

Avaliação *in situ* da condutividade hidráulica de solos de montanha: un caso de estudo na Serra da Estrela (Centro de Portugal)

In situ measurement of hydraulic conductivity of mountain soils: a case study in Serra da Estrela mountain (Central Portugal)

ESPINHA MARQUES, J.¹, DUARTE, J. M.², CONSTANTINO, A. T.², AGUIAR, C.³, ROCHA, F. T.⁴, MARQUES, J. M.⁵, SAMPER, J.⁶, BORGES, F. S.¹, CARVALHO, J. M. 4,⁷ and CHAMINÉ, H. I.^{7,4}

(1) Departamento de Geologia/Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, R. do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto, Portugal, jespinha@fc.up.pt

(2) Agroconsultores, Lda., Lisboa, Portugal

(3) Centro de Investigação da Montanha (CIMO), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal

(4) Centro GeoBioTec (Grupo de Georrecursos, Geotecnia e Geomateriais), Dep. de Geociências, Universidade de Aveiro, Portugal

(5) Departamento de Engenharia de Minas e Georrecursos (CPGIST), Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

(6) ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, España

(7) Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (Labcarga), Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto, Portugal

Recibido: 29/07/2008

Revisado: 25/11/2008

Aceptado: 20/12/2008

Abstract

Understanding the role of the vadose zone is essential to accurately assess hydrogeological systems and the respective groundwater resources. The study area (Manteigas – Nave de Santo António – Torre sector, *Serra da Estrela* Mountain, Central Portugal) presents specific geological, morphotectonical and climatic characteristics with significant influence on the hydrogeologic regime. The vadose

zone has particular features that contribute to control both the quantity and the quality of the groundwater resources. In situ hydraulic conductivity tests were carried out in A and H soil horizons, by means of the constant head permeameter (Guelph permeameter) method. The mean value of the field saturated hydraulic conductivity is high (around 6 cm/h) and is typical of coarse textured soils. Unsaturated hydraulic conductivity was estimated using the Gardner mathematical model.

Key words: unsaturated zone, hydrogeology, soil hydraulics, constant head permeameter, Serra da Estrela Mountain

INTRODUÇÃO

As regiões montanhosas são, geralmente, origem de recursos hídricos de excepcional qualidade e de elevada importância socioeconómica, tal como é reconhecido pelo Programa Hidrológico Internacional da UNESCO (e.g., AURELI, 2002) bem como e pelo *Millenium Ecosystem Assessment* (HASSAN et al., 2005). Os sistemas hidrológicos de montanha são, por norma, de difícil compreensão, devido à forma particularmente complexa como os processos pedológicos, geomorfológicos, geológicos, climáticos e antrópicos que aí decorrem condicionam os processos associados ao ciclo da água.

Neste contexto, o conhecimento das propriedades hidráulicas da zona não saturada (ZNS) — em especial a condutividade hidráulica — é fundamental para a avaliação rigorosa de sistemas hidrológicos e dos respectivos recursos hídricos subterrâneos (e.g., DINGMAN, 1994; NAP, 2001). Os factores da formação do solo (em particular, o tipo de rocha original, o relevo, o clima, a acção biológica e a acção antrópica) devem ser tidos em conta dada a sua influência sobre os processos da infiltração e da recarga dos aquíferos.

A importância da ZNS, no contexto de estudos hidrogeológicos, resulta do facto de fenómenos como a infiltração (entendida como o movimento da água da superfície topográfica para a camada superior do solo ou do maciço rochoso), a recarga dos aquíferos (ou seja, a deslocação, por percolação, da água da ZNS para a zona de saturação) e a contaminação das águas subterrâneas dependerem fortemente das características físicas, químicas e biológicas deste meio. Em

grande medida, a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos resultam do modo como se processa a fase do ciclo hidrológico que aqui tem lugar.

No entanto, uma vez que a hidrogeologia clássica se tende a orientar, preferencialmente, para a captação de água subterrânea (FETTER, 1999), o estudo da ZNS foi, durante muito tempo, algo descuidado. De facto, tal como NIELSEN et al. (1986) observam, nenhuma disciplina científica tem conferido suficiente atenção à ZNS, no que respeita ao seu uso, conservação e gestão. O estudo desta zona tem sido feito de forma segmentada, em “compartimentos estanques”, de onde resulta alguma carência de conhecimento teórico e experimental (VARELA, 1993).

