

# PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SOLO PARA AS DIFERENTES CLASSES TEXTURAIS

## SOIL HYDRAULIC PROPERTIES IN DIFFERENT SOIL TEXTURE CLASSES

Tiago Ramos<sup>1</sup>, M<sup>a</sup> Conceição Gonçalves<sup>1,2</sup>, José Casimiro Martins<sup>2</sup>,  
Fernando Pires<sup>2</sup> e Luis Santos Pereira<sup>1</sup>

---

### RESUMO

As propriedades hidráulicas apresentam uma grande variabilidade espacial devido à heterogeneidade do solo, sendo a textura um dos factores determinantes dessa heterogeneidade. Neste trabalho estudou-se a variabilidade da curva de retenção de água,  $\theta(h)$ , e da curva da condutividade hidráulica,  $K(h)$ , determinadas em solos de texturas diferentes e correspondentes a 11 das 12 classes texturais do diagrama triangular de Gomes e Silva (1962). Com base em 558 curvas  $\theta(h)$  e em 245 curvas  $K(h)$ , obtidas a partir de amostras não perturbadas e incluídas na base de dados PROPSOLO da Estação Agronómica Nacional, indicam-se, para cada classe, os valores médios, o desvio padrão, os valores máximos e mínimos de cada parâmetro do modelo de Mualem-van Genuchten. Indica-se ainda uma função  $\theta(h)$  e  $K(h)$  média para cada classe textural.

**Palavras chave:** condutividade hidráulica;

retenção de água no solo.

### ABSTRACT

Soil texture influences significantly soil hydraulic properties, which due to soil heterogeneity normally present large spatial variability. The variability of soil retention  $\theta(h)$ , and hydraulic conductivity  $K(h)$  curves, in 11 of the 12 texture classes of the diagram of Gomes e Silva (1962) was studied. For each textural class, average, maximum, minimum, and the standard deviation values for the Mualem van Genuchten parameters are presented based on 558  $\theta(h)$  and 245  $K(h)$  curves determined in undisturbed soil samples which are included in the PROPSOLO database of Estação Agronómica Nacional. An average function describing  $\theta(h)$  and  $K(h)$  in each textural class is also presented.

**Key-words:** hydraulic conductivity;

---

<sup>1</sup> CEER – Engenharia dos Biossistemas, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, E-mail: Tiago\_Ramos@netcabo.pt; <sup>2</sup> Estação Agronómica Nacional, Unidade de Ambiente e Recursos Naturais, L-INIA, Instituto Nacional de Recursos Biológicos, Quinta do Marquês, 2784-505 Oeiras.

PROPSOLO; soil water retention.

## INTRODUÇÃO

As propriedades hidráulicas do solo, nomeadamente as curvas de retenção da água no solo e da condutividade hidráulica, constituem a base de muitos estudos agronómicos e ambientais. A curva de retenção de água no solo,  $\theta(h)$ , relaciona teor de água volúmico da fase líquida do solo  $\theta$  com o potencial matricial ou pressão efectiva da água no solo  $(h)$ . A condutividade hidráulica,  $K(h)$ , é o factor de proporcionalidade entre o fluxo e o gradiente da carga hidráulica na equação de Darcy. As propriedades hidráulicas do solo são geralmente descritas através de modelos paramétricos, cujos parâmetros constituem os dados de entrada da maior parte dos modelos de simulação do movimento de água e de transporte de solutos na região vadosa do solo. De entre os vários modelos paramétricos existentes, o mais utilizado é o modelo de Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980), que relaciona o teor de água no solo,  $\theta$ , com a pressão efectiva,  $h$ , através de:

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left(1 + |\alpha h|^\eta\right)^m} \quad (1),$$

e a condutividade hidráulica,  $K$ , com a pressão efectiva,  $h$ , através de:

$$K(h) = K_s S_e^\ell \left[ 1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m \right]^2 \quad (2),$$

em que  $S_e$  é o teor de água efectivo [ $L^3L^{-3}$ ],  $\theta_r$  e  $\theta_s$  correspondem aos teores de água residual e na saturação [ $L^3L^{-3}$ ], respectivamente,  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada [ $LT^{-1}$ ],  $\alpha$  [ $L^{-1}$ ] e  $\eta$  [-] são parâmetros de ajustamento empíricos,  $m = 1 - 1/\eta$ , e  $\ell$  é um parâmetro

que descreve a conectividade/tortuosidade dos poros [-].

Embora de uso relativamente simples, muitos dos métodos laboratoriais e de campo utilizados para determinação das propriedades hidráulicas (Dane e Topp, 2002) são morosos, dispendiosos, bastante trabalhosos e limitados ao tamanho das amostras colhidas para o efeito, restringindo a sua utilização devido à heterogeneidade do meio. De facto, estas propriedades são afectadas pela textura e estrutura do solo, teor de matéria orgânica, fenómenos de expansão de argilas, dispersão de partículas, formação de crosta, concentração e composição iónica da solução de solo e ainda pelas práticas culturais, originando grande variabilidade espacial.

Para melhor compreender essa variabilidade espacial têm sido criadas internacionalmente, bases de dados que procuram reunir os estudos existentes, relacionando as propriedades hidráulicas dos solos com outras características do solo, nomeadamente, as suas propriedades básicas. Os exemplos mais relevantes são a HYPRES (*HYdraulic PROperties of European Soils*) (Wösten *et al.*, 1999), que reúne a informação existente na Europa, e a UNSODA (*UNsaturated SOil hydraulic DATabase*) (Nemes *et al.*, 2001), que reúne a informação existente produzida a nível mundial.

A partir da informação existente na base de dados UNSODA, Carsel e Parish (1988) e Schaap *et al.* (1998) publicaram os parâmetros médios do modelo de Mualem-van Genuchten para cada classe textural, segundo a classificação USDA. Para os limites da escala de Atterberg, recomendada pela Sociedade Internacional de Ciência do Solo e seguida pela Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo, essa informação não existe.

