

# AVALIAÇÃO DO AJUSTE DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DOS SOLOS A PARTIR DE TRÊS UMIDADES REPRESENTATIVAS

Marta Vasconcelos Ottoni<sup>1</sup>

**RESUMO:** As curvas de retenção de umidade assumem um papel importante na hidrologia de solos e nos projetos de irrigação e drenagem. Estas curvas podem ser representadas por diversas equações, sendo a de van Genuchten (VG) uma que frequentemente apresenta melhor desempenho estimativo. Nesta equação são estabelecidos 5 parâmetros de ajuste, dentre os quais dois podem ser assumidos com valores conhecidos,  $\theta_s$  (porosidade total) e  $n$  ( $n=1/(1-m)$ ). Sendo assim, vislumbra-se que apenas três pontos da curva de retenção sejam necessários para o ajuste dos parâmetros restantes, minimizando com isso o tempo dos testes laboratoriais e custos associados. Sugere-se neste trabalho que as umidades volumétricas utilizadas no referido ajuste sejam  $\theta(60\text{cm})$ ,  $\theta(330\text{cm})$  e  $\theta(15.000\text{cm})$ , estando entre parênteses a sucção de água. Foram determinados os parâmetros da equação de VG, a partir desses três pontos para 467 solos [Tomasella *et al.* (2003)], segundo um modelo de ajuste que considera a umidade residual ( $\theta_r$ ) menor que zero e resíduos nulos. Concluiu-se que apenas as três referidas umidades foram suficientes para estimar com boa acurácia (erro máximo absoluto de  $0,0044 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) a curva de retenção na faixa de sucção estudada (de 60 a 15.000cm).

**ABSTRACT** – The retention curves play an important role in soil hydrology and in irrigation and drainage projects. These curves can be described by several equations, the van Genuchten equation (VG) being one of them which frequently presents the best estimation performance. This equation has 5 fitting parameters and two among them can be assumed to be known,  $\theta_s$  (total porosity) and  $n$  ( $1/(1-m)$ ). Therefore, it might be predicted that only three points of the retention curve are needed for the fitting of the remaining parameters. This would minimize costs and time associated with laboratory tests. In this study it is suggested that the volumetric water content values used in the fitting procedure are  $\theta(60\text{cm})$ ,  $\theta(330\text{cm})$  and  $\theta(15.000\text{cm})$ , the in parenthesis variable being the water suction. The VG equation parameters were determined based upon these three water retention curve's points for 467 soils [Tomasella *et al.* (2003)], according to a fitting model, which considers null residues and negative residual water content values ( $\theta_r$ ). It was concluded that only the three above mentioned soil moisture values were sufficient to estimate accurately (maximum absolute error of  $0,0044\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) the retention curve in the studied suction range (from 60 to 15.000cm).

**Palavras-Chave:** hidrologia de solos, curva de retenção de água dos solos

---

<sup>1</sup> Pesquisadora em Geociência da CPRM. Av. Pauster, 404, Urca, Rio de Janeiro, RJ, 22290-240, Brasil

## INTRODUÇÃO

O solo é um complexo de partículas sólidas que quando agregadas forma uma estrutura porosa, por onde se processa o fluxo da solução de água e do ar. O movimento da solução aquosa nestes espaços vazios é governado pela equação de Darcy que calcula o fluxo hídrico como o produto da condutividade hidráulica do meio poroso pelo gradiente do potencial hidráulico da água no solo. Este potencial representa o estado de energia da água nos espaços vazios do solo, proveniente das forças gravitacionais e de pressão, essas últimas oriundas da interação da água com a matriz porosa. Desta forma, podemos definir o potencial hidráulico da água nos solos como uma composição do potencial gravitacional com o de pressão. Num solo não saturado, que é a condição de umidade<sup>1</sup> usual dos solos, o potencial de pressão é sempre negativo devido à incapacidade, nesses casos, da água percolar para cavidades atmosféricas, como um poço. Nessa situação, o denominamos como potencial matricial ou simplesmente sucção de água no solo. A relação deste potencial com a correspondente umidade volumétrica ( $\theta$ ) é chamada de curva de retenção ou característica de água do solo ( $\theta(h)$ ). Estas curvas assumem uma importância vital na hidrologia de solos por servir de subsídio para a modelagem hidrológica e por poder identificar de forma mais quantitativa, a estrutura porosa dos solos. Descrevem-se tais curvas em eixos cartesianos X,Y (Figura 1), onde normalmente a ordenada é representada pelo conteúdo volumétrico ( $\theta$ ), em  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ , e a abscissa, pela altura de sucção de água, em centímetro (h). Nesse caso, o seu formato assemelha-se a um S invertido suavizado, cujo limite superior e inferior do eixo de umidade são representados, respectivamente, pelo valor de umidade de saturação do solo ( $\theta_s$ ), o que corresponde a altura de sucção igual a zero, e pela umidade residual ( $\theta_r$ ), referente a um h tendendo a infinito.