A área do presente estudo corresponde ao sector de Manteigas-Nave de Santo António-Torre, o qual corresponde, aproximadamente, à área designada por Bacia do Zêzere a Montante de Manteigas (BZMM; fig. 1). Esta região apresenta características geológicas, geomorfológicas e climáticas específicas, que condicionam directamente o ciclo hidrológico regional e, conseqüentemente, a disponibilidade de recursos hídricos. Tais recursos, de elevada qualidade e valor económico, incluem águas subterrâneas (normais e termominerais) e águas superficiais. Esta região apresenta características geológicas, geomorfológicas e climáticas específicas, que condicionam directamente o ciclo hidrológico regional e, conseqüentemente, a disponibilidade de recursos hídricos. Tais recursos incluem águas subterrâneas (normais e termominerais) e águas superficiais (e.g., ESPINHA MARQUES et al., 2006; ESPINHA MARQUES, 2007).

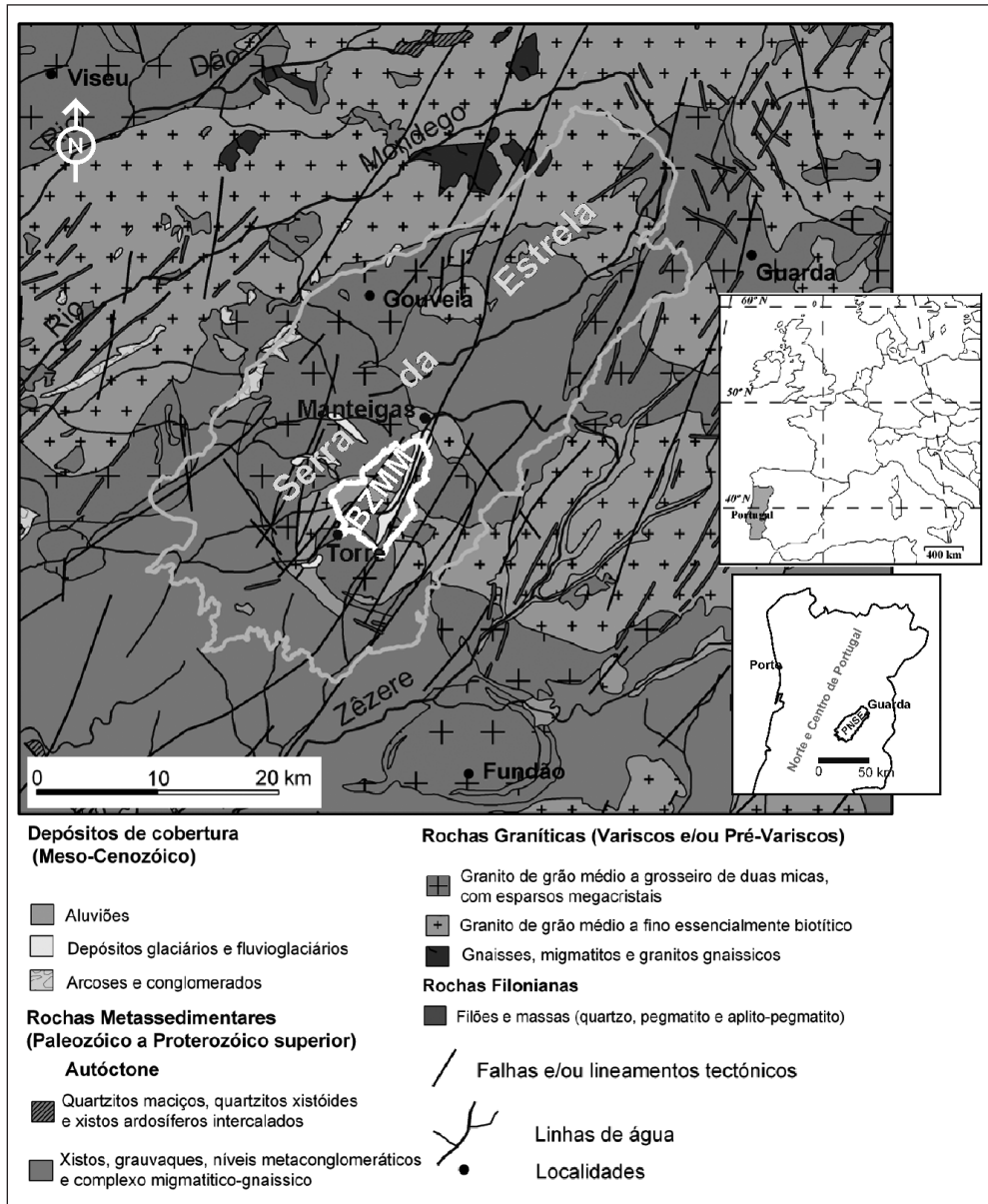


Figura 1. Geologia da região da Serra da Estrela (simplificado de OLIVEIRA *et al.*, 1992)