Este trabalho tem como objectivo estudar a variabilidade das propriedades hidráulicas dos solos portugueses em cada classe textural do diagrama triangular de Gomes e Silva

(1962), a partir da informação reunida na base de dados PROPSOLO (Ramos *et al.*, 2007) existente na Estação Agronómica Nacional (EAN).

## MATERIAL E MÉTODOS

### Esquema relacional da base de dados PROPSOLO

A base de dados PROPSOLO (PROPRiedades do SOLO) foi criada em 1997 com o objectivo de reunir a informação relativa às propriedades físicas, químicas e hidrodinâmicas dos perfis dos solos estudados no Departamento de Ciência do Solo (DCS) da EAN e que anteriormente se encontrava dispersa por diversas teses de doutoramento, trabalhos de fim de curso, artigos científicos e relatórios.

A primeira versão da base de dados PROPSOLO, constituída apenas por uma tabela relacional criada numa folha de cálculo, teve como finalidade desenvolver funções de pedo-transferência para a obtenção dos parâmetros do modelo de van Genuchten (van Genuchten, 1980) e de Gardner (Gardner, 1958) para as curvas  $\theta(h)$  e  $K(h)$ , respectivamente, a partir das propriedades básicas do solo (Gonçalves *et al.*, 1997). Agregava informação relativa a 230 curvas  $\theta(h)$  e 120 curvas  $K(h)$ , incluindo medições do teor de água a 11 pressões efectivas, entre -2.5 e -15848.9 cm de água, medições da condutividade hidráulica saturada e insaturada, granulometria, massa volúmica aparente, pH e matéria orgânica. Os perfis de solo eram classificados de acordo com Cardoso (1974) e segundo a classificação da FAO, então em vigor. O primeiro perfil incluído na base de dados datava de 1977. Uma segunda versão da base de dados foi desenvolvida pouco tempo depois, em que apenas se adicionaram os parâmetros de Mualem-van Genuchten

(Gonçalves *et al.*, 1999).

A terceira versão (Ramos *et al.*, 2007) teve como principal objectivo a georreferenciação de todos os perfis de solo existentes na base de dados. A informação contida na base de dados foi ainda alargada a outras propriedades físicas e químicas do solo. A PROPSOLO, para além das propriedades presentes na primeira versão, passou também a incluir: a porosidade total; os teores de carbonatos; os teores de azoto total, nítrico e amoniacal; os teores de fósforo e potássio; os teores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  extraíveis, solúveis e de troca; a condutividade eléctrica (CE); a razão de adsorção de sódio (SAR); a percentagem de sódio de troca (ESP); a capacidade de troca cationica (CTC) e os teores de cloretos (Cl) no solo. De modo a melhor organizar a informação nela contida, a PROPSOLO foi dividida em 8 tabelas relacionais (DISTRITO, CONCELHO, FREGUESIA, SOLO, HORIZONTE, FISICA, QUIMICA e HIDRODINAMICA). Dado o número significativo de perfis de solo que a base de dados já dispunha, foi também desenvolvido um *script* em SQL (*Structured Query Language*) de modo a permitir mais facilmente a consulta da informação pretendida através do sistema gestor de base de dados MySQL (versão 5.0). A PROPSOLO passou assim a utilizar um sistema gestor de distribuição gratuita e uma linguagem vulgarmente usada em grande parte das bases de dados (Henley, 2006). Apesar de usar um sistema gestor diferente, a PROPSOLO seguia os modelos das bases de dados internacionais dedicadas ao estudo das propriedades hidráulicas dos solos, nomeadamente a HYPRES (Wösten *et al.*, 1999) que foi desenvolvida no sistema gestor ORACLE, e a UNSODA (Nemes *et al.*, 2001), esta implementada em Microsoft Access. A PROPSOLO tornava-se ainda compatível com um Sistema de Informação Geográfica (SIG), devido à obrigatoriedade dos perfis nela incluídos estarem georrefe-

reenciados.

Em 2009 procedeu-se a nova reestruturação da informação disponível na base de dados, de modo a incluir, também, as metodologias utilizadas na determinação de cada propriedade do solo e que anteriormente vinham descritas em Ramos *et al.* (2007). Na prática, esta reestruturação do esquema relacional implicou a possibilidade de a PROPSOLO poder acolher, também, a informação relativa às propriedades físicas, químicas e hidrodinâmicas de perfis dos solos estudados noutros laboratórios e onde as metodologias utilizadas poderão diferir das utilizadas regularmente no DCS. O novo esquema relacional da base de dados PROPSOLO é apresentado na Figura 1.

O corpo principal da base de dados é com-

posto pelas tabelas SOLO e HORIZONTE. A tabela SOLO contém as referências de cada perfil de solo estudado, nomeadamente, a sua identificação, localização geográfica, data de amostragem, classificação do solo, referência bibliográfica onde os dados foram publicados e identificação do laboratório responsável por esses dados. A tabela HORIZONTE contém os limites, profundidade média e espessura de cada camada/horizonte. As duas tabelas estão interligadas entre si por uma multiplicidade de 1:n, ou seja, um perfil de solo pode conter um ou mais horizontes, mas um determinado horizonte faz apenas parte de um perfil de solo. A tabela HORIZONTE tem por isso, como chave estrangeira, a chave primária da tabela SOLO.

