



MODELAGEM DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO COM USO DE UM ALGORITMO COMPUTACIONAL

Wagner Ávila Bombardelli¹, Eduardo Theodoro Fernandes², Elieser Lagos³, Nyara Grandó Borzi⁴, Laísa Scotti Antoniel⁵

RESUMO

No presente estudo, foram estabelecidas rotinas computacionais através de um algoritmo desenvolvido no compilador Microsoft Visual Basic 6® com o propósito de obtenção da curva de retenção de água no solo, buscando uma aproximação sobre os parâmetros fixos (α , n e m) impostos na equação de Van Genuchten. Foi então empregado o Método dos Mínimos Quadrados, cuja finalidade está na obtenção da função objetiva, sendo, posteriormente, aplicado o Método de Newton para resolução de sistemas não-lineares. Dessa forma, com os valores obtidos é determinada uma matriz inversa, que, multiplicada pelo negativo da matriz função, extrai-se os respectivos "n-ésimos" deltas (ajuste dos parâmetros) até que sua aproximação seja menor ou igual à 0,0001 ou realize 20 iterações, sendo o "passo" para o cálculo das derivadas previamente concebido como 0,001. Para chute inicial, foram estabelecidos os valores de α , n e m , respectivamente, de 0,03; 1,8 e 0,6. Com tais dados convergidos, se comparou com trabalhos prévios realizados na leitura do solo de Cidade Gaúcha/PR realizando a plotagem da curva. Há possibilidade no uso do algoritmo, de maneira satisfatória, para modelagem matemática sobre a equação de Van Genuchten.

Palavras-chave: umidade do solo, irrigação, parâmetros da equação

WATER RETENTION CURVE MODELING IN SOIL WITH A COMPUTER ALGORITHM USE

ABSTRACT

In the present study, was established through a computational routines developed algorithm in Microsoft Visual Basic 6® compiler with the purpose of to obtain the retention curve, seeking summarizing the fixed parameters (α , n and m) taxes in the equation of Van Genuchten. It was then employed the method of least squares, whose purpose is to obtain the objective function, and subsequently applied Newton's method for solving nonlinear systems. Thus, the values obtained is given an inverse matrix which, multiplied by the negative of the function matrix, extract the corresponding "n -th" deltas (parameter setting) until their approach is less than or

¹ Graduando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Maringá, wagneravila@agricola.eng.br

² Graduando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Maringá, edu_fernandes159@hotmail.com

³ Graduando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Maringá, elieserlagos@gmail.com

⁴ Graduando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Maringá, nyaraborzi@hotmail.com

⁵ Engenheira Agrícola, mestrandia em Ciências Agrárias pela Universidade Estadual de Maringá, lala_scotti@hotmail.com

equal to 0.0001, or perform 20 iterations, and the "step" in the method of previously derived designed as 0.001. To kickoff, the values of α , n , m was set, respectively, 0.03; 1.8 and 0.6. With such converged data, comparing with previous work in the reading soil of Cidade Gaúcha/PR performing plotting the curve. There is a possibility in the use of the algorithm, satisfactorily, for mathematical modeling of the equation of Van Genuchten

Keywords : soil moisture, irrigation, equation parameters

INTRODUÇÃO

Segundo Prado (2008), a produção agrícola sob irrigação, devido às exigências hídricas da cultura e ao cultivo em grandes extensões de terra, é um dos setores da cadeia produtiva que mais consomem água.

A presença de rotinas computacionais produz, mediante modelos matemáticos, a racionalidade no consumo da água aplicada. Na criação de um algoritmo que opere para a aproximação de valores, como o presente estudo, temos os fundamentos de programação coligados aos métodos iterativos abordados na competência de cálculo numérico. Ou seja, é um procedimento que se divide em duas partes: de manipulação com a leitura dos dados de entrada, seguido pelo processamento para os dados de saída. Utilizar modelos matemáticos para previsão de atributos da ciência do solo em particular os físico-hídricos, que são difíceis de determinar vem sendo uma ótima opção, pois contém um banco de dados para as variáveis pedológicas, as quais são difíceis de determinar diretamente em laboratório.