O estudo da condutividade hidráulica de solos da BZMM foi realizado entre 2003 e 2006, no âmbito do projecto de I&D multidisciplinar designado por “HIMOCATCH” (e.g., ESPINHA MARQUES *et al.*, 2005, 2007). No referido estudo, foi efectuada uma caracterização regional da zona não saturada, suportada pela geologia, pela pedologia e pela geomorfologia a qual colocou o enfoque nas características físicas, químicas e mineralógicas dos solos, na estrutura da zona não saturada e nas feições hidropedológicas.

As tarefas realizadas durante o estudo incluíram, sobretudo, reconhecimentos geológicos e pedológicos de campo, campanhas de amostragem de solos, estudos pedológicos de laboratório, a realização de ensaios de condutividade hidráulica através do método do permeâmetro de carga constante, também designado por permeâmetro de Guelph (e.g., REYNOLDS, 1993; REYNOLDS & ELRICK, 2002), e a aplicação de modelação matemática da condutividade hidráulica não saturada.

ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO

A Serra da Estrela situa-se na Zona Centro-Ibérica do Maciço Ibérico (RIBEIRO *et al.*, 1990). Os principais litótipos presentes na região são: (i) Rochas graníticas de idade Varisca; (ii) Rochas metassedimentares de idade Precâmbrica-Câmbrica; (iii) depósitos aluvionares e glaciários do Quaternário. A tectónica da área estudada (fig. 1) é dominada pela megaestrutura regional designada por zona de falha de Bragança-Vilariça-Manteigas (ZFBVM), com orientação geral NE-SW, a qual corresponde a um importante corredor tectónico que constitui uma das

mais importantes megaestruturas do Noroeste da Ibéria (RIBEIRO, 1988; RIBEIRO *et al.*, 1990).

As condições geológicas constituem uma parte fundamental do sistema hidrogeológico, uma vez que controlam algumas das suas principais características, nomeadamente os processos de infiltração e de recarga dos aquíferos, o tipo de meio de circulação (poroso *vs.* fissurado), os trajectos do fluxo subterrâneo ou a hidrogeoquímica.

A Serra da Estrela é o sector mais orientado e elevado (com altitude máxima de 1993 m) do alinhamento montanhoso de direcção SW-NE existente entre a Guarda e a Serra da Lousã ao longo de cerca de 115 km, com uma largura média de 25 km (LAUTENSCH, 1932; DAVEAU, 1969). Esta montanha exhibe características climáticas e geomorfológicas particulares que desempenham um papel importante no ciclo hidrológico local, especialmente no sub-ciclo hidrogeológico.

A BZMM tem uma área de cerca de 28 km² e altitude compreendida entre 875 m (na estação hidrométrica de Manteigas) e 1993 m (no alto da Torre). O relevo deste sector da Serra da Estrela é dominado por dois planaltos principais, separados pelo vale do rio Zêzere, com orientação NNE-SSW: o planalto da Torre-Penhas Douradas (1450-1993 m), situado a ocidente, e o planalto do Alto da Pedrice-Curral do Vento (1450-1761 m), situado a oriente. A geomorfologia glaciária do Plistocénico Superior e os depósitos associados distinguem este sector, glaciado durante o Último Máximo da Glaciação (e.g., DAVEAU *et al.*, 1997; VIEIRA, 2004).

Segundo DAVEAU *et al.* (1997), VIEIRA (2004) e MORA (2006), o clima da Serra da Estrela é marcado por um cariz mediterrâneo, com verões quentes e secos. A estação húmida estende-se entre Outubro

e Maio, com precipitação média anual superior a 2000 mm na maior parte da área dos planaltos, chegando a ultrapassar 2500 mm nas imediações da Torre. A precipitação aparenta ser sobretudo controlada pela altitude e orientação da serra em relação aos fluxos dominantes das massas de ar. Observa-se, à escala regional, um aumento da precipitação com a altitude; no entanto, à escala local, a distribuição espacial da precipitação é de difícil interpretação. A Serra da Estrela é caracterizada por um regime térmico simples. O mês mais quente é Julho e o mais frio é Janeiro. A temperatura média anual é inferior a 7°C na maior parte da área dos planaltos, sendo, no Alto da Torre, inferior a 4°C.