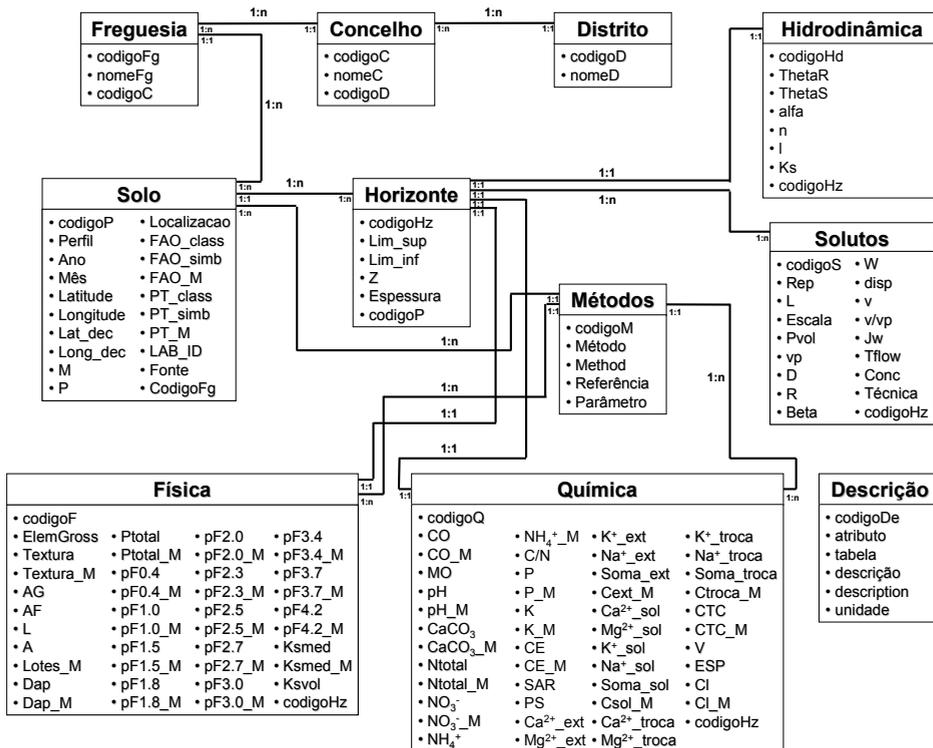


Figura 1 – Esquema relacional da base de dados PROPSOLO.

A tabela HORIZONTE está por sua vez associada às tabelas FISICA, QUIMICA e HIDRODINAMICA que agrupam as propriedades físicas, químicas e hidrodinâmicas de cada horizonte/camada, respectivamente. A tabela FISICA contém, assim, a granulometria, massa volúmica aparente, porosidade total, teores de água a diversas sucções e a condutividade hidráulica saturada de cada horizonte/camada. A tabela QUIMICA agrupa por sua vez os teores de carbonatos; os teores de azoto total, nítrico e amoniacal; os teores de fósforo e potássio; os teores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  extraíveis, solúveis e de troca; a CE; o SAR; o ESP; a CTC e os teores de Cl de cada horizonte/camada. A tabela HIDRODINAMICA reúne os parâmetros do modelo de Mualem-van Genuchten ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\ell$  e  $K_s$ ) que descrevem as curvas de retenção de água e da condutividade hidráulica de cada horizonte/camada. O tipo de ligação entre estas três tabelas e a tabela HORIZONTE é do tipo 1:1, isto é, cada camada/horizonte de solo é caracterizado apenas por um valor de uma determinada propriedade do solo (ex: massa volúmica aparente), assim como cada valor de uma determinada propriedade do solo diz respeito apenas a um determinado horizonte. São as tabelas FISICA, QUIMICA e HIDRODINAMICA que possuem como chave estrangeira, a chave primária da tabela SOLOS, para assim facilitar a remoção e actualização destas tabelas, alterações de campos e adição de novos atributos que venham a ser considerados de interesse.

Nesta nova versão, a base de dados tem ainda associada à tabela HORIZONTE, a tabela SOLUTOS que integra os parâmetros de transportes de solutos determinados em cada horizonte/camada de solo, nomeadamente, os coeficientes de dispersão (D) e de retardação (R) e a dispersividade (disp). Os parâmetros de transporte de solutos incluídos na base de dados foram obtidos de acordo

com os procedimentos experimentais descritos em Gonçalves *et al.* (2001). Contudo, esta tabela permite a inclusão de todas as metodologias utilizadas na determinação daqueles parâmetros tendo-se seguido para isso o modelo proposto por Vanderborght e Vereecken (2007). O tipo de ligação da tabela SOLUTOS à tabela HORIZONTE é do tipo 1:n permitindo também a inclusão dos valores de todas as repetições analisadas para cada horizonte/camada.

As tabelas SOLO, FISICA e QUIMICA estão ligadas à tabela METODOS permitindo a identificação das metodologias utilizadas na classificação dos solos ou na determinação das suas propriedades físicas e químicas. O tipo de ligação entre estas tabelas é do tipo 1:n uma vez que o mesmo método pode ser utilizado para mais do que uma propriedade do solo. Essas ligações fazem-se através das chaves estrangeiras identificadas na Figura 1 pelos atributos terminados na letra M.

Acessoriamente, a tabela SOLO está também associada à tabela FREGUESIA, que por sua vez está associada à tabela CONCE-LHOS, a qual está também relacionada com a tabela DISTRITOS. Estas tabelas com a divisão administrativa do país servem apenas para melhor localizar cada perfil de solo estudado, seguindo uma multiplicidade de 1:n. Finalmente, a tabela DESCRICAO contém a descrição, em português e inglês, de todos os atributos e tabelas incluídas na base de dados, não estando por isso associada a qualquer outra tabela relacional.

Todos os campos não preenchidos na base de dados PROPSOLO são representados pelo valor NULL. Esta situação é comum nas bases de dados de solos (Henley, 2006) e resulta de nem sempre ser possível realizar a amostragem de solo e/ou a respectiva análise laboratorial, ou ainda por o parâmetro correspondente a esse campo não ter sido avaliado nos estudos de solos em cujos objectivos não se incluía a obtenção desse parâmetro.