Tais variáveis levariam muito tempo para serem determinadas dentre as quais se destaca a determinação da curva característica do solo, que expressa a umidade em função do potencial matricial da água no solo (SALES et al., 1999; MELLO et al., 2002).

Levando em consideração as circunstâncias citadas anteriormente é de

grande importância a determinação rápida e precisa da curva característica do solo, o que se torna possível por meio de modelagem matemática. Encontra-se a oportunidade através de um modelo proposto para o estudo de caracterização dos solos: a curva de retenção de água no solo, também conhecida como curva característica de água no solo. Conhecer a retenção de água no solo é de suma importância para compreender a redistribuição de água, infiltração e disponibilidade de água às culturas, tendo em vista que sua determinação é demorada (WALCZAK et al., 2006). Levando isto em consideração a utilização de modelos matemáticos para estimar curvas de retenção de água para poupar tempo está sendo uma ótima alternativa.

A curva expressa a relação entre o conteúdo de água (em base de massa ou volume) e o potencial matricial da água no solo. O estudo sobre sua característica tem sido utilizado como elemento-chave para descrever o comportamento, prever e quantificar funções importantes dos solos não saturados, bem como a condutividade hidráulica e a resistência ao cisalhamento (ANDRADE et al., 2007). De acordo com Silva (2005), desde que manipulada adequadamente, a curva de retenção pode ser uma ferramenta muito útil às questões práticas da engenharia.

Percebendo a importância sobre a determinação da curva de retenção de água no solo, almeja-se aprofundar e estimular o desenvolvimento de rotinas computacionais que simplifiquem o estudo para os

mais distintos solos, de acordo com sua classificação taxonômica, estabelecendo uma padronização de suas características particulares através da equação de Van Genuchten (1980), com um amplo intervalo de amostras, de tal maneira que otimize o serviço e, conseqüentemente, a produção e qualidade em determinadas regiões.

O objetivo do presente estudo foi realizar a aproximação dos parâmetros de ajuste intrínsecos na equação de Van Genuchten (1980), com dados obtidos através de ensaios para a condição do solo de Cidade Gaúcha/PR.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente *software* “CR” foi gerado através do compilador Microsoft Visual Basic 6®, do qual dispõe da linguagem

BASIC orientada a objetos, sendo idealizado na Universidade Estadual de Maringá – UEM através do Campus do Arenito (Cidade Gaúcha/PR). Sua aplicabilidade se dirige à grande área de Irrigação, sendo este um assunto pertinente a ser estudado e aprimorado.

No procedimento, o usuário informa a umidade observada para cada potencial matricial distinto, gerando posteriormente, uma padronização dos parâmetros (α , n , m) utilizados na equação de Van Genuchten (1980), pois é necessário para a determinação e análise da curva de retenção. Os métodos numéricos realizam iterações até uma convergência quadrática, resultando na solução do problema, atingindo um erro admissível menor ou igual à 0,0001 ou suprindo 20 iterações.

Assim, a função objetiva para o ajuste dos parâmetros é dada por:

$$g(\alpha, n, m) = \sum_{i=1}^k \left[\theta_{obs_i} - \left[\theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot \psi_i)^n]^m} \right] \right]^2 \quad (1)$$

Em que,

α , n e m são os parâmetros de ajustes (decimal); k é o número de iterações que serão realizadas (decimal); θ_{obs_i} é umidade observada, referente a camada “i” ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$); θ_r é a umidade residual ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$); θ_s é a umidade de saturação ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$); Ψ_i é a potencial matricial observado referente a camada “i” (cm.c.a)

No emprego do Método de Newton para solucionar problemas de otimização de variáveis é necessária a derivada

segunda da função (SIMUNEK; HOPMANS, 2002). Para o ajuste dos parâmetros da curva de retenção, pelo modelo de Van Genuchten, é necessário desenvolver três expressões, obtidas derivando-se a função objetiva (equação 1) em relação aos parâmetros de ajuste (α , n , m), com o passo $\Delta=0,001$:

$$f_i = \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial x_i} \approx \frac{g(\mathbf{x} + e_i \cdot \Delta) - g(\mathbf{x} - e_i \cdot \Delta)}{2 \cdot \Delta} \quad (2)$$