Essas curvas são usualmente caracterizadas por duas faixas de  $\theta(h)$ , diferindo entre si pelos seus comportamentos físicos e pela relação umidade/sucção. A primeira faixa de  $\theta(h)$ , compreendida, de modo geral, entre  $\theta_s$  e  $\theta$  (60cm~6kPa), é representada por grandes variações de umidade para pequenas mudanças da altura de sucção h. Isso acontece, porque no ambiente quase saturado do solo, o líquido existente nos poros de maiores dimensões, denominados de macroporos, é facilmente drenado pela força gravitacional, segundo um pequeno aumento na sucção de água. Esses macroporos então, são os primeiros a se esvaziarem quando a sucção aumenta de valor, a partir da sucção nula, acarretando uma grande alteração relativa no conteúdo hídrico do solo. Após esse processo de drenagem dos macroporos, fortemente influenciado pelo gradiente gravitacional, inicia-se então o movimento do líquido no solo entre os seus menores capilares e microporos, sendo

---

<sup>1</sup> Umidade no solo também é chamada, por alguns autores, de conteúdo de água no solo.

regido prioritariamente pelo gradiente de pressão no meio poroso. Nesse caso, a expulsão de água dos microporos ocorrerá sob um dispêndio maior de energia, já que o movimento do fluido num meio de tão diminutas dimensões é um processo mais dificultoso. A esse último caso, corresponde a segunda faixa de  $\theta(h)$ , normalmente compreendida entre  $\theta(60\text{cm}\sim 6\text{kPa})$  e  $\theta(h=0)$ . Essa faixa, ao contrário da primeira, é representada por pequenas variações de umidades para grandes de sucção.

O trecho completo da curva de retenção é representado por expressões analíticas que relacionam os valores de conteúdo volumétrico com a sucção de água no solo, a partir de coeficientes empíricos, a serem determinados. Diversos modelos foram idealizados na tentativa de representá-la. As principais funções de retenção de água no solo são apresentadas na Tabela 2 do trabalho de Leij et al. (1997). Nesse estudo é feita uma descrição sumária e comparativa de 14 modelos de retenção, identificando a função 14, de van Genuchten (1980) (Equação 1), como uma das mais efetivas e utilizadas na descrição dos dados de retenção.

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} + \theta_r, \alpha \text{ (em unidade de pressão}^{-1}\text{); } m \text{ e } n \text{ (adimensionais)} \quad (1)$$

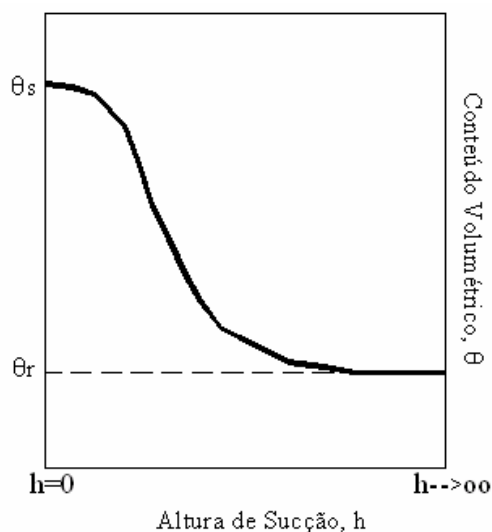


Figura 1 – Figura esquemática da curva de retenção de umidade. Os subscritos r e s representam respectivamente, a umidade residual e saturada de água no solo.

No Brasil, como em outros países, a equação de van Genuchten (VG) se mostrou satisfatória na estimativa da curva de retenção de umidade [Wösten e Van Genuchten (1988); Bachmann e Hartge (1991); Schaap e Bouten (1996); Scheinost *et al.* (1997); Schaap *et al.* (1998); Tomasella e Hodnett (1998); Minasny *et al.* (1999); Tomasella *et al.*(2000); Nemes *et al.* (2003); Sharma *et al.*(2006)]. Entretanto, nas faixas de sucções muito pequenas, abaixo de 40cm, a curva de retenção apresenta comportamento físico e relação umidade/retenção muito peculiares e diferenciados, em relação ao seu trecho inteiro, conforme já evidenciado anteriormente, que podem comprometer a

eficiência da Equação 1 na estimativa da curva nessas faixas da macroporosidade. Além disto, as curvas de retenção neste trecho tendem a se alterar ao longo do tempo, em função dos macroporos serem mais suscetíveis a deformações do que os microporos, principalmente nos horizontes superficiais de solo. Segundo o trabalho de Schaap e van Genuchten (2005), o modelo de van Genuchten (1980) é instável numericamente nas faixas de sucções muito baixas, sendo inclusive proposto uma alteração do mesmo a fim de lidar com esta questão. Neste sentido, conclui-se que a equação original de VG (Equação 01) deva ser aplicado apenas na faixa de sucções não muito baixas, enquanto que nas muito baixas sugere-se utilizar um modelo de  $\theta(h)$  que melhor incorpore as especificidades da macroporosidade [Schaap e van Genuchten (2005)].