**Propriedades hidráulicas do solo**

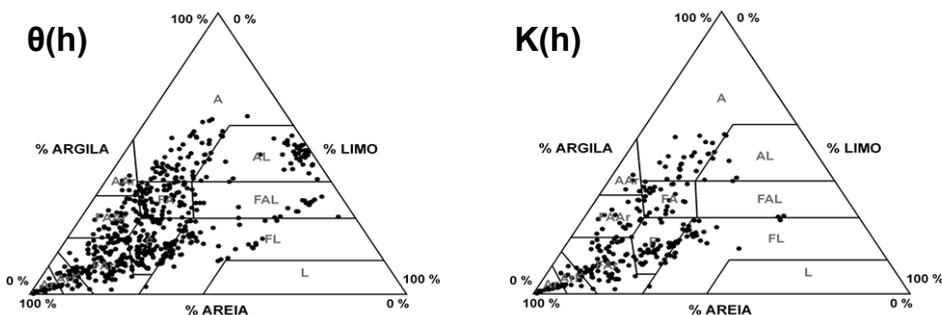
As curvas  $\theta(h)$  e  $K(h)$  existentes na tabela HIDRODINAMICA da base de dados PROPSOLO foram analisadas por classes texturais, segundo o diagrama triangular de Gomes e Silva (1962). Em cada classe textural foram considerados todos os tipos de horizontes que fazem parte da base de dados não se fazendo qualquer distinção entre camadas. Desta análise foram apenas retiradas as curvas  $\theta(h)$  e  $K(h)$  obtidas para os solos do Arquipélago dos Açores que, devido à presença de minerais de argila do tipo alofanas, apresentam características muito diferentes dos solos existentes em Portugal Continental, nomeadamente, a massa volúmica aparente que é muito baixa e a porosidade total e capacidade de retenção de água que são muito elevadas (Fontes *et al.*, 2004).

Para Portugal Continental, a PROPSOLO contém 558 curvas  $\theta(h)$  e 245 curvas  $K(h)$ , cuja distribuição por classes texturais é apre-

sentada na Figura 2. É importante referir que todas as curvas aqui analisadas foram determinadas em amostras no estado natural (não perturbadas). Também importa referir que a base de dados não contém solos de textura Limosa, uma vez que, até à data, tal classe textural nunca foi encontrada nos estudos conduzidos pelo DCS.

Para cada classe textural, determinaram-se os valores médios ( $x_m$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ), valores máximos (max) e mínimos (min) de cada um dos parâmetros do modelo de Mualem-van Genuchten disponíveis na base de dados.

Os valores de  $\theta$  e de  $K$  para as pressões efectivas de 0, -2.5, -10, -20, -50, -100, -200, -250, -500, -1000, -2000, -5000, -10000, -15000 e -16000 cm de água foram gerados a partir de cada curva parametrizada existente na base de dados. Calcularam-se os valores médios de  $\theta$  e de  $K$  em função de  $h$ , e respectivo desvio padrão, garantindo-se assim que todos os horizontes/camadas tinham o mesmo



Curva	Ar	ArF	FAr	F	FL	FAAr	FA	FAL	AAr	AL	A
$\theta(h)$	17	27	106	97	58	47	71	24	8	46	57
$K(h)$	13	17	65	43	29	19	24	3	4	5	23

**Figura 2** – Distribuição das curvas de retenção de água  $\theta(h)$  e da condutividade hidráulica  $K(h)$  no diagrama triangular de Gomes e Silva (1962). (Ar, Arenosa; ArF, Areno-Franca; FAr, Franco-Arenosa; F, Franca; FL, Franco-Limosa; FAr, Franco-Argilo-Arenosa; FA, Franco-Argilosa; FAL, Franco-Argilo-Limosa; AAr, Areno-Argilosa; AL, Argilo-Limosa; A, Argilosa).

numero de observações nos cálculos realizados. Com base nos valores médios de  $\theta$  e de  $K$  obtidos, utilizou-se o *software* RETC (van Genuchten, 1991) para estimar funções médias representativas de cada classe textural ( $\theta_{r\text{ classe}}$ ,  $\theta_{s\text{ classe}}$ ,  $\alpha_{\text{classe}}$ ,  $\eta_{\text{classe}}$ ,  $\ell_{\text{ classe}}$  e  $K_{s\text{ classe}}$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 apresentam-se os valores médios, desvio padrão, valores máximos e mínimos dos parâmetros de Mualem van Genuchten ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\ell$  e  $K_s$ ) para cada classe textural, de acordo com o diagrama triangular de Gomes e Silva (1962). No mesmo quadro apresentam-se, também, os valores médios dos parâmetros de Mualem van Genuchten por classe de textura estimados a partir das pressões efectivas impostas ( $\theta_{r\text{ classe}}$ ,  $\theta_{s\text{ classe}}$ ,  $\alpha_{\text{classe}}$ ,  $\eta_{\text{classe}}$ ,  $\ell_{\text{ classe}}$  e  $K_{s\text{ classe}}$ ). Estes parâmetros permitem obter uma função  $\theta(h)$  e  $K(h)$  média para cada classe de textura.

Os valores médios disponíveis na PROPSOLO para o parâmetro  $\theta_r$  variam entre 0.004 (FL – textura Franco-Limosa) e 0.087 (A)  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . Estes valores são contudo inferiores aos indicados por Carsel e Parish (1988) cujos valores se situavam entre 0.045 (Ar) e os 0.100 (AAr)  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , e também em relação a Schaap *et al.* (1998), cujos valores variam entre 0.049 (ArF) e 0.117 (AAr)  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . Tal deve-se ao facto de 66% dos horizontes presentes na base de dados PROPSOLO terem sido ajustados a um  $\theta_r$  de 0.000  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . Pela mesma razão, o parâmetro  $\theta_{r\text{ classe}}$  foi também de 0.000  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , para a maior parte das classes texturais.

Os valores médios para o parâmetro  $\theta_s$  variam entre 0.383 (FAAr) e 0.563 (A)  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , verificando-se uma tendência para o aumento de  $\theta_s$  das texturas ligeiras para as finas. O mesmo pode ser observado em Schaap *et al.* (1998), onde  $\theta_s$  aumenta de

0.375 (Ar) para 0.489 (L) e 0.457 (A)  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . No entanto, Carsel e Parish (1988) apresentam uma diminuição do parâmetro  $\theta$  das texturas mais finas ( $\theta_s = 0.38 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , na classe Argilosa) para as grosseiras ( $\theta_s = 0.43 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , na classe Arenosa). Os valores de  $\theta_s$  disponíveis na PROPSOLO são da mesma ordem de grandeza dos disponíveis nas bases de dados internacionais.

