempo.

Mais recentemente, Dourado Neto et al. (2011) propuseram novas formulações para as funções de condutividade hidráulica propostas por van Genuchten-Mualem e van Genuchten-Burdine nas quais a relação entre os parâmetros m e n é flexibilizada. Essas formulações utilizam funções hipergeométricas aproximadas por séries infinitas que têm sua convergência relacionada aos valores do parâmetro n . Desta forma, uma condição sem restrições é permitida quando do ajuste dos parâmetros.

Com base nessa nova formulação e na importância desempenhada pela condutividade hidráulica nos processos físicos de fluxo de água no solo, objetivou-se avaliar o desempenho do modelo de van Genuchten-Mualem considerando primeiramente m e n dependentes, e posteriormente m e n independentes. As avaliações consideraram: (1) diferentes tipos de solo; e (2) diferentes bases de dados, formadas por valores de θ e h e por valores de θ , h e K .

Também foi analisada a convergência do modelo de Dourado Neto et al. (2011) ao valor da condutividade hidráulica saturada. Como no conjunto de equações que formam esse modelo há uma série infinita, esse processo foi feito variando o número de termos empregados no seu cálculo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Modelo de van Genuchten-Mualem com parâmetros m e n dependentes

O estudo do fluxo da água no solo requer o conhecimento das relações entre as variáveis umidade, potencial matricial e condutividade hidráulica. Segundo o modelo original de van Genuchten-Mualem, estas relações são definidas analiticamente da seguinte forma:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$K(S_e) = \begin{cases} K_s S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

onde θ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), h é o potencial matricial (cm); θ_r e θ_s são as umidades residuais e de saturação, respectivamente ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); α é um parâmetro relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar ($> 0, \text{cm}^{-1}$); n (> 1) e m são parâmetros empíricos adimensionais; K_s é a condutividade hidráulica saturada (cm d^{-1}); λ é um parâmetro empírico relacionado à conectividade dos poros e S_e é a saturação efetiva. A integração que combina a equação (1) com o modelo de condutividade hidráulica de Mualem resulta na equação (2). Essa integração é condicionada à dependência entre os parâmetros m e n , ou seja, $m = 1 - 1/n$.

Modelo de van Genuchten-Mualem com parâmetros m e n independentes

O modelo de condutividade hidráulica com parâmetros m e n independentes proposto por Dourado Neto et al. (2011) é apresentado a seguir.

$$K(S_e) = K_s \left[\frac{S_e^{(\lambda/2)+(1/mn)+1} [1 + \eta(S_e)]}{1 + B} \right]^2, \quad (0 \leq S_e \leq 1, n > 1 \text{ e } m > 0) \quad (4)$$

$$\eta(S_e) = (mn + 1) \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{S_e^{k/m}}{mn + kn + 1} \prod_{i=1}^k \frac{n^{-1} + i - 1}{i} \right) \quad (5)$$

$$B = (mn + 1) \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{mn + kn + 1} \prod_{i=1}^k \frac{n^{-1} + i - 1}{i} \right) \quad (6)$$

sendo K_s a condutividade hidráulica saturada e k o número de termos considerados nas séries infinitas. A convergência da equação (5) ocorreu com $k = 1000$ para todas as combinações entre os parâmetros m e n consideradas pelos autores. Já a equação (6) apresentou uma convergência lenta para valores de n menores do que 2 ou 3. Na medida em que n aproximou-se de 1, os autores identificaram uma demanda computacional que inviabiliza sua aplicação. No entanto, a equação (7) representa uma aproximação para B que, de certa forma, contorna essa dificuldade. Essa equação foi obtida quando $1.6 \leq n \leq 40$ e $0.05 \leq m \leq 0.95$, utilizando 2185 combinações diferentes para os parâmetros m e n .

$$\tilde{B} = a + bL(n; n_o, v) + cL(m; m_o, \mu) + dL(n; n_o, v) L(m; m_o, \mu) \quad (7)$$

onde \tilde{B} é a função ajustada de aproximação de B e L é a função da distribuição cumulativa de Cauchy definida por:

$$L(f; f_o, \varphi) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{f - f_o}{\varphi} \right) \quad (8)$$

onde a , b , c , d , n_o , m_o , v e μ são os parâmetros ajustados por Dourado Neto et al. (2011) para os intervalos de n e m mencionadas anteriormente.