A expressão analítica de umidade volumétrica originalmente proposta por van Genuchten (1980) é formada por 5 parâmetros de ajuste ( $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ) que podem ser determinados por métodos de otimização, tais como o dos mínimos quadrados, a partir do fornecimento de uma quantidade razoável de pontos de  $\theta(h)$ , que deverá ser igual ou maior ao número de parâmetros que se quer ajustar. Assim, se o ajuste for feito para os 5 parâmetros acima descritos, deverão ser fornecidos no mínimo 5 pontos medidos da curva de retenção. Os pontos dessa curva são determinados através de testes laboratoriais realizados em amostras indeformadas, preferencialmente, ou deformadas levantadas em campo. Na aplicação mais corriqueira da Equação 1,  $n$  é assumido como  $n=1/(1-m)$  e, frequentemente,  $\theta_s$  é definido como a porosidade total do solo, valor este comumente conhecido e estabelecido a partir de parâmetros do solo de usual determinação, que são as densidades do solo e das partículas. Considerando estas suposições, a equação de VG fica reduzida a três parâmetros de ajuste ( $\alpha$ ,  $m$  e  $\theta_r$ , onde  $0 < m < 1$ ), sendo, portanto, supostamente necessários, no mínimo, 3 pontos medidos da curva de retenção, além de  $\theta_s$ , para se realizar o referido ajuste. Desta forma, urge selecionar aquelas sucção de água, cujos  $\theta(h)$  correspondentes, além de suficientes para ajustar os 3 parâmetros da equação de VG, sejam representativos dos trechos principais da curva, a menos daquele compreendido nas sucções muito baixas.

Esse trabalho propõe um modelo de ajuste da equação de VG utilizando-se apenas três dados representativos de umidade do solo e faz uma validação do mesmo quando aplicado a outros dados de umidade. A proposta é motivadora no sentido de diminuir a necessidade de se determinar em laboratório umidades a diversos valores de sucção, além de três representativas, o que traz economia de tempo e minimização dos custos nos levantamentos de solos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Base de dados

A base de dados utilizada neste trabalho faz parte de um conjunto de 838 solos, cuja descrição e localização em terrenos brasileiros podem ser vistas no trabalho de Tomasella *et al.* (2003). Este conjunto de dados, além de conter as propriedades físicas básicas dos solos, tais como, densidade do solo, porosidade total, textura e teor de matéria orgânica, possui geralmente o levantamento de 5 pontos da curva de retenção para as seguintes potenciais matriciais: -60cm, -100cm, -330cm, -1000cm e -15.000cm. Desse total de solos apenas 10 deles foram descartados por não possuir informações do  $\theta_s$  (9 solos) ou por haver inconsistência nos valores de  $\theta(h)$  medidos (1 solo). Além disso, em 361 solos não foi determinado  $\theta(60\text{cm})$ . Assim, a base de dados do nosso estudo foi de 467 solos (838-10-361).

### Seleção dos $\theta(h)$ 's representativos da curva de retenção

Conforme anteriormente comentado, as curvas de retenção de umidade do solo são usualmente caracterizadas por duas faixas principais de  $\theta(h)$ : a) a de muito baixas sucções, assumidas entre  $\theta_s$  e  $\theta(60\text{cm}\sim 6\text{KPa})$ , correspondente a macroporosidade; b) a faixa entre  $\theta(60\text{cm})$  e  $\theta(15.000\text{cm})$ , relativamente à água adsorvida nos micro-espaços porosos; por este motivo, a literatura brasileira de solos designa  $\theta(60\text{cm})$  como a microporosidade do solo, sendo grandeza comumente obtida nos levantamentos de solos. Nesta segunda faixa, pode-se considerar uma sub-faixa definida entre  $\theta(60\text{cm})$  e  $\theta(330\text{cm}\sim 33\text{KPa})$  que pode expressar, aproximadamente, a quantidade de água prontamente disponível às plantas. Assim, em trechos da curva superior a sucção de 330cm deverão ser empreendidas diferenças mais expressivas de  $h$  para extrair um mesmo volume, obtido da aplicação de um menor diferencial de sucção na faixa compreendida entre  $\theta(60\text{cm})$  e  $\theta(330\text{cm})$ . Usualmente, considera-se que  $\theta(330\text{cm})$  representa um ponto da curva de retenção onde ocorre mudança da sua concavidade, entendendo-se que esta umidade corresponde, a uma propriedade físico-hídrica muito utilizada em projetos de irrigação, a capacidade de campo. Obviamente, essas informações são aproximadas, mas induzem que  $\theta(330\text{cm})$  seja uma umidade rotineiramente levantada em laboratório. Finalmente, o limite inferior da curva pode ser reproduzido por umidades a sucções muito altas, tais como a da sucção a 15.000cm, que é assumido pela engenharia de irrigação como o nível inferior de disponibilidade de água às plantas. Esta umidade é denominada de ponto de murcha permanente (PMP), sendo também frequentemente caracterizada no levantamento de solos. A relação entre a umidade a 33Kpa e o PMP define o que usualmente se designa como sendo a quantidade de água máxima disponível para as plantas. O interesse em se estudar a faixa de umidade a sucções superiores a 15.000cm

(1.500Kpa) é menor, pois apenas se aplica a condições de solos extremamente secos, o que corresponderia ao caso de manejo não irrigado de solos em climas áridos ou semi-áridos.