O parâmetro  $\alpha$  (valor médio) varia entre 0.049 (Ar) e 0.482 (A)  $\text{cm}^{-1}$ , não se observando, tal como em Schaap *et al.* (1998), qualquer tendência de aumento ou diminuição deste parâmetro em função do tipo de classe textural. Contudo, em Carsel e Parish (1988) essa tendência é clara, onde  $\alpha$  diminui das classes ligeiras ( $\alpha = 0.145 \text{ cm}^{-1}$  na classe arenosa) para as classes mais finas ( $\alpha = 0.008 \text{ cm}^{-1}$  na classe argilosa). O parâmetro  $\alpha_{\text{classe}}$  apresenta valores diferentes dos observados para os valores médios ( $x_m$ ), confirmando a dificuldade de representar uma classe textural com base naquele parâmetro.

O parâmetro  $\eta$  diminui das classes de textura grosseira ( $\eta = 2.05$  na classe Arenosa) para as classes de textura mais fina ( $\eta = 1.15$  na classe Argilosa), tal como reportado por Carsel e Parish (1988) e por Schaap *et al.* (1998).

O parâmetro  $\ell$  varia entre -0.48 (Ar) e -11.97 (FAL), o que revela o aumento da tortuosidade, como seria de esperar, das texturas grosseiras para as texturas mais finas. Apenas Schaap *et al.* (1998) apresenta dados sobre este parâmetro, seguindo as mesmas tendências observadas na PROPSOLO, embora os valores médios observados variem entre 0.365 (FL) e -3.665 (AL).

A condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) apresenta grandes variações dentro de cada classe textural, sendo o desvio padrão, em todos os casos, da mesma ordem de grandeza, ou mesmo superior aos valores médios de cada classe. Assim, apesar da PROPSOLO

**Quadro 1** – Valores médios ( $x_m$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ), valores máximos (max) e mínimos (min) e valores médios estimados ( $\theta_{r\text{ classe}}$ ,  $\theta_{s\text{ classe}}$ ,  $\alpha_{\text{ classe}}$ ,  $\eta_{\text{ classe}}$ ,  $\ell_{\text{ classe}}$  e  $K_{s\text{ classe}}$ ) dos parâmetros de Mualem van Genuchten para as classe texturais do diagrama de Gomes e Silva (1962).