Etapas metodológicas

A fim de que fosse possível avaliar o desempenho das duas formulações do modelo de van Genuchten-Mualem, foi elaborado um programa na linguagem C otimizada do MATLAB[®] que resolve as equações anteriormente apresentadas, sendo que para a aplicação da versão de Dourado Neto et al. (2011) o valor de B (equação 6) foi aproximado por \tilde{A} (equação 7). Para tanto, dois tipos diferentes de solos foram utilizados, cujos dados observados estão apresentados na Tabela 1. Os solos 1 e 2 apresentam texturas média e fina, respectivamente.

Tabela 1. Dados observados de umidade (θ), condutividade hidráulica (K) e potencial matricial (h) dos solos analisados

Umidade (cm ³ cm ⁻³)	SOLO 1		SOLO 2	
	Condutividade Hidráulica (cm/d)	Potencial Matricial (- cm)	Condutividade Hidráulica (cm/d)	Potencial Matricial (- cm)
0.05	4.50E-05	6975	-	-
0.06	6.70E-05	3365	-	-
0.08	4.10E-04	1255	-	-
0.1	4.80E-03	447	-	-
0.12	2.60E-02	330	-	-
0.14	5.20E-02	259	-	-
0.16	7.80E-02	209	-	-
0.18	1.10E-01	168	6.40E-05	7685
0.2	2.70E-01	134	4.10E-04	4025
0.22	7.40E-01	106	2.00E-03	2675
0.24	1.60E+00	78	3.60E-03	1675
0.26	3.60E+00	64	1.60E-02	815
0.28	4.70E+00	53	4.50E-02	525
0.3	7.40E+00	43	1.10E-01	331
0.32	1.10E+01	34	2.80E-01	212
0.34	1.90E+01	26	5.40E-01	143
0.36	3.40E+01	18	1.00E+00	94
0.38	6.90E+01	10	2.10E+00	59
0.4	1.10E+02	3	4.10E+00	36
0.41	1.20E+02	0	5.10E+00	28
0.42	-	-	6.20E+00	21
0.44	-	-	7.30E+00	10
0.46	-	-	9.5E+00	0

Fonte: Hanks (1965).

A sequência de etapas realizadas são listadas a seguir:

(1) *Ajuste dos parâmetros* das equações que representam os dois modelos para cada solo através do aplicativo RETC versão 6.02 (van Genuchten et al., 1991), resultando em oito ajustes distintos a partir das seguintes combinações:

- considerando a base de dados somente com dados de umidade *versus* potencial matricial (CRA) e m e n dependentes e independentes;

- incluindo os dados de condutividade hidráulica *versus* potencial matricial ou umidade (CCH) na base de dados e considerando m e n dependentes e independentes;

A verificação da qualidade do ajuste pelo próprio aplicativo RETC é feita por meio do índice de regressão, dado por:

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N w_i \hat{y}_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N \hat{y}_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N w_i \hat{y}_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N \hat{y}_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N w_i} \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N w_i} \right)} \quad (9)$$

onde y_i , \hat{y}_i e w_i são os valores observados, valores ajustados e os pesos dos valores observados, respectivamente. Foram considerados pesos iguais para todos os pontos.

(2) *Aplicação dos modelos* original e modificado de condutividade hidráulica de van Genuchten-Mualem.

(3) *Análise dos resultados* dos modelos para os diferentes tipos de solos e bases de dados utilizadas no ajuste dos parâmetros.

(4) *Análise da convergência* do modelo de Dourado Neto et al. (2011) ao valor da condutividade hidráulica saturada, considerando um número crescente de termos (k) na equação (5).

(5) *Avaliação do desempenho dos modelos* através de índices estatísticos. Este desempenho foi testado por meio da raiz do erro médio quadrático (RMSE) e do coeficiente de Nash e Sutcliffe (COE), definidos como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (10)$$

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

onde \bar{y} e $\bar{\hat{y}}$ são as médias dos valores observados e estimados, respectivamente.

O coeficiente RMSE mede a variância residual, a qual indica a medida quantitativa do erro do modelo em unidades da variável de interesse, sendo zero o seu valor ótimo. O coeficiente de Nash e Sutcliffe (COE) compara os valores observados e estimados e avalia a capacidade do modelo explicar a variância total dos dados: valor ótimo igual a 1.