Com $1 \leq i' \leq 3$; $\Delta = 0,001$

Dessa forma, em termos de álgebra

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial m_2} & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial n_3} \\ \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial m_2} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial n_3} \\ \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial m_2} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial n_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta m \\ \Delta n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1(\mathbf{x}) \\ -f_2(\mathbf{x}) \\ -f_3(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Calcula-se apenas os valores da diagonal pivotante, e os valores acima da diagonal principal, os quais podem ser calculados através das equações. A

resolução do sistema de equações apresentado na expressão a seguir é dada pela multiplicação entre a matriz inversa da jacobiana e a matriz oposta das funções.

$$\begin{pmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta n \\ \Delta m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d}{d\alpha} f_1(\alpha, n, m) & \frac{d}{dn} f_1(\alpha, n, m) & \frac{d}{dm} f_1(\alpha, n, m) \\ \frac{d^2}{d\alpha^2} f_2(\alpha, n, m) & \frac{d^2}{dn^2} f_2(\alpha, n, m) & \frac{d^2}{dm^2} f_2(\alpha, n, m) \\ \frac{d^3}{d\alpha^3} f_3(\alpha, n, m) & \frac{d^3}{dn^3} f_3(\alpha, n, m) & \frac{d^3}{dm^3} f_3(\alpha, n, m) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -F_1 \\ -F_2 \\ -F_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Para o cálculo da matriz inversa (J^{-1}) é necessário à determinação da matriz cofatora em primeiro lugar. Esta é composta pelos cofatores de todos os elementos da matriz principal. A seguinte matriz é determinada através do Desenvolvimento de Laplace, onde o cofator de cada elemento pode ser calculado da seguinte forma:

$$\Delta_{ij} = (-1)^{i+j} \det J_{ij} \quad (5)$$

Em que,

i é o elemento linha da matriz; e,
 j é o elemento coluna da matriz.

$$\Delta(J) = \begin{vmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \Delta_{13} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \Delta_{23} \\ \Delta_{31} & \Delta_{32} & \Delta_{33} \end{vmatrix} \quad (6)$$

O segundo passo para a elaboração da matriz inversa (J^{-1}) é o cálculo do determinante da matriz (J), dado também pelo desenvolvimento de Laplace, onde J é uma matriz de ordem três.

Devido a matriz ser simétrica, sua matriz adjunta é igual à cofatora, tendo que:

$$\Delta J^T = \text{Adj } J \quad (7)$$

Por fim, é possível calcular a matriz inversa (J^{-1}) da seguinte forma:

$$J^{-1} = \frac{1}{\det J} (\text{adj } J) \quad (8)$$

Após a determinação da matriz inversa, aplica-se a multiplicação entre esta e a matriz oposta das funções, obtendo assim os coeficientes de correção “ $\Delta\alpha$ ”, “ Δn ” e “ Δm ”.

São realizadas 20 iterações, ou, até que o erro entre as convergências seja menor ou igual a 0,0001 (será utilizada a condição que primeiro for satisfeita).

Os parâmetros são definidos por:

$$\alpha^{(k+1)} = \alpha^{(k)} + \Delta\alpha \quad (9)$$

$$n^{(k+1)} = n^{(k)} + \Delta n \quad (10)$$

$$m^{(k+1)} = m^{(k)} + \Delta m \quad (11)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, o usuário do software deve informar o número de amostras coletadas dentro de um intervalo previamente estipulado. Dessa forma, lhe é retornado os respectivos campos ordenados em uma nova janela, tal como representado abaixo pela Figura 1.