Com base no exposto, espera-se que as umidades nas sucções à 6Kpa, 33Kpa e 1500Kpa sejam, aproximadamente, características dos pontos de  $\theta(h)$  onde há mudança de comportamento de traçado, a fim de que as curvas estimadas a partir destas sejam representativas da faixa de sucção estudada (60 a 15.000cm). Além da sua influência na estimativa da curva de retenção, essas umidades, bem como as diferenças definidas entre elas:  $\theta_s - \theta(60\text{cm})$ ;  $\theta(60\text{cm}) - \theta(330\text{cm})$  e  $\theta(330\text{cm}) - \theta(15.000\text{cm})$  possuem significados físico aproximados de importância para projetos de irrigação e drenagem, reforçando assim a necessidade no levantamento dessas informações. Neste trabalho chamaremos  $\theta_1 = \theta(h_1) = \theta(60\text{cm})$ ,  $\theta_2 = \theta(h_2) = \theta(330\text{cm})$ ,  $\theta_3 = \theta(h_3) = \theta(15.000\text{cm})$ , como pontos representativos de ajuste e  $\theta_4 = \theta(h_4) = \theta(100\text{cm})$ ,  $\theta_5 = \theta(h_5) = \theta(1.000\text{cm})$  com pontos de validação.

### Descrição do modelo de ajuste dos parâmetros

O modelo de ajuste dos parâmetros de VG utilizado neste trabalho visa estimar curvas de retenção que passem em cima dos pontos representativos ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$ ), considerando, para tanto, as seguintes suposições: a)  $\theta_r$  pode assumir valores negativos (até -15%), a fim de aperfeiçoar este ajuste; b) o parâmetro  $\theta_s$  é assumido como conhecido e tomado como sendo a porosidade total; c) Tomando o formato do modelo de VG que considera  $n=1(1-m)$ ,  $0 < m < 1$ , e normalizando  $\theta$  a partir da variável adimensional  $W$  ( $0 < W < 1$ ) definida pela Equação 2:

$$W = (\theta(h) - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r), \quad (2)$$

chega-se a

$$h = \frac{(W^{-1/m} - 1)^{1-m}}{\alpha} \quad (3)$$

Assim, utilizando a Equação 3 e chamando  $W_1 = W(\theta_1)$ ,  $W_2 = W(\theta_2)$ , demonstra-se a Equação 4:

$$(W_1^{-1/m} - 1)^{1-m} = \frac{h_1}{h_2} (W_2^{-1/m} - 1)^{1-m} \quad (4)$$

Os parâmetros da equação de VG são ajustados a partir de iterações do valor de  $\theta_r$ , sendo a solução alcançada quando a diferença entre os  $\theta_r$ 's [ $\theta_r$  inicial -  $\theta_r'$  (Equação 5)] de uma mesma iteração for muito próximo de zero. Abaixo são descritos os passos para o ajuste dos parâmetros de VG para cada iteração de  $\theta_r$ .

## **Iteração i**

**Passo 01:** Estabelecer  $i=1$

**Passo 02:** Estabelecer o valor inicial para os parâmetros  $m$  e  $\theta_r$  e  $\alpha$ , considerando

$$\alpha = \frac{(W_1^{-1/m} - 1)^{1-m}}{h_1} \quad (\text{Equação 03})$$

e que os valores de  $\theta_1$  ( $\theta(h_1)$ ),  $\theta_2$  ( $\theta(h_2)$ ) e  $\theta_3$  ( $\theta(h_3)$ ) de um determinado solo são fornecidos. O valor inicial de  $m$  é 0,5 e o de  $\theta_r$  é definido com base na expressão  $\theta_3-i.0,0001$ . Se o valor de  $\theta_r$  for menor que  $-0,15\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  (ou  $-15\%$ ), isto significa que em todas as iterações de  $\theta_r$  o modelo não conseguiu definir uma solução para os parâmetros.

**Passo 03:** Realizar iterações do valor de  $m$ , respeitando seus limites máximo (1) e mínimo (0), até que a identidade da Equação 4 seja alcançada, assumindo um erro absoluto de 0,00005.

**Passo 03:** Após a obtenção de  $m$ , são calculados automaticamente os outros parâmetros ( $\alpha$ ,  $n$  e  $\theta_r$ ), considerando a expressão de  $\alpha$  (Equação 3), apresentada no Passo 02, a de  $n=1/(1-m)$  e a de  $\theta_r$  estabelecida na Equação 5, abaixo, obtida a partir da Equação 2:

$$\theta_r' = \frac{\theta_3 - (W_3 \theta_s)}{(1 - W_3)} \quad (5)$$

,onde  $W_3 = ((1 + (\alpha.h_3)^n)^{-m})$  e  $h_3$  corresponde a valores de sucções muito altos, tais como o do PMP ( $h=15.000\text{cm}$ )

**Passo 04:** O valor de  $\theta_r'$  é então comparado com aquele  $\theta_r$  utilizado no início da iteração  $i$ . Se o sinal da diferença de  $\theta_r$  ( $\Delta\theta_r = \theta_r - \theta_r'$ ) da iteração  $i$  for diferente do da iteração anterior,  $i-1$ , realizar o Passo 6. Isto indica que é possível definir um valor para o par de parâmetros  $\alpha$  e  $m$  correspondente a  $\Delta\theta_r = 0$ , sendo esta a solução final. Se o sinal da diferença de  $\theta_r$  ( $\Delta\theta_r = \theta_r - \theta_r'$ ) da iteração  $i$  for igual do da iteração anterior,  $i-1$ , realizar o Passo 05. Se  $i=1$  e  $\Delta\theta_{r_{i-1}} \leq 0,001\%$ , a solução dos parâmetros será aquela calculada na iteração 01.