Abaixo está apresentada a estrutura das simulações com relação ao tipo de solo, ajuste dos parâmetros, condição de dependência ou independência e modelo aplicado.

Tabela 2. Estrutura das simulações realizadas

Tipo de solo	Base de dados utilizada no ajuste	Condição dos parâmetros m e n	Modelo aplicado	Identificação da simulação
SOLO 1	CRA	Dependentes	Modelo 1*	S1
		Independentes	Modelo 2**	S2
	CCH	Dependentes	Modelo 1	S3
		Independentes	Modelo 2	S4
SOLO 2	CRA	Dependentes	Modelo 1	S5
		Independentes	Modelo 2	S6
	CCH	Dependentes	Modelo 1	S7
		Independentes	Modelo 2	S8

* modelo original; ** modelo modificado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ajuste dos parâmetros

Foram ajustados oito conjuntos de parâmetros referentes a cada uma das simulações apresentadas na Tabela 2 e os resultados encontram-se na Tabela 3. No caso das simulações S2 e S6 os valores de n são inferiores a 1,6, que é o limite mínimo do intervalo para o qual foi validada a equação (7). Nas simulações S4 e S8 os valores de n são ligeiramente superiores a 2, recaindo, portanto, dentro do intervalo citado anteriormente. Por outro lado, todos os valores de m obtidos estão dentro dos limites indicados.

É importante ressaltar que as equações que compõem o modelo 2 não estão inseridas no aplicativo RETC, ou seja, os valores de R^2 que correspondem ao ajuste dos parâmetros de forma independente utilizando a base CCH (S4 e S8) têm como referência o modelo da curva de retenção (equação 1) e o modelo de condutividade de van-Genuchten - Mualem apresentado por van Genuchten & Nielsen (1985). Nos casos S1, S2, S5 e S6 os valores de R^2 têm como referência unicamente a equação (1), nos casos S3 e S7 as equações (1) e (2).

Tabela 3. Parâmetros ajustados em cada simulação

Simulação	Parâmetros						
	SOLO 1						
	θ_r	θ_s	α	n	m	λ	R^2
S1	0,03204	0,40267	0,02866	1,59284	0,37219 ¹	0,5 ³	0,99786
S2	0,04853	0,40940	0,01342	1,12887	0,83820 ²	0,5 ³	0,99876
S3	0,09359	0,41213	0,02874	2,04688	0,55145 ¹	0,0001	0,99752
S4	< 0,001	0,40281	0,04917	2,35755	0,16522 ²	0,0001	0,99955
	SOLO 2						
	θ_r	θ_s	α	n	m	λ	R^2
S5	< 0,001	0,45926	0,04375	1,15715	0,13581 ¹	0,5 ³	0,99927
S6	< 0,001	0,46056	0,04103	1,06688	0,15007 ²	0,5 ³	0,99932
S7	0,20996	0,42792	0,00930	1,93563	0,48337 ¹	0,0001	0,99763
S8	0,14265	0,42510	0,01460	2,06719	0,18165 ²	-0,66853	0,99785

¹ obtido pela relação $m = 1 - 1/n$; ² ajustado; ³ valor sugerido por Mualem (1976).

Resultados e desempenho dos modelos - visualização dos gráficos

Como apresentado na Tabela 2, todas as simulações com o modelo 1 (equação 2) consideraram m e n dependentes quando do ajuste, seguindo a formulação original da equação de van Genuchten-Mualem, enquanto as simulações com o modelo 2 (equação 4 e B aproximado por \tilde{A}) utilizaram valores de m e n obtidos de forma independente. Nesse último caso, o número de termos (k) considerado no cálculo da série infinita definida pela equação (5) foi 1000.

A Figura 1 apresenta os resultados da aplicação dos dois modelos aos dois tipos de solo. Essa primeira avaliação, apenas visual, e, portanto, limitada pela própria escala dos gráficos, mostra comportamentos semelhantes dos dois modelos. Para a base de dados CRA, caso em que os valores de n são próximos de 1, a inspeção visual sugere um baixo desempenho por ambos os modelos, comportamento que se acentua bastante no caso do solo 2. Já para a base CCH, os gráficos apontam para um bom desempenho dos dois modelos.