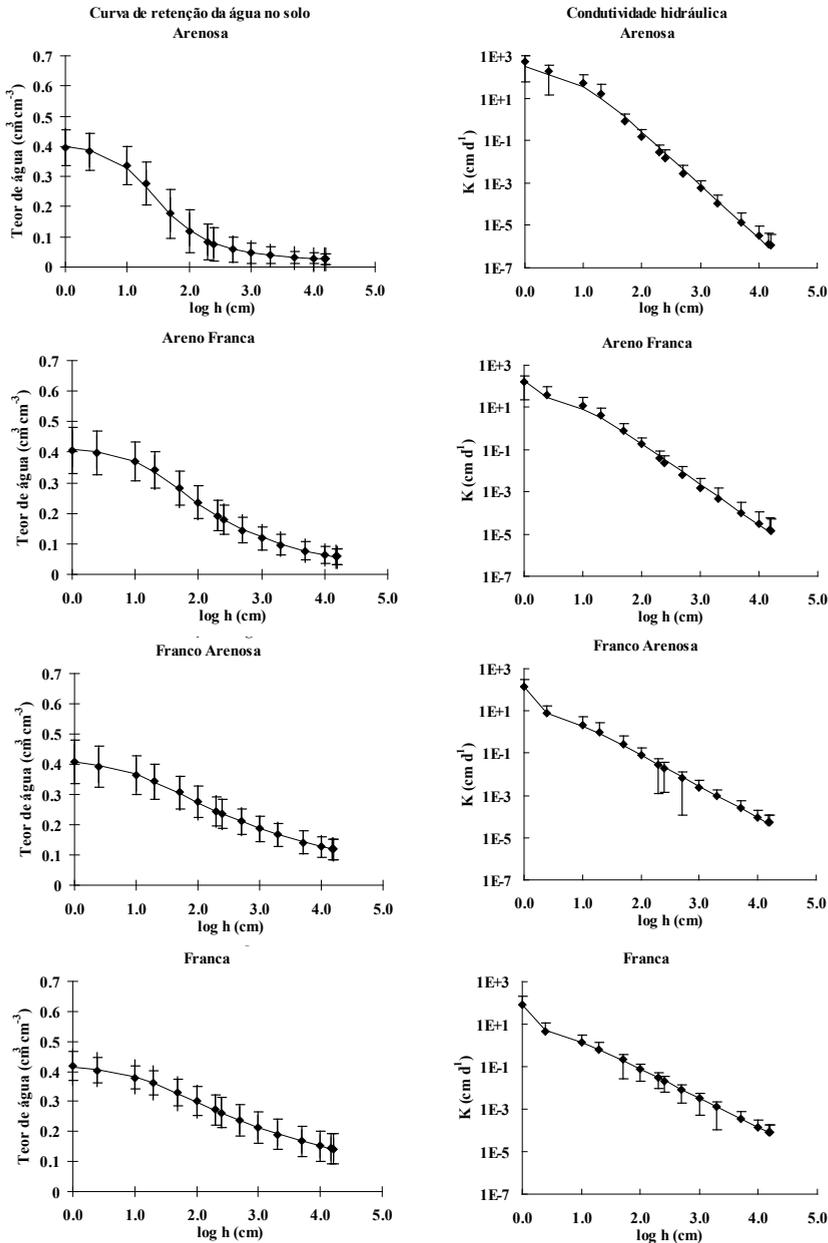
M-vG	Ar	ArF	FAr	F	FL	FAAr	FA	FAL	AAr	AL	A
$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )											
$x_m$	0.021	0.013	0.010	0.023	0.004	0.057	0.049	0.016	0.073	0.034	0.087
$\sigma$	0.014	0.024	0.026	0.046	0.017	0.075	0.080	0.036	0.090	0.069	0.111
max	0.047	0.080	0.112	0.169	0.114	0.238	0.278	0.137	0.228	0.202	0.352
min	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_{r\text{ classe}}$	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.151	0.000	0.000
$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )											
$x_m$	0.396	0.406	0.408	0.417	0.441	0.383	0.420	0.500	0.414	0.563	0.482
$\sigma$	0.060	0.076	0.072	0.059	0.067	0.049	0.065	0.077	0.139	0.046	0.067
max	0.485	0.568	0.612	0.573	0.568	0.495	0.647	0.636	0.639	0.637	0.653
min	0.290	0.221	0.279	0.306	0.332	0.294	0.313	0.377	0.275	0.444	0.344
$\theta_{s\text{ classe}}$	0.400	0.412	0.406	0.414	0.448	0.386	0.421	0.538	0.399	0.582	0.474
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )											
$x_m$	0.049	0.064	0.173	0.227	0.153	0.147	0.247	0.097	0.184	0.063	0.482
$\sigma$	0.125	0.056	0.256	0.453	0.547	0.313	0.721	0.178	0.213	0.091	0.292
max	0.508	0.263	1.504	3.043	3.831	1.857	5.333	0.719	0.574	0.339	1.679
min	0.022	0.008	0.012	0.007	0.001	0.001	0.002	0.003	0.006	0.002	0.005
$\alpha_{\text{ classe}}$	0.080	0.069	0.107	0.083	0.053	0.132	0.116	0.298	0.043	0.116	0.085
$\eta$ (-)											
$x_m$	2.05	1.38	1.20	1.20	1.21	1.18	1.14	1.16	1.30	1.13	1.15
$\sigma$	0.81	0.16	0.13	0.12	0.10	0.14	0.09	0.06	0.23	0.05	0.12
max	4.59	1.92	1.73	1.90	1.48	1.80	1.53	1.29	1.62	1.29	1.72
min	1.35	1.19	1.10	1.01	1.07	1.05	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05
$\eta_{\text{ classe}}$	1.62	1.29	1.17	1.15	1.15	1.09	1.08	1.08	1.36	1.08	1.08
$\ell$											
$x_m$	-0.48	-1.43	-4.42	-5.07	-6.75	-5.64	-8.21	-9.84	-1.25	-8.18	-6.45
$\sigma$	1.15	1.71	2.47	2.43	2.37	4.73	2.77	3.01	1.39	3.46	3.66
max	2.02	1.21	0.15	0.00	-3.30	0.00	-1.90	-7.86	-0.05	-4.45	0.00
min	-2.36	-4.23	-8.74	-11.32	-11.98	-14.48	-14.36	-13.30	-2.61	-13.19	-11.86
$\ell_{\text{ classe}}$	-1.19	-2.19	-5.07	-6.17	-6.59	-10.58	-10.77	-11.97	-1.14	-9.61	-9.29
$K_s$ (cm d <sup>-1</sup> )											
$x_m$	499.6	164.9	152.0	84.1	71.8	94.9	158.1	548.4	199.5	267.1	171.5
$\sigma$	438.6	142.2	173.6	127.1	85.1	139.1	504.2	775.8	232.1	204.5	195.2
max	1405.6	527.2	939.7	526.7	325.6	427.1	2494.0	1436.8	545.2	588.7	796.6
min	84.5	19.4	1.1	1.4	1.7	3.7	1.0	4.9	64.8	102.3	1.2
$K_{s\text{ classe}}$	315.1	179.9	146.2	84.4	53.4	88.9	153.4	390.5	184.9	255.7	222.1

Ar, Arenosa; ArF, Areno-Franca; FAr, Franco-Arenosa; F, Franca; FL, Franco-Limosa; FAAr, Franco-Argilo-Arenosa; FA, Franco-Argilosa; FAL, Franco-Argilo-Limosa; AAr, Areno-Argilosa; AL, Argilo-Limosa; A, Argilosa.

contar já com 245 curvas K(h), é um número ainda não suficiente de modo a caracterizar este parâmetro para cada classe textural, devi-

do à sua grande heterogeneidade espacial.

Nas Figuras 3, 4 e 5 apresentam-se as curvas  $\theta(h)$  e K(h) médias obtidas para cada uma



**Figura 3** – Curvas de retenção de água e da condutividade hidráulica para as texturas Arenosa, Areno-franca, Franco-Arenosa e Franca.