**Passo 05:** realizar a operação  $i=i+1$  e retornar ao Passo 02

**Passo 06:** identificar qual o menor valor de  $\Delta\theta_r$  ( $\Delta\theta_{r_i}$  ou  $\Delta\theta_{r_{i-1}}$ ) e selecionar como solução dos parâmetros, aqueles definidos na iteração correspondente. Ir para o passo 7

**Passo 07:** Fim da iteração de  $\theta_r$ . Determinar os valores calculados de  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  a partir da Equação 1 (considerando  $n=1/(1-m)$  e  $\theta_s$  como sendo a porosidade total).

Na Figura 2 é definido o fluxograma do modelo proposto neste trabalho.

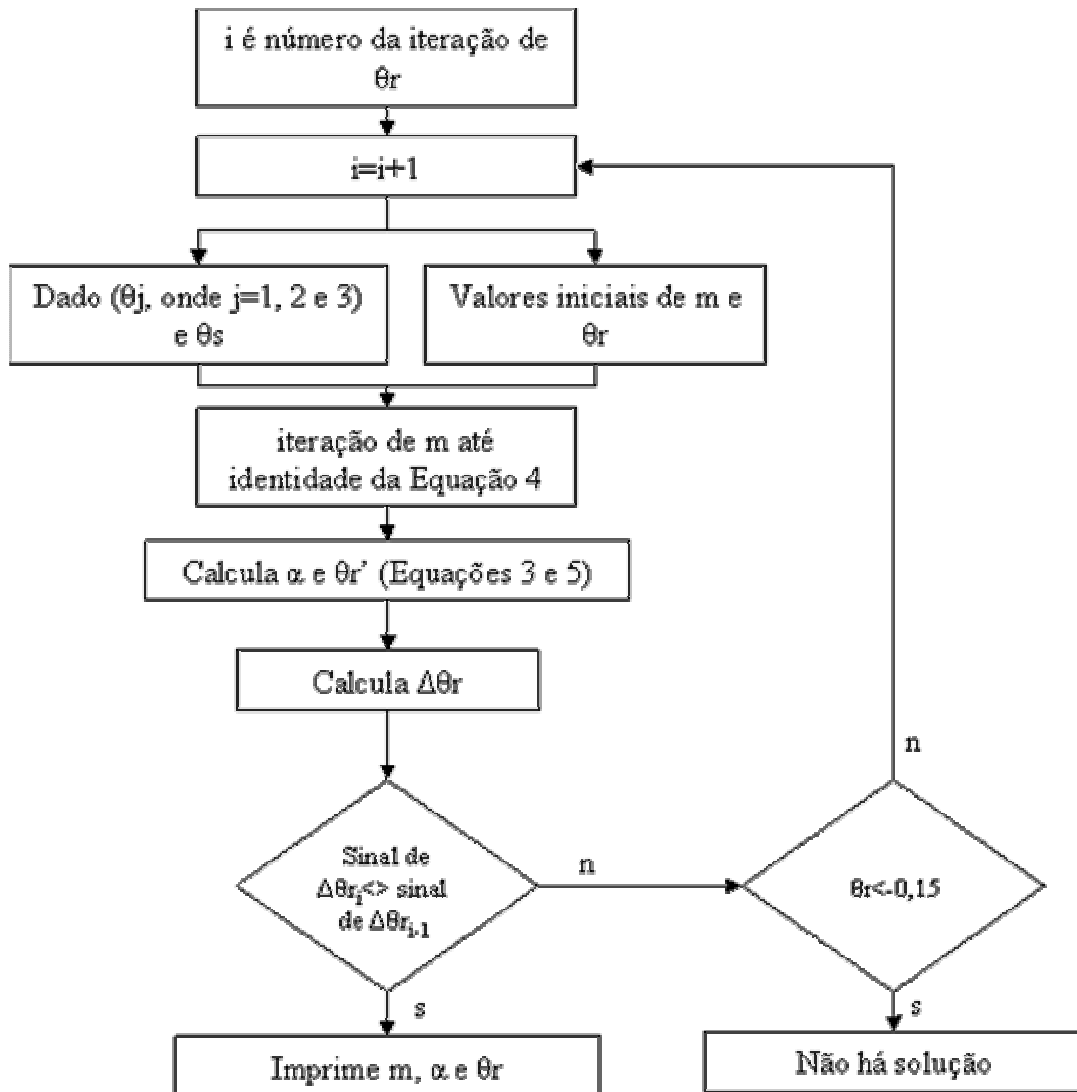


Figura 2 – Fluxograma do funcionamento do modelo de ajuste dos parâmetros da equação de VG

### Avaliação e Validação da Metodologia Proposta

A partir da determinação dos valores calculados de  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  e de sua comparação com os correspondentes valores estabelecidos em laboratório para todos os 467 solos deste trabalho, calculou-se o Erro Médio Quadrático (EMQ) nestes três casos, além dos daqueles pontos da curva de retenção ( $\theta(100\text{cm})$  e  $\theta(1000\text{cm})$ ) que não foram utilizados na estimativa dos parâmetros da equação de VG. Além disto, foram determinados para cada solo em todos os pontos da curva, o erro absoluto entre o  $\theta_j$  ( $j=1$  a  $5$ ) calculado e o correspondente medido, a partir do qual definiu-se o erro máximo absoluto dos 467 solos para cada um dos  $\theta_j$  ( $j=1$  a  $5$ ). Finalmente, foi estabelecido para cada solo, o EMQ dos dois valores estimados nos pontos de validação ( $\theta_4$  e  $\theta_5$ ) e com isso calculados sua média, mediana e o desvio padrão entre os 467 solos.



## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nas ilustrações das Figuras 3 e 4 foram realizadas comparações entre os  $\theta$  calculados (Umidade Volumétrica Estimada) para os 5 pontos da curva de retenção ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$ ,  $\theta_5$ ), segundo o modelo de ajuste de parâmetros apresentado neste trabalho, e o correspondente valor determinado em laboratório (Umidade Volumétrica Medida), a partir do qual foi possível definir o EMQ e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

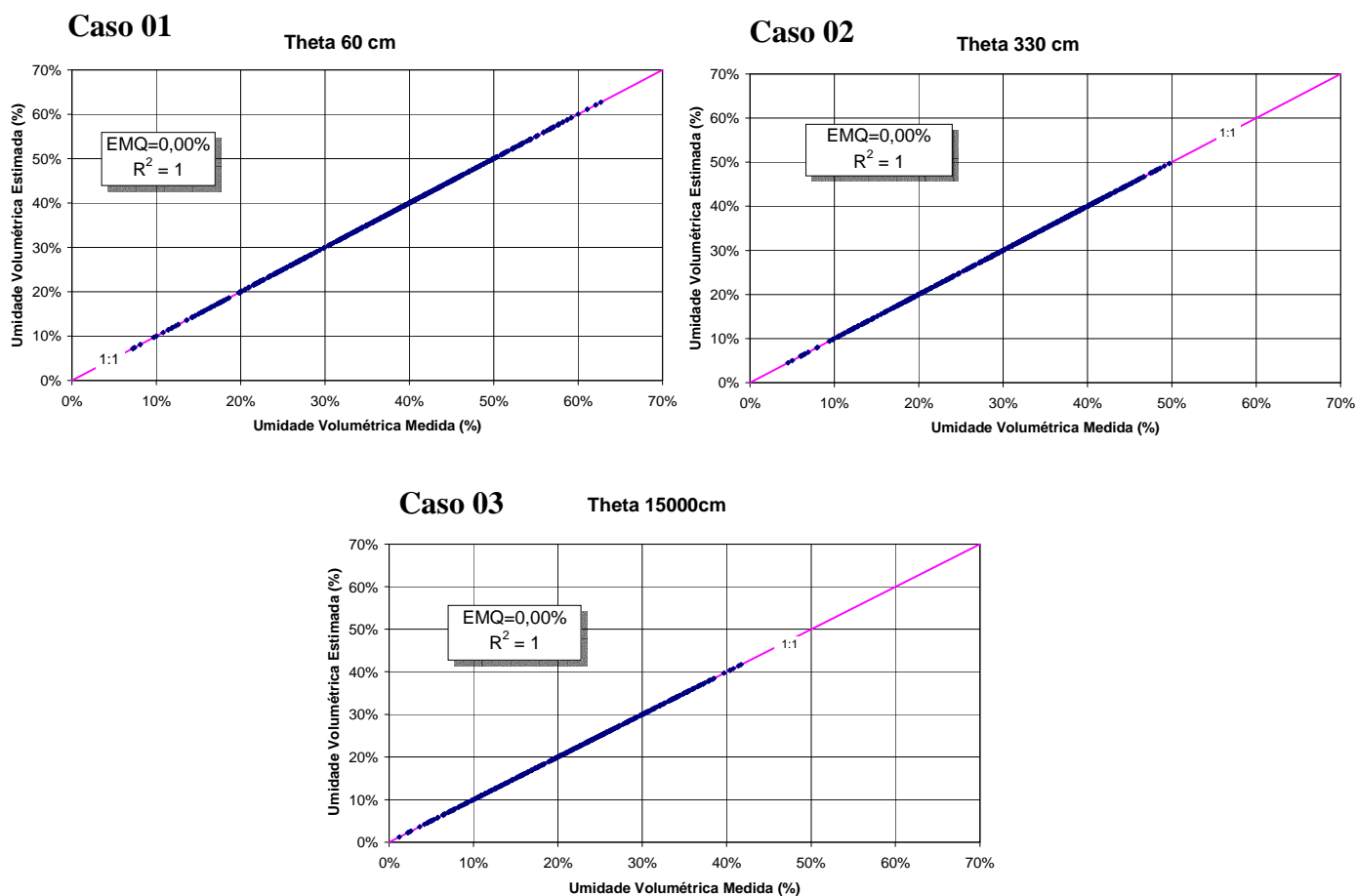


Figura 3 – Comparação entre os conteúdos de água calculados pelo modelo proposto no trabalho, com os correspondentes conteúdos de água determinados em laboratório nos pontos representativos da curva de retenção (N=467 solos).