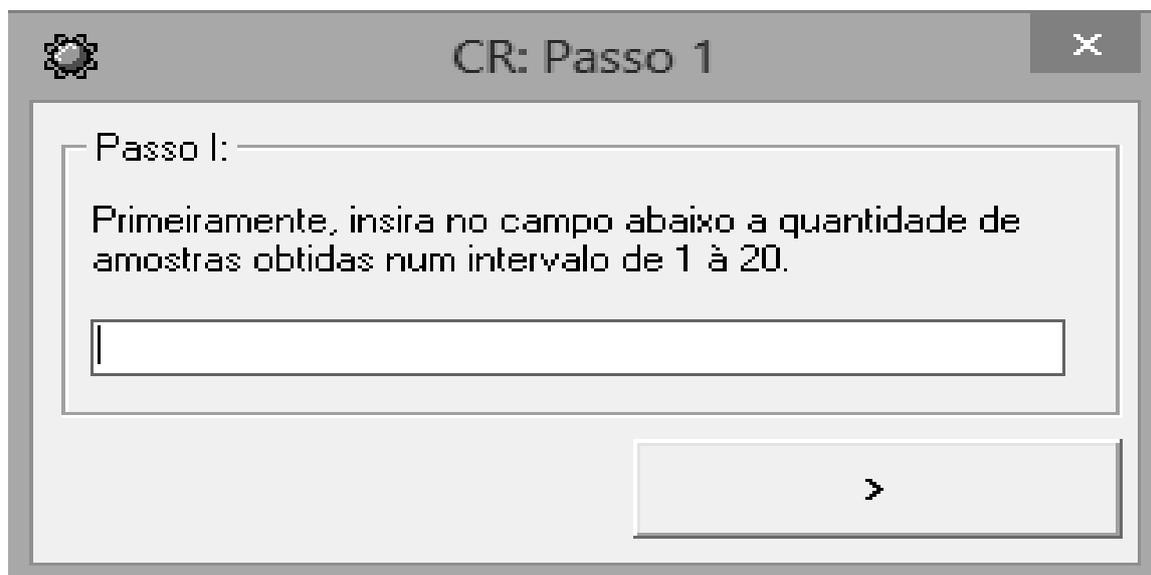


Figura 1 Tela inicial do programa

Posteriormente, aloca-se os dados do potencial matricial (ψ_m) e da umidade observada em base de volume (θ_{obs}) nos campos ditos (Figura 2), com isso tem-se os valores da umidade em base de volume

ajustada (θ) a partir dos parâmetros já ajustados (α , n e m).

Os dados em questão amostrados foram coletados em ensaio no Campus do Arenito – CAR, Cidade Gaúcha/PR.

CR: Passo 2-3

Novo Ajuda Sobre

UEM



Fórmula de Van Genuchten (1980):

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

Passo II:

Insira nos campos abaixo, os dados obtidos:
(cm.c.a.) (cm³/cm³)

Ψ	θ
0	0.311
20	0.262
40	0.241
60	0.218
80	0.148
100	0.132
300	0.104
1000	0.084
3000	0.076
10000	0.070
15000	0.066

Passo III:

Aproximação das const. de ajuste:		Função:	
α	0.03	-F1	-F1
n	1.8	-F2	-F2
m	0.6	-F3	-F3

Matriz Jacobiana:

11	12	13
21	22	23
31	32	33

Matriz Inversa:

11	12	13
21	22	23
31	32	33

Matriz Adjunta:

11	12	13
21	22	23
31	32	33

Parâmetros:

Determinante:

Parâmetros de convergência:

D1(A)

D2(N)

D3(M)

- Alpha:

Delta

Erro "A":

- N:

Delta

Erro "N":

- M:

Delta

Erro "M":

Calcular

Início

Umidade ajustada:

Com os parâmetros anteriormente definidos, tem-se os seguintes valores:

Ψ	θ
0	
20	
40	
60	
80	
100	
300	
1000	
3000	
10000	
15000	

Figura 2 Tela (com 11 amostras) para entrada de dados

O menu consta com três itens: Novo, Ajuda e Sobre. O botão Início alocado na direita retorna para a janela inicial onde se determina o número de amostras.

Este programa foi projetado para executar a equação dos mínimos quadráticos até realizar 20 iterações ou admitir um erro menor ou igual a 0,0001, como citado anteriormente a cada iteração realizada

tem-se um novo valor de α , n e m que serão somadas com o chute inicial, o qual fora pré-determinado para que o sistema entre em convergência, sendo os chutes iniciais iguais à: 0,03;1,8 e 0,6 respectivamente.