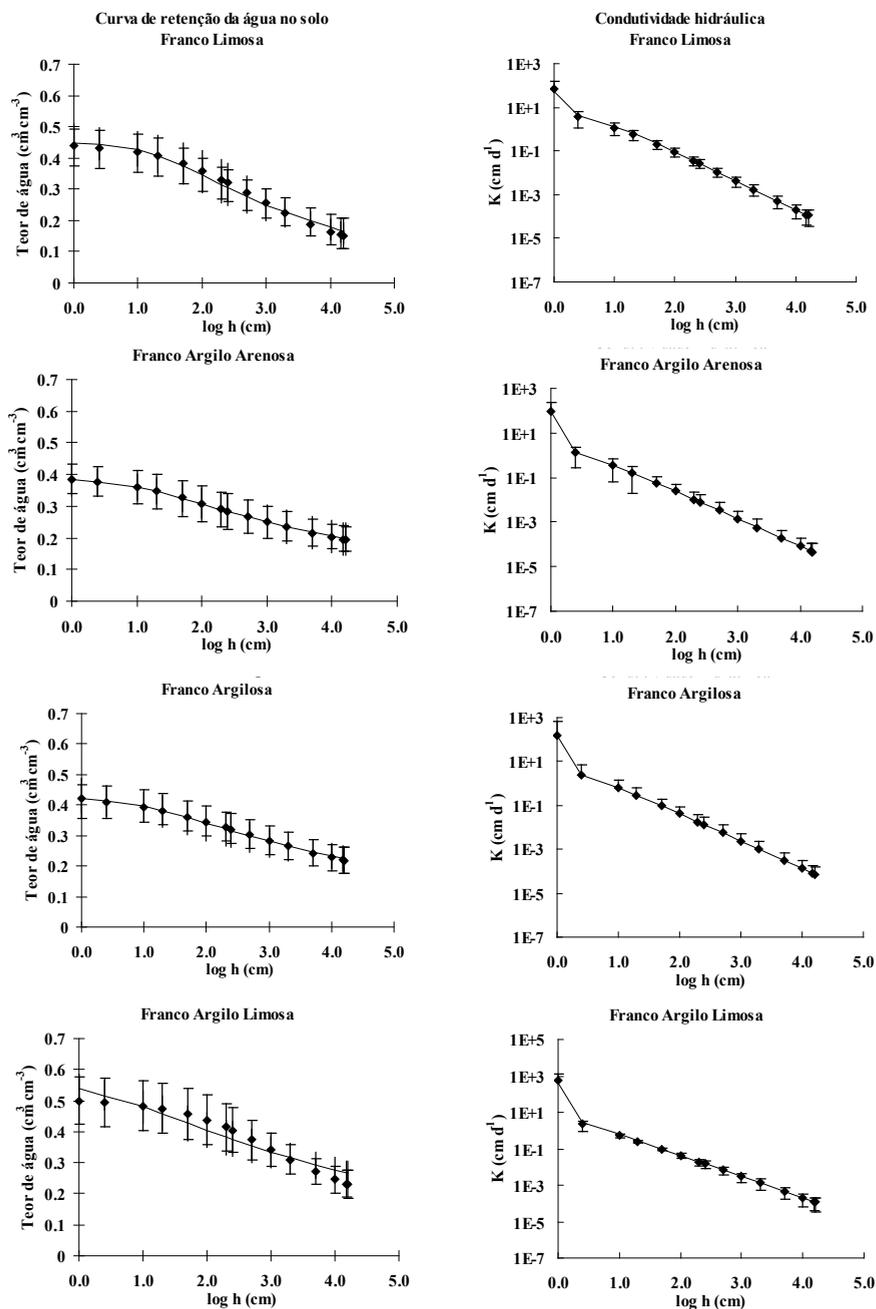
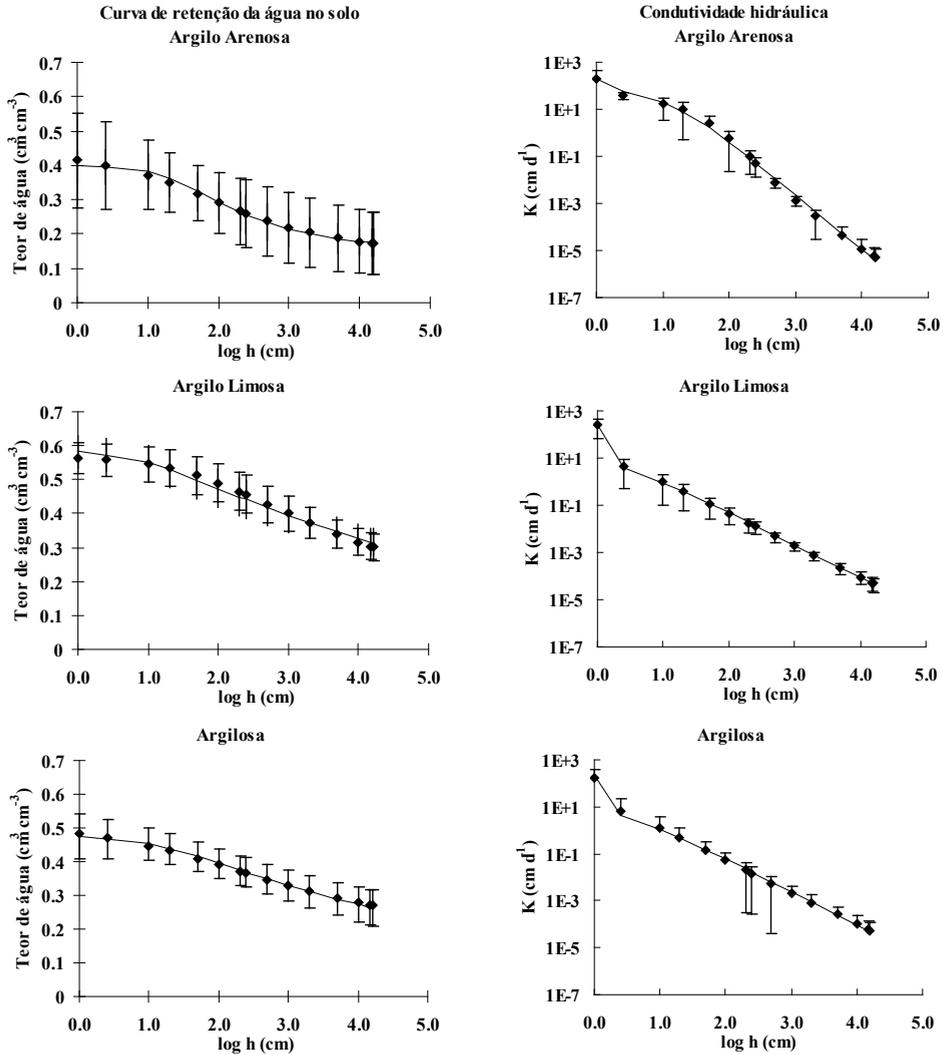


Figura 4 – Curvas de retenção de água e da condutividade hidráulica para as texturas Franco-Limosa, Franco-Argilo-Arenosa, Franco-Argilosa e Franco-Argilo-Limosa.