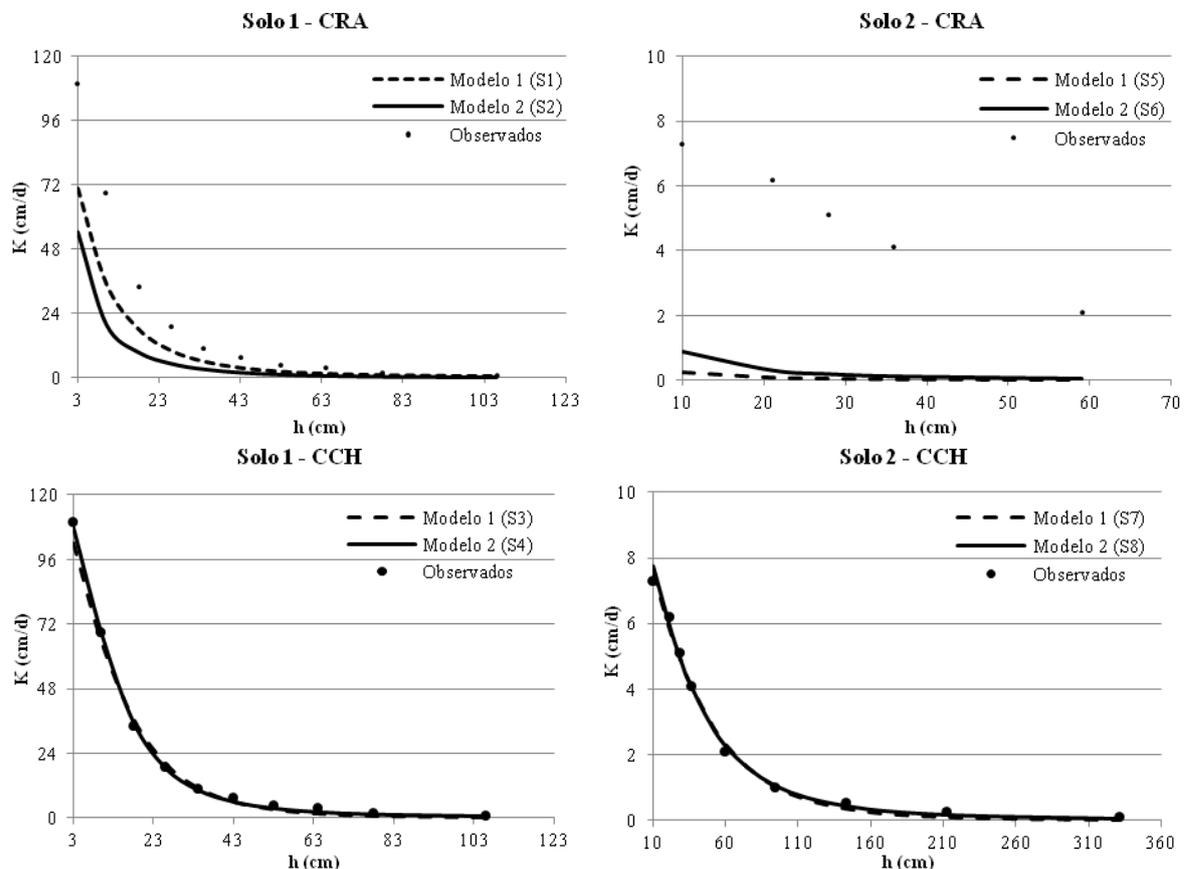


Figura 1. Resultados da aplicação dos modelos 1 e 2 aos dois tipos de solos.

Na Figura 2 estão apresentados os valores de condutividade hidráulica para um mesmo modelo comparados com relação à base de dados utilizada no ajuste. É evidente que a inclusão dos dados de condutividade hidráulica no ajuste (base CCH) melhorou o desempenho de ambos os modelos.