Na Figura 3, tem-se uma resolução do algoritmo retornando os dados aproximados.

MODELAGEM DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO COM USO DE UM ALGORITMO COMPUTACIONAL

Fórmula de Van Genuchten (1980):

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

Passo II:
Insira nos campos abaixo, os dados obtidos:
(cm.c.a.) (cm³/cm³)

Ψ	θ
0	0,311
20	0,262
40	0,241
60	0,218
80	0,148
100	0,132
300	0,104
1000	0,084
3000	0,076
10000	0,070
15000	0,066

Passo III:

Aproximação das const. de ajuste:

α	1,96025257718756E-02	-F1	1,54172424655407
n	1,7862386881234	-F2	1,35506229759344E-02
m	0,408101851778006	-F3	0,096335464505407

Matriz Jacobiana:

138,877451491203	0,198474289190435	4,49912292184492
0,198474289190435	0,014992617111451	6,27033713645015E-02
4,49912292184492	6,27033713645015E-02	0,569020841598402

Parâmetros:

Determinante: 0,424838965922962

Parâmetros de convergência:

D1(A) 9,61338155494738E-03
D2(N) 0,716694602358398
D3(M) 1,43132040042884E-02

- Alpha:
Delta 3,25160754528254E-02
Erro "A": 9,61338155494738E-03

- N:
Delta 2,49287773517718
Erro "N": 0,716694602358398

- M:
Delta 0,408101851778006
Erro "M": 1,43132040042884E-02

Umidade ajustada:
Com os parâmetros anteriormente definidos, tem-se os seguintes valores:

Ψ	θ
0	0,311
20	0,283278637763085
40	0,224087876093329
60	0,181664683345724
80	0,155358378186169
100	0,13629512666818
300	9,01090798647988E-02
1000	7,30926073931613E-02
3000	6,83197209307086E-02
10000	6,66815346431761E-02
15000	6,64511717559207E-02

Matriz Inversa

1,08262163785996E-02	0,398207749010655	-0,12948110850344
0,398207749010655	138,363149277024	-18,3954976308177
-0,12948110850344	-18,3954976308177	4,80827931523233

Matriz Adjunta

4,59939882604585E-03	0,169174168312197	-5,50086202431602E-02
0,169174168312197	58,7820572606954	-7,8151241911149
-5,50086202431602E-02	-7,8151241911149	2,04274441215207

Calcular
Início

Figura 3 Retorno dos valores após processamento

Retornando:

$$\alpha = 0,0196; n = 1,786; m = 0,408.$$

Pôde-se observar com auxílio de um macro gerado no Microsoft Excel®, estipulado por Prado (2008), no qual também engloba a linguagem BASIC (ambos são da corporação Microsoft®), que os valores obtidos são consideravelmente próximos ao esperado, confirmados pela prática, devendo ser levado em conta que, para cada iteração realizada, os parâmetros vão convergindo para os valores pretendidos e a

função segue reduzindo consecutivamente (Tabela 1).

Tabela 1 Ajustes dos parâmetros mediante macro gerado no Microsoft Excel®

Parâmetros de ajuste	
θ_{residual}	0,066
θ_{saturado}	0,311
alpha	0,026066748
n	1,829937079
m	0,558739227

Realizando um comparativo confrontando a umidade observada e ajustada, ainda no macro elaborado, obtém-se a seguinte relação, tal como exposto na Tabela 2:

Tabela 2 Comparativo com a umidade observada e ajustada, mediante mínimos quadrados, através de macro gerado no Microsoft Excel®

ψ (cm.c.a)	Θ_{obs} (cm ³ cm ⁻³)	Θ (cm ³ cm ⁻³)	$(\Theta_{obs}-\Theta)^2$
0	31,1	31,1	0
20	26,2	27,72638696	2,329857
40	24,1	22,8747501	1,501237
60	21,8	19,24427404	6,531735
80	14,8	16,7538406	3,817493
100	13,2	15,01338517	3,288366
300	10,4	9,553475222	0,716604
1000	8,4	7,472280735	0,860663
3000	7,6	6,884025768	0,512619
10000	7	6,682948865	0,100521
15000	6,6	6,654798594	0,003003
		SOMA	19,6621