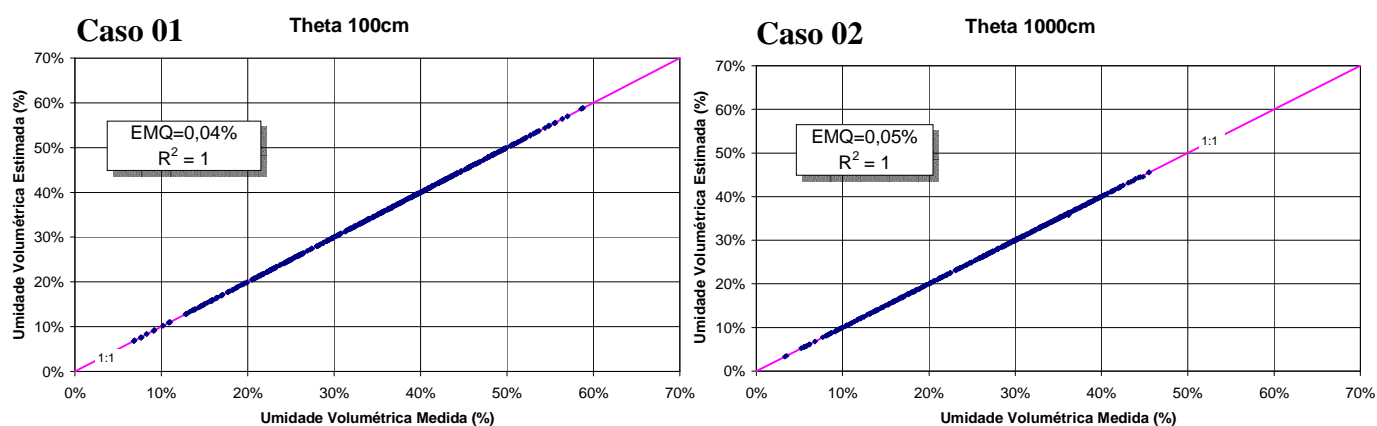


Figura 4 – Comparação entre os conteúdos de água calculados pelo modelo proposto no trabalho, com os correspondentes conteúdos de água determinados em laboratório nos pontos  $\theta(100\text{cm})$  e  $\theta(1000\text{cm})$  (N=467 solos)

Na Tabela 1 são apresentados os erros máximos absolutos para os cinco potenciais matriciais dos 467 solos deste trabalho, bem como a média, o desvio padrão e a mediana dos 467 EMQ's definidos por solo, a partir dos valores calculados nos pontos de validação ( $\theta(100\text{cm})$  e  $\theta(1000\text{cm})$ ).

Tabela 1 – Erro Máximo Absoluto para os cinco potenciais matriciais dos 467 solos, e média, desvio padrão e mediana dos EMQ's definidos individualmente por solo, segundo os valores calculados de  $\theta(100\text{cm})$  e  $\theta(1000\text{cm})$  (N=467 solos)

Conteúdo de Água Medido		Erro Máximo Absoluto
$\theta(60\text{cm})$		0,00%
$\theta(100\text{cm})$		0,10%
$\theta(330\text{cm})$		0,00%
$\theta(1000\text{cm})$		0,44%
$\theta(1500\text{cm})$		0,00%
EMQ dos valores calculados de $\theta(100)$ e $\theta(1000)$ por solo	Média	0,0381%
	Desvio Padrão	0,0228%
	Mediana	0,0359%

Percebe-se pelas ilustrações das Figuras 3 e 4 que os valores estimados de conteúdo de água em todos os solos nos cinco pontos da curva de retenção se ajustaram muito bem aos

correspondentes medidos em laboratório, principalmente naqueles que foram utilizados na calibração do modelo (Caso 1, 2 e 3 da Figura 3), onde praticamente não houve erro de estimativa. No que tange aos resultados do EMQ dos casos 1 e 2 da Figura 4, quando foram estimados  $\theta(100\text{cm})$  e  $\theta(1000\text{cm})$ , os resíduos foram bastantes pequenos, sendo o maior (EMQ= 0,05%) definido a partir dos valores calculados para  $\theta(1000\text{cm})$ .

Além disto, quando da análise da Tabela 1 evidencia-se que o erro máximo absoluto dos 467 valores calculadores em cada uma das três 3 tensões matriciais representativas (-60cm, -330cm e -15.000cm) foi também praticamente igual a zero, confirmando-se que a curva ajustada passa exatamente sobre os pontos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$ . No ponto  $\theta(100\text{cm})$  o erro máximo absoluto entre todos os solos, ainda que não nulo também foi muito pequeno. Entretanto, observa-se um erro máximo ligeiramente inferior a 0,5% para o ponto  $\theta(1000\text{cm})$  (0,44%), erro este considerado aceitável na estimativa de variáveis. Finalmente, a média dos EMQ's determinados individualmente por solo, a partir dos valores estimados nos pontos de validação ( $\theta(100\text{cm})$  e  $\theta(1000\text{cm})$ ), foi também muito próximo de zero (0,0381%) e de magnitude semelhante que à sua mediana (0,0359%), o que evidencia que a distribuição dos valores dos EMQ's individuais dos 467 solos é simétrica e próxima dos valores de sua média (0,0381%), já que o desvio padrão dessa distribuição também é diminuto (0,0228%).