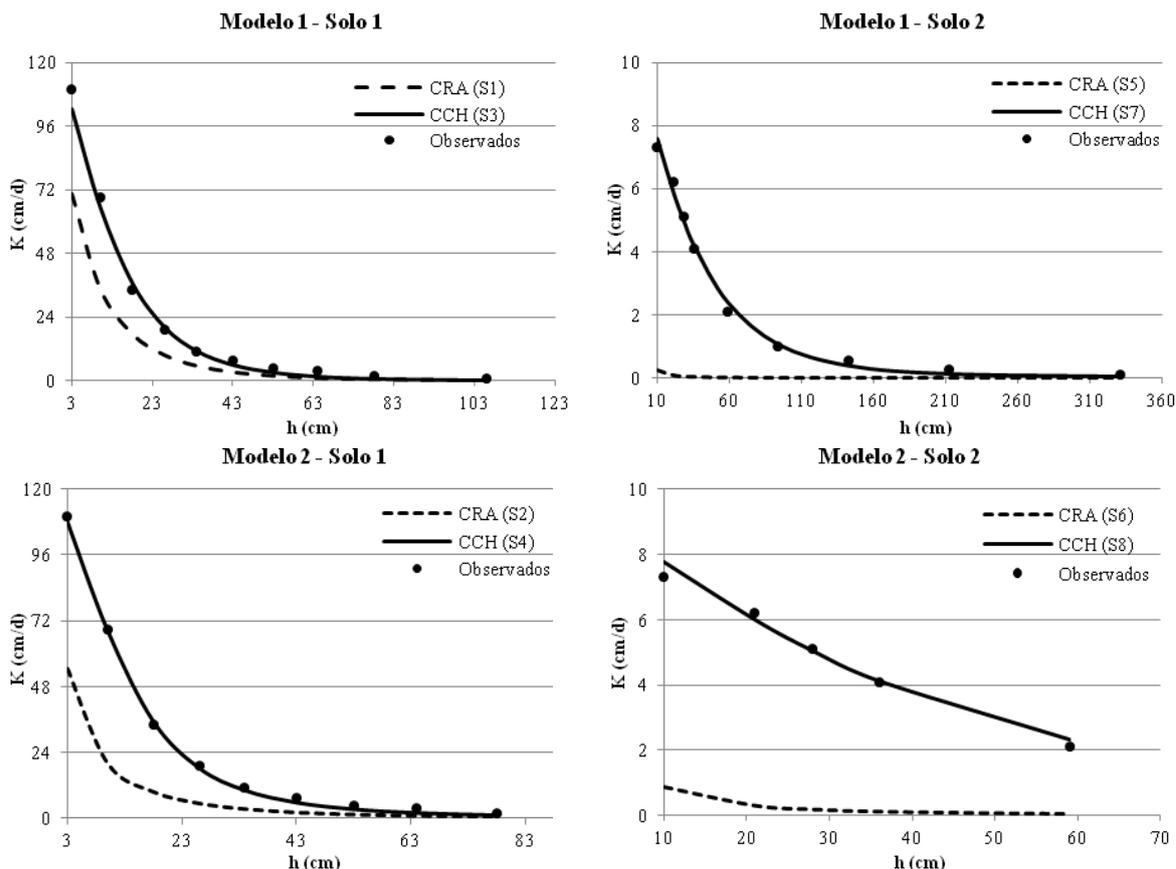


Figura 2. Resultados da aplicação dos modelos 1 e 2 com os parâmetros ajustados a partir de diferentes bases de dados.

Convergência ao valor da condutividade hidráulica saturada

A seguir são apresentados na Tabela 4 os resultados relacionando o número de termos (k) utilizados na série infinita representada pela equação (5) com a convergência do modelo 2 aos valores de condutividade hidráulica saturada.

Nota-se que quando somente os dados da curva de retenção foram considerados no ajuste dos parâmetros, resultou que K_{sat} para os solos 1 e 2 divergiu dos valores observados de 120 cm/d e 9,5 cm/d, respectivamente. Tal resultado já era esperado, uma vez que desses ajustes resultaram valores de n próximos de 1 ($< 1,6$), e, portanto, fora do intervalo para o qual os termos da função de Cauchy foram obtidos (no caso, em S2 e S6).

Tabela 4. Convergência ao valor da condutividade hidráulica saturada em função do número de termos na série infinita (modelo 2).