**Figura 5** – Curvas de retenção de água e da condutividade hidráulica para as texturas Argilo-Arenosa, Argilo-Limosa e Argilosa.

das classes texturais em função dos parâmetros de Mualem-van Genuchten ajustados ( $\theta_{f \text{ classe}}$ ,  $\theta_{s \text{ classe}}$ ,  $\alpha_{\text{classe}}$ ,  $\eta_{\text{classe}}$ ,  $\ell_{\text{classe}}$  e  $K_{s \text{ classe}}$ ) e obtidos a partir dos teores médios de água no solo obtido às sucções e -0, -2.5, -10, -20, -50, -100, -200, -250, -500, -1000, -2000, -

5000, -10000, -15000 e -16000 cm de água. Nas mesmas figuras pode-se também observar o desvio padrão dos teores de água em cada uma das sucções definidas.

Como exemplo, passa-se a discutir alguns aspectos das classes texturais Arenosa e Argi-

losa. A curva  $\theta(h)$  obtida para a classe Arenosa apresenta uma porosidade total média de  $0.396 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $\sigma=0.060 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e teores médios de água às succões de 100 e 16000 cm de  $0.119$  ( $\sigma=0.072 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e  $0.027 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $\sigma=0.017 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), respectivamente. Por sua vez, a curva  $\theta(h)$  para a classe Argilosa apresenta uma porosidade total média de  $0.482 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $\sigma=0.067 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e teores médios de água às succões de 100 e 16000 cm de água de  $0.391$  ( $\sigma=0.044 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e  $0.271 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $\sigma=0.053 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), respectivamente.

Em relação às curvas  $K(h)$ , as curvas médias obtidas para aquelas duas texturas (Arenosa e Argilosa) descrevem os dois principais tipos de curvas existentes. Para os solos arenosos, os valores de  $K(h)$  permanecem constantes até ao valor da pressão de entrada de ar nestes solos. A partir deste ponto,  $K(h)$  apresenta um decréscimo muito acentuado. Para os solos argilosos, a curva  $K(h)$  obtida é típica de solos com macroporos, uma vez que os valores de  $K_s$  são de uma ordem de magnitude superior aos valores de condutividade hidráulica correspondentes a apenas alguns centímetros de pressão efectiva, mas suficientes para drenar os macroporos. Na maior parte das classes texturais, as curvas  $K(h)$  apresentam características intermédias às duas curvas aqui descritas.

## CONCLUSÕES

Os parâmetros do modelo de Mualem-van Genuchten ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\ell$  e  $K_s$ ) disponíveis na base de dados PROPSOLO apresentam grande variabilidade, mesmo dentro de cada classe textural, nomeadamente, os parâmetros  $\alpha$  e  $K_s$ . A quantificação da variabilidade das propriedades hidráulicas do solo requererá, no entanto, um trabalho contínuo e mais profundo, de modo a aumentar o número de curvas  $\theta(h)$  e  $K(h)$  disponíveis para este tipo

de estudos. Existem lacunas de informação relativas às propriedades hidráulicas que deverão ser colmatadas no futuro, nomeadamente, para as classes texturais Limosa e Argilo-Arenosa e da condutividade hidráulica insaturada para a totalidade das classes texturais.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito dos Projectos NITROSAL (PTDC/AGR-AAM/66004/2006) e EUTROPHOS (PTDC/AGR AAM/098100/2008) da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). T. B. Ramos é financiado por uma bolsa FCT (contrato SFRH/BD/60363/2009).

## BIBLIOGRAFIA

- Cardoso, J.C. (1974) - A classificação dos solos de Portugal – Nova versão. *Boletim de Solos*, 17: 14-46. Lisboa, SROA, Secretaria de Estado da Agricultura.
- Dane, J.J. e Topp, G.C. (2002) - *Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods*. Madison, WI, Soil Science Society of America Inc., 1692 p.
- Fontes, J.C.; Gonçalves, M.C. e Pereira, L.S. (2004) - Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties. *Catena*, 56: 145-154.
- Gardner, W.R. (1958) - Some steady-state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85: 228–232.
- Gomes, M.P. e Silva, A.A. (1962) - Um novo diagrama triangular para a classificação básica da textura do solo. *Garcia da Orta*, 10: 171-179.
- Gonçalves, M.C.; Pereira, L.S. e Leij, J.F. (1997) - Pedo-Transfer Functions for

- Estimating Unsaturated Hydraulic Properties of Portuguese Soils. *European Journal of Soil Science*, 48: 387-400.
- Gonçalves, M.C., Almeida, V.V. e Pereira, L.S. (1999) - Estimation of Hydraulic parameters for portuguese soils. In: van Genuchten, M.Th.; Leij, F. e Wu, L. (Eds). *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media*. Part 2. CA, USA, University of California Riverside, p. 1199-1210.
- Gonçalves, M.C.; Leij, F.J. e Schaap, M.G. (2001) - Pedotransfer functions for solute transport parameters of Portuguese soils. *European Journal of Soil Science*, 52: 563-574.
- Henley, S. (2006) - The problem of missing data in geoscience databases. *Computers & Geosciences*, 32: 1368-1377.
- Nemes, A.; Schaap, M.G.; Leij, F.J. e Wösten, J.H.M. (2001) - Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *Journal of Hydrology*, 251: 151-162.
- Ramos, T.B.; Gonçalves, M.C.; Martins, J.C. e Pires, F.P. (2007) - PROPSOLO – Base de dados georreferenciada de propriedades do solo. In: *Actas do Congresso Nacional de Rega e Drenagem* (CD-ROM). Fundação, Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio.
- Schaap, M.G.; Leij, F.L. e van Genuchten, M.Th. (1998) - Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 847-855.
- van Genuchten, M.Th. (1980) - A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- van Genuchten, M. Th.; Leij, F.J. e Yates, S.R. (1991) - *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. Ada, Oklahoma, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, p. 85. (Report No. EPA/600/2-91/065).
- Vanderborght, J. e Vereecken, H. (2007) - Review of dispersivities for transport modeling in soils. *Vadose Zone Journal*, 6: 29-52.
- Wösten, J.H.M.; Lilly, A.; Nemes, A. e Le Bas, C. (1999) - Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90: 169-185.