ENQUADRAMENTO HIDROPEDOLÓGICO

De acordo com a classificação de solos da FAO-UNESCO (FAO, 1998) que se encontra adoptada na Carta dos Solos e da Aptidão da Terra da Zona Interior Centro à escala 1/100 000 (AGROCONSULTORES & GEOMETRAL, 2004) foi reconhecida a presença de solos classificáveis nas seguintes unidades pedológicas:

(i) Umbrissolos Húmicos: solos ocorrendo em áreas de relevo côncavo, associados a depósitos de cobertura de granulometria relativamente fina; ocupação do solo correspondendo a um mosaico de cervunal (prado de *Nardus stricta*), de pastagem meso-higrófila (prados de *Molinio-Arrhenatheretea*) e de mato higrófilo geralmente dominado por *Calluna vulgaris*.

(ii) Umbrissolos Lépticos: solos ocorrendo em áreas de encosta e de planalto com

substrato granítico; ocupação do solo diversificada (e.g., pinhal de pinheiro-bravo, giestal de *Genista florida* e *Cytisus* sp.pl. e prado meso-xerófilo de *Festuca summilusitana*).

(iii) Umbrissolos Esqueléticos: solos ocorrendo em áreas de relevo côncavo e de base de encosta, associados a depósitos de cobertura de granulometria grosseira; ocupação do solo diversificada (pinhal de pinheiro-bravo, giestal de *Genista florida* e *Cytisus* sp.pl. e urzal mesófilo de *Erica australis*).

(iii) Leptossolos Líticos: solos ocorrendo em áreas de encosta e de planalto com substrato granítico; ocupação do solo diversificada (pinhal de pinheiro-bravo, giestal de *Genista florida* e *Cytisus* sp.pl., urzal mesófilo de *Erica australis*, prado meso-xerófilo de *Festuca summilusitana*).

(iv) Leptossolos Úmbricos: solos ocorrendo em situações de encosta e de planalto com substrato granítico; ocupação do solo muito diversificada (pinhal de pinheiro-bravo, giestal de *Genista florida* e *Cytisus* sp.pl., mato baixo de *Juniperus communis* subsp. *alpina* nas cotas mais elevadas, urzal de *Erica australis*, prado meso-xerófilo de *Festuca summilusitana*, cervunal de *Nardus stricta* ao qual se associa, no planalto central, o endemismo *Festuca henriquesii*).

(v) Fluvissoles: solos ocorrendo nas margens do rio principal e dos afluentes mais importantes, em depósitos aluviais.

(vi) afloramentos rochosos: áreas onde o substrato granítico, duro e contínuo, surge à superfície.

O estudo regional da ZNS foi realizado em onze (11) locais da BZMM (fig. 2 e 3) cujas características são indicadas no quadro 1 (ESPINHA MARQUES, 2007; ESPINHA MARQUES *et al.*, 2007).