Encontrou-se, em tal método com tais resultados, um coeficiente de correlação de $r^2=0,975398$. Onde, o

Tabela 4 Comparativo com a umidade observada e ajustada, mediante mínimos quadrados, através de macro gerado no VB6

ψ (cm.c.a)	Θ_{obs} (cm ³ cm ⁻³)	Θ (cm ³ cm ⁻³)	$(\Theta_{obs}-\Theta)^2$
0	31,1	31,1	0
20	26,2	28,3278638	4,5278
40	24,1	22,4087876	2,8602
60	21,8	18,1664683	13,2026
80	14,8	15,5358378	0,54146
100	13,2	13,8285127	0,39503
300	10,4	9,010908	1,92958
1000	8,4	7,3092607	1,18971
3000	7,6	6,8319721	0,58987
10000	7	6,6681535	0,11012
15000	6,6	6,6451172	0,00204
		SOMA	25,3484

módulo da diferença entre os parâmetros α , n e m encontrado, foi de respectivamente: 0,006464; 0,043698 e 0,1506373. Isto implica que a partir de um determinado número de iterações, os parâmetros irão convergir assumindo valores próximos aos valores de real convergência.

A seguir, segue a construção da tabela (Tabela 3) referente aos dados estipulados mediante algoritmo desenvolvido na plataforma VB6.

Tabela 3 Ajustes dos parâmetros mediante algoritmo gerado no VB6

Parâmetro de ajuste	
$\Theta_{residual}$	0,066
$\Theta_{saturado}$	0,311
α	0,019603
n	1,786239
m	0,408102

Novamente, realizando um comparativo confrontando a umidade observada e ajustada, entretanto, no algoritmo desenvolvido no VB6, obtém-se a seguinte relação, tal como exposto na Tabela 4:

MODELAGEM DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO COM USO DE UM ALGORITMO COMPUTACIONAL

Neste caso, quando comparado aos valores de literatura, obteve-se um coeficiente de correlação de $r^2=0,971820309$, indicando baixa variância e relativamente próximo ao outro macro comparado, corroborando aos dados existentes. Com tais dados obtidos na umidade ajustada ao refe-

rido potencial mátrico, obtém-se a curva de retenção, plotado através do Microsoft® Excel 2007, num intervalo de até uma tensão de 10000 cm.c.a. Os dados de umidade ajustada foram alocados em função do potencial mátrico em escala logarítmica, expressando a seguinte curva (Figura 4).