SOLO 1										
	CRA					CCH				
k	1000	2000	3000	4000	5000	1000	2000	3000	4000	5000
K_s	202,3	229,2	244,7	255,5	263,8	118,1	118,6	118,8	118,9	119,0
n_{at}	24	08	01	60	97	36	19	24	43	23
SOLO 2										
	CRA					CCH				
k	1000	2000	3000	4000	5000	1000	2000	3000	4000	5000
K_s	24,94	28,65	30,87	32,45	33,69	9,291	9,359	9,388	9,406	9,417
n_{at}	4	7	0	5	2					

Para os casos em que também foram considerados os dados de condutividade hidráulica no ajuste, a convergência para o valor de K_{sat} ocorreu. Para esses casos (S4 e S8), os valores de n são ligeiramente maiores que 2, e, portanto, dentro do intervalo para o qual os termos da função de Cauchy foram obtidos. Esses resultados indicam que o parâmetro n foi mais decisivo do que o número de termos utilizados na equação (5). Para a base de dados identificada por CCH, os valores de K_{sat} para $k = 1000$ e $k = 5000$ apresentaram diferenças relativas de apenas 0,74% e 1,34% para os solos 1 e 2, respectivamente.

Desempenho dos modelos - índices estatísticos

A avaliação do desempenho dos modelos feita a partir da visualização dos gráficos só permitiu a comparação dos modelos entre si. Posteriormente, a avaliação foi realizada de forma mais consistente, com base nos coeficientes RMSE e COE. Dessa forma, foi verificada a capacidade dos modelos em reproduzirem os dados obtidos experimentalmente. Esses coeficientes, descritos anteriormente, têm seus valores apresentados na Tabela 5, onde M_1 = modelo 1 e M_2 = modelo 2.

Tabela 5. Índices estatísticos para avaliação do desempenho dos modelos 1 e 2 na estimativa dos valores de condutividade hidráulica

	SOLO 1				SOLO 2			
	CRA		CCH		CRA		CCH	
	RMSE*	COE	RMSE	COE	RMSE	COE	RMSE	COE
M₁	12,8274	0,7915	2,1600	0,9941	3,0005	-0,4603	0,1459	0,9965
M₂	18,3230	0,5745	0,6293	0,9995	2,8440	-0,3120	0,1498	0,9964

* cm/d.

Como já identificado visualmente, os valores dos índices para o modelo 2, considerando os solos 1 e 2 e a base CRA, demonstraram seu fraco desempenho nesses casos. No caso do solo 1 pode-se salientar o alto valor de RMSE (18,323 cm/d) e o valor relativamente baixo de COE (0,5745). No caso do solo 2 o valor negativo de COE indica que os dados observados são melhor representados por sua média do que pelo modelo. Já o modelo 1 também apresentou um desempenho insatisfatório quando da reprodução dos valores observados.

No caso do solo 1 esse comportamento fica caracterizado pelo alto valor de RMSE (12,5025 cm/d) e no caso do solo 2 pelo valor negativo de COE. No modelo 1 isso decorre da sua precariedade em representar valores de condutividade hidráulica próximos à saturação, notadamente quando n é próximo de 1. Já para o modelo 2 os valores ajustados de n se situaram fora do intervalo para o qual foi derivada a equação (7). Esses resultados evidenciam que ambos os modelos são sensíveis a valores do parâmetro n próximos à unidade.

No entanto, quando a base de dados foi acrescida dos valores de condutividade hidráulica os modelos se mostraram satisfatórios. O modelo 2 foi superior quando aplicados ao solo 1 (menor RMSE) e se mostraram muito semelhantes quando aplicados ao solo 2. Esses resultados são atribuídos aos valores de n , agora próximos de 2, e à possibilidade de ajustar o parâmetro λ .

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o desempenho do modelo de condutividade hidráulica de van Genuchten-Mualem na sua versão original (van Genuchten, 1980), na qual a dependência dos parâmetros m e n quando do ajuste é uma imposição, e na sua versão mais recente (Dourado Neto et al., 2011), na qual o ajuste dos parâmetros m e n é flexibilizado.

De forma geral os modelos apresentaram comportamentos semelhantes. A flexibilização proporcionada pelo modelo 2 quando do ajuste dos parâmetros m e n não acrescentou qualidade aos seus resultados.