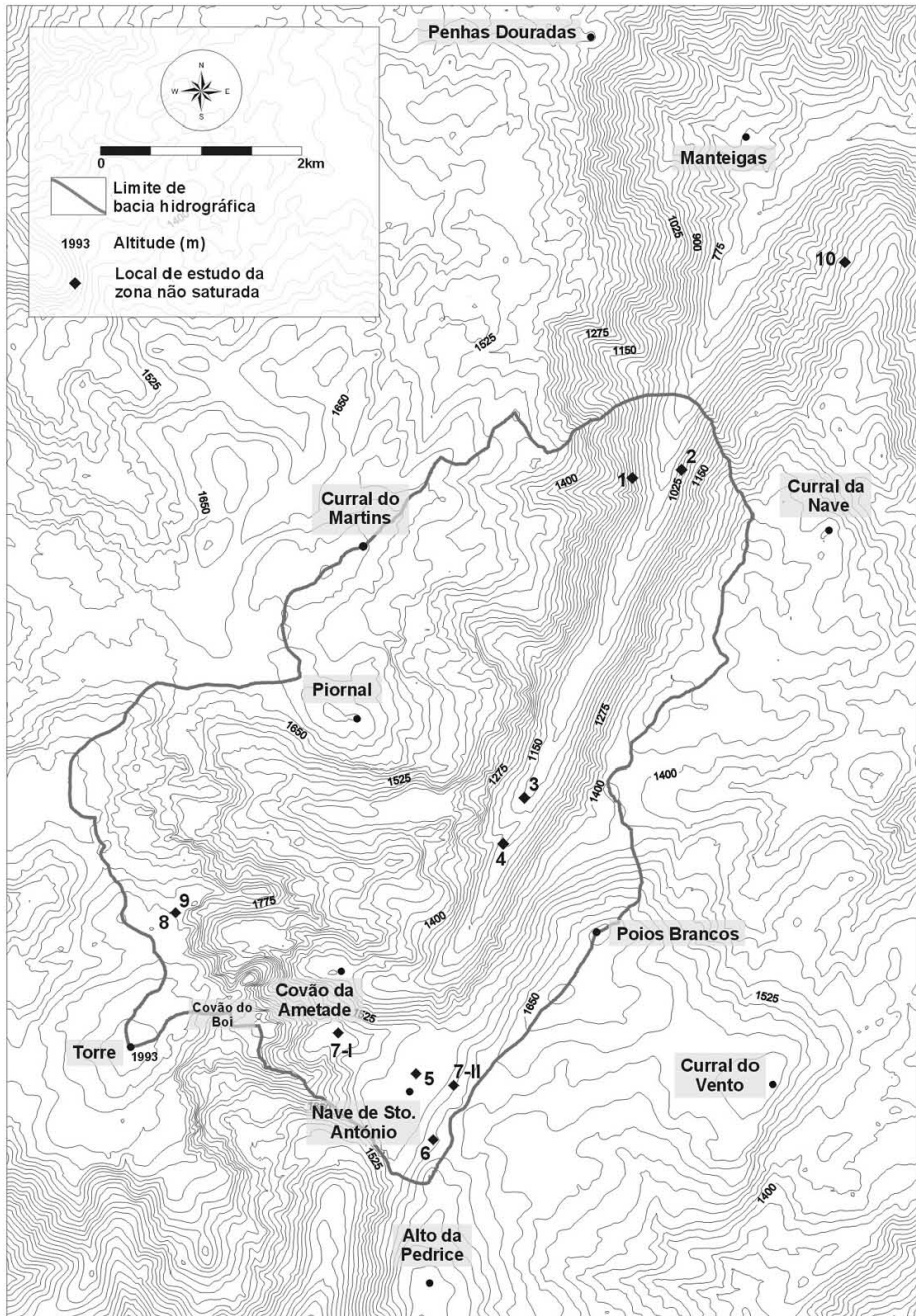


Figura 2. Topografia da BZMM e da região envolvente; locais de estudo da ZNS.