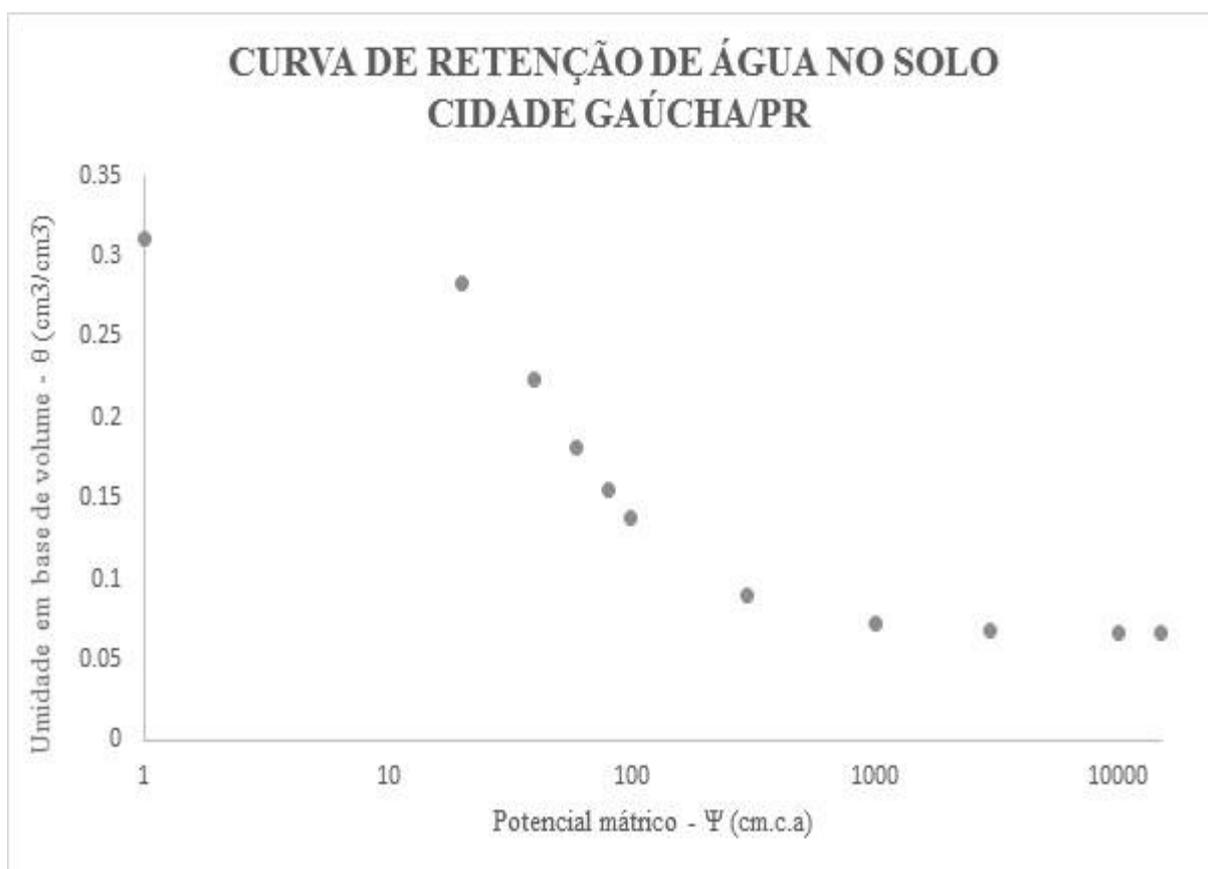


Figura 4 Plotagem da curva de retenção de água no solo, em escala logarítmica, em umidade ajustada

Com a umidade ajustada, se fez a entrada na planilha eletrônica do Soil Water Retention Curves - SWRC versão 3.0 beta (DOURADO et al., 2000), configurando os parâmetros aproximados obtidos através do algoritmo, e, assim, obtendo a curva de retenção plotada (Figura 5), ao

modelo de Van Genuchten (1980).

Ou seja, alocou-se a umidade de solo saturado (0,311) com a umidade residual (0,066), mais os parâmetros ajustados ($\alpha = 0,0196$; $n = 1,786$; $m = 0,408$), variando apenas o potencial mátrico, na dada equação.