A qualidade dos resultados de ambos os modelos se mostrou dependente dos valores do parâmetro n , e foi insatisfatória para valores de n próximos de 1. Essa dependência foi confirmada quando se avaliou a convergência do modelo 2 aos valores de condutividade hidráulica saturada com base no número de termos considerados na equação 5.

Ambos os modelos se mostraram dependentes da base de dados, na medida em que melhoraram seus desempenhos com a inclusão de dados medidos de condutividade hidráulica na etapa de ajuste dos parâmetros. No entanto, essa melhora também está associada aos valores de n e não somente à possibilidade de ajustar o parâmetro λ a partir da inclusão de dados de condutividade hidráulica na base de dados.

Os valores de R^2 foram todos muito próximos de 1 (valor ótimo), mesmo quando os modelos de condutividade hidráulica foram insatisfatórios. Como nesses casos a base de dados utilizada no ajuste foi restrita aos dados da curva de retenção, o modelo que a representa (equação 1) não foi sensível a valores de n próximos de 1. Isso implica que ajustes da curva de retenção plenamente satisfatórios não foram transferidos para os modelos de condutividade hidráulica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGESSEN, C. D.; JACOBSEN, O. H.; HANSEN, S.; SHAAP, M. G. Soil hydraulic properties near saturation, an improved conductivity model. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v. 324, p. 40-50, 2006.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. Hydraulic Paper n.3. Colorado State University, Ft. Collins, CO, 1964. 27 p.

- BUNSRI, T.; SIVAKUMAR, M.; HAGARE, D. Simulation of Water and Contaminant Transport Through Vadose Zone - Redistribution System. In: ELANGO, L. **Hydraulic Conductivity - Issues, Determination and Applications**. Rijeka: InTech, 2011. p. 395-418.
- BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore size distribution data. **Journal of Petroleum Technology**. v. 5, n. 3, p. 71-78, 1953.
- DOURADO NETO, D.; van LIER, Q. J.; van GENUCHTEN, M. T.; REICHARDT, K.; METSELAAR, K.; NIELSEN, D. R. Alternative Analytical Expressions for the General van Genuchten-Mualem and van Genuchten-Burdine Hydraulic Conductivity Models. **Vadose Zone Journal**, Madison, WI, v. 10, n. 2, p. 618-623, 2011.
- HANKS, R. J. Estimating Infiltration from Soil Moisture Properties. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, Iowa, USA, v. 20, p. 49-51, 1965.
- HUTSON, J. L.; CASS, A. A retentivity function for use in soil water simulation models. **Journal of Soil Science**, Oxford, UK, v. 38, n. 1, p. 105-113, 1987.
- IPPISCH, O.; VOGEL, H. -J. & BASTIAN, P. Validity limits for the van Genuchten-Mualem model and implications for parameter estimation and numerical simulation. **Advances in Water Resources**, Berlin: Heidelberg, v. 29, n. 12, p. 1780-1789, 2006.
- JARVIS, N. MACRO - A Model of Water Movement and Solute Transport in Macroporous Soils. Stockholm: Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Soil Sciences. Reports and Dissertations 9, 1991. 58 p.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, DC., v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.
- PINHEIRO, A. & TEIXEIRA, L. P. Estimativa das Curvas de Condutividade Hidráulica e de Retenção a Partir de Características físicas do Solo. **Revista de Estudos Ambientais**, Blumenau, SC., v. 11, n. 1, p. 44-50, 2009.
- ROSSI, C. & NIMMO, J. R. Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness, **Water Resources Research**, Washington, DC., v. 30, n. 3, p. 701-708, 1994.
- SCHAAP, M. G. & van GENUCHTEN, M. T. A Modified Mualem-van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation. **Vadose Zone Journal**, Madison, WI, v. 5, n. 1, p. 27-34, 2005.
- van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, WI, v. 44, p. 892-898, 1980.
- van GENUCHTEN, M. T. & NIELSEN, D. R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annales Geophysicae**, Katlenburg-Lindau, v. 3, n. 5, p 615-628, 1985.

van GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J. & YATES, S. R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Riverside, CA, 1991. 93p.

VOGEL, T., VAN GENUCHTEN, M.T. & CISLEROVA, M. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably saturated flow predictions. **Advances in Water Resources**, Berlin: Heidelberg, v. 24, n. 2, p. 133-144, 2000.