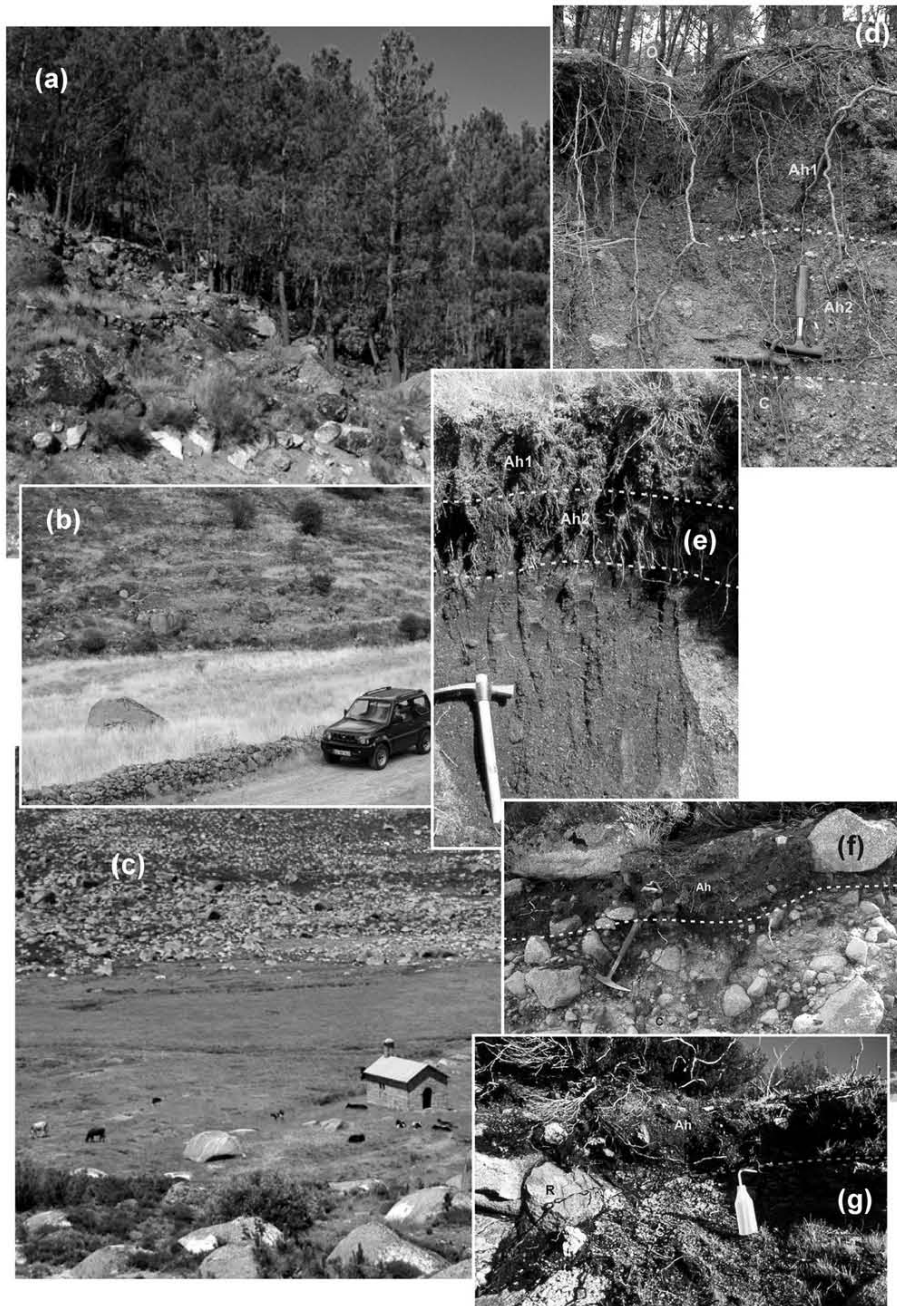


Figura 3. Alguns aspectos dos locais de estudo da ZNS: local 1 (a) e (d), local 3 (b), local 5 (c) e (e), local 7-I (f), local 7-II (g).

Local (ver fig. 2)	Altitude (m)	Substrato geológico	Forma de relevo	Unidade pedológica e classe hidrológica ¹
1	1000	Depósito glaciário ou fluvioglaciário	Base de encosta	Umbrissolo Esquelético Classe A ou B
2	990	Depósito glaciário ou fluvioglaciário	Base de encosta	Umbrissolo Esquelético Classe A ou B
3	1130	Depósito glaciário ou fluvioglaciário	Fundo de vale	Umbrissolo Esquelético Classe A ou B
4	1180	Depósito glaciário ou fluvioglaciário delgado sobre granito	Base de encosta	Umbrissolo Esquelético Classe A ou B Leptossolo Úmbrico Classe D
5	1540	Depósito aluvionar, glaciário ou fluvioglaciário	Colo	Umbrissolo Húmico Classe B ou C
6	1580	Granito	Base de encosta	Leptossolo Lítico Leptossolo Úmbrico Classe D
7 I	1635	Depósito glaciário ou fluvioglaciário	Base de encosta	Umbrissolo Esquelético Classe A ou B
7 II	1550	Depósito glaciário ou fluvioglaciário	Base de encosta	Umbrissolo Esquelético Classe A ou B
8	1910	Granito	Planalto	Umbrissolo Húmico Classe B ou C
9	1910	Granito	Planalto	Umbrissolo Húmico Classe B ou C
10	1000	Depósito de vertente sobre granito	Encosta	Umbrissolo Húmico Classe B ou C

(1) Classificação hidrológica segundo o critério de USSCS (1964).

Quadro 1. Características dos locais de estudo da hidrologia da ZNS.

De acordo com os mesmos autores, o estudo da zona não saturada permitiu verificar que o perfil do solo predominante é do tipo ACR, com horizonte A úmbrico. Os solos da BZMM apresentam textura grosseira (fig. 4), quase exclusivamente arenosa-franca ou arenosa. Os solos estudados são ácidos, segundo o critério de SSDS (1993), com pH médio inferior a 5 (medido em H₂O). O teor em matéria orgânica no horizonte A é muito alto,

segundo o critério de COSTA (1995), tendo sido verificada uma forte correlação positiva com a altitude, explicável pela influência climática. A porosidade total é, igualmente, superior aos valores de referência para solos grosseiros indicados por CARSEL & PAR-RISH (1988). O quadro 2 apresenta uma síntese dos resultados relativos ao horizonte A nos solos da BZMM.