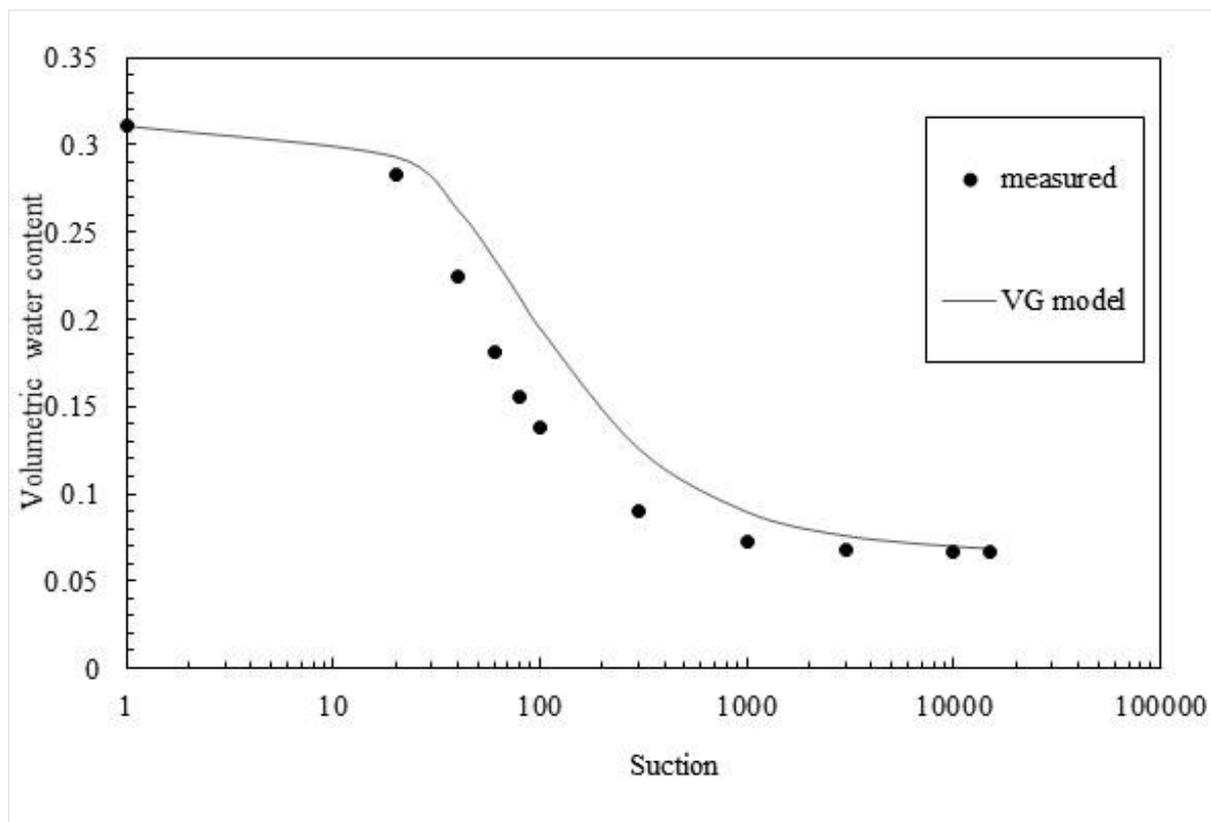


Figura 5 Plotagem da curva mediante software SWRC (DOURADO et al., 2000)

CONCLUSÃO

Há possibilidade no uso do algoritmo, de maneira satisfatória, para modelagem matemática sobre a equação de Van Genuchten. De acordo com os coeficientes de correlação, calculados entre a umidade observada e ajustada, há boa confiabilidade na representação da curva através da modelagem (valores próximos a 1).

Percebe-se o impacto causado pela textura predominante do solo em estudo (arenito Caiuá), condicionando uma relativa baixa capacidade de retenção de água no solo, pois prevalece a presença de macroporos em solos arenosos.

Por fim, há possibilidade no uso do algoritmo, de maneira satisfatória, para modelagem matemática sobre a equação de Van Genuchten

REFERÊNCIAS

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E.A.; MASCHIO R.; SILVA, E.M. **Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório.** Embrapa Meio-Norte, 2007,2p.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. & LOPES, P.P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo Van Genuchten: Soil Water Retention Curve, SWRC. Version 3,00 beta.** Piracicaba: USP, 2001

MELLO, C.R. de; OLIVEIRA, G.C. de; FERREIRA, D.F.; LIMA, J.M. de. **Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da microrregião Campos das Vertentes,**

MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n.9, p.1319-1324, 2002.

PRADO, G. Ajuste de parâmetros para a distorção da distribuição de água aplicada por canhões hidráulicos em condições de vento – Método da malha. **Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento**. Cap.4, p. 61-95. Lavras – MG, UFLA. 2008.

SALES, L.E.O.; FERREIRA, M.M.; OLIVEIRA, M.S.; CURI, N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.11, p.2091-2095, 1999.

SILVA, A. M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**.

São Carlos – SP. 2005.

HOPMANS, J.; ŠIMŮNEK, J.; ROMANO, N.; DURNER, W; Inverse Methods. **Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods**, (methodsofsoilan4), SSSA, Madison, 963-1008, 2002.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n. 5: p.892-898, 1980.

WALCZAK, R.T.; MORENO, F.; FERNANDEZ, E.; ARRUE, J.L. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. **Journal of Hydrology**, Zaragoza, v. 329, n. 3, p. 527-533, 2006.