Em suma, a determinação dos parâmetros de VG a partir de 3 pontos representativos da curva de retenção e do modelo aqui apresentado foi satisfatória na estimativa daqueles não utilizados na calibração do modelo. Isto indica que a curva estimada a partir destes pontos é representativa do trecho de interesse, no caso o compreendido entre  $\theta(60\text{cm})$  e  $\theta(15.000\text{cm})$ . Este fato é motivador, pois quanto menor for o número de  $\theta(h)$ 's necessário para realizar o ajuste dos parâmetros, menores serão os trabalhos de laboratório e a duração dos mesmos, bem como os custos associados. No entanto, outras repetições desta avaliação devem ser efetuadas em solos diversos, a fim de reforçar esta tese. Além disto, os resultados obtidos neste trabalho segundo o modelo de ajuste de parâmetros aqui proposto também devem ser comparados com os determinados a partir de outros modelos correspondentes, a fim de melhor avaliar sua qualidade de desempenho na estimativa dos parâmetros.

## CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que apenas três pontos representativos da curva de retenção ( $\theta(60\text{cm})$ ,  $\theta(330\text{cm})$  e  $\theta(15000\text{cm})$ ), além do  $\theta_s$ , são suficientes para a determinar com precisão o trecho de interesse da curva, compreendido entre  $\theta(60\text{cm})$  e  $\theta(15.000\text{cm})$ . Neste sentido, foram determinados para 467 solos brasileiros os parâmetros da equação de VG segundo um modelo de

ajuste dos mesmos, aqui proposto, a partir do qual foram estimados os valores de conteúdo volumétrico em cinco potenciais matriciais (-60cm, -100cm, -330cm, -1000cm e -15000cm). Os resultados foram os seguintes:

1) Nas umidades representativas utilizadas na calibração do modelo ( $\theta(60\text{cm})$ ,  $\theta(330\text{cm})$  e  $\theta(15.000)$ ) o ajuste foi perfeito, praticamente sem erros de estimativa. Nos pontos de validação ( $\theta(100\text{cm})$  e  $\theta(1000\text{cm})$ ) esses erros ainda que não nulos, foram muito pequenos, geralmente inferiores a 0,05% de umidade. O erro máximo absoluto encontrado foi de 0,44%, verificado para os valores calculados de  $\theta(1000\text{cm})$ ;

2) A média dos EMQ's calculados individualmente por solo definidos a partir dos valores estimados nos pontos de validação ( $\theta(100\text{cm})$  e  $\theta(1000\text{cm})$ ) foi também muito próxima de zero (0,0381%) e de magnitude semelhante que a da sua mediana (0,0359%). O desvio padrão dos valores dos EMQ's locais (0,0228%) indicou pequena dispersão dos mesmos em torno de sua média (0,0381%);

Com base nisto, conclui-se que a determinação dos parâmetros de VG a partir de 3 pontos representativos da curva de retenção ( $\theta(60\text{cm})$ ,  $\theta(330\text{cm})$  e  $\theta(15.000\text{cm})$ ) foi suficiente para estimar essa curva no seu trecho compreendido entre  $\theta(60\text{cm})$  e  $\theta(15.000\text{cm})$ . Visando reforçar esta tese, sugere-se aplicar a metodologia deste trabalho em outras situações pedológicas.

## **AGRADECIMENTOS**

A autora agradece ao pesquisador Javier Tomasella do INPE-CPTEC pela cessão dos dados utilizados neste trabalho, sem os quais não seria possível sua realização e ao Professor Theophilo Benedicto Ottoni Filho/UFRJ pela orientação acadêmica.

## **BIBLIOGRAFIA**

Bachmann, J., Hartge, K.H. (1991). Estimating soil water characteristics obtained by basic soil data – A comparison of indirect methods. Z. Pflansenernähr. Bodenkd. 155, 109-114.

Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press/USA.

Leij, F.J., Russell, W.B. e Lesch, S.M. (1997). “*Closed-form expression for water retention and conductivity data*”. Ground Water, v. 35, nº35, p. 848-858.

Minasny, B.; Mcbratney, A. B.; Bristow, K. L. (1999). “*Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves*”. Geoderma, Amsterdam, v. 93, p. 225-253.

Nemes, A., Schaap, M.G., Wösten, J.H.M. (2003). “*Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection*”. Soil Sci. Soc. Am. J. 67(4): 1093-1102.

Schaap, M. G. e Van Genuchten, M. T. H. (2005). “*A Modified Mualem-van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation*”. Vadose Zone Journal 5:27-34.

Schaap, M. G.; Leij, F. L.; Van Genuchten, M. T. H. (1998). “*Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties*”. Soil Science Society of America Journal, Madison, WI, v. 62, p. 847-855.

Schaap, M.G., Bouten, W. (1996). “*Modeling water retention curves f sandy soils using neural networks*”. Water Resour. Res. 32, 3033-3040.

Sharma, S.K., Mohanty, B.P. e Zhu, J. (2006). “*Including Topography and Vegetation Atributes for Developing Pedotransfer Functions*”. Soil Sci. Soc. Am. J. 70:1430-1440.

Tomasella, J. e Hodnett, M.G. (1998). “*Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia*”. Soil Sci., 163:190–202.

Tomasella, J., Hodnett, M.G. e Rossato, L. (2000). “*Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils*”. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:327–338.

Van Genuchten, M.Th. (1980). “*A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*”. Soil. Sci. Soc. Am. J., V. 44, pp. 891-898.

Wösten, J.H.M. e van Genuchten, M. Th. (1988). “*Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic properties*”. Soil. Sci. Soc. Am. J. 49: 1238-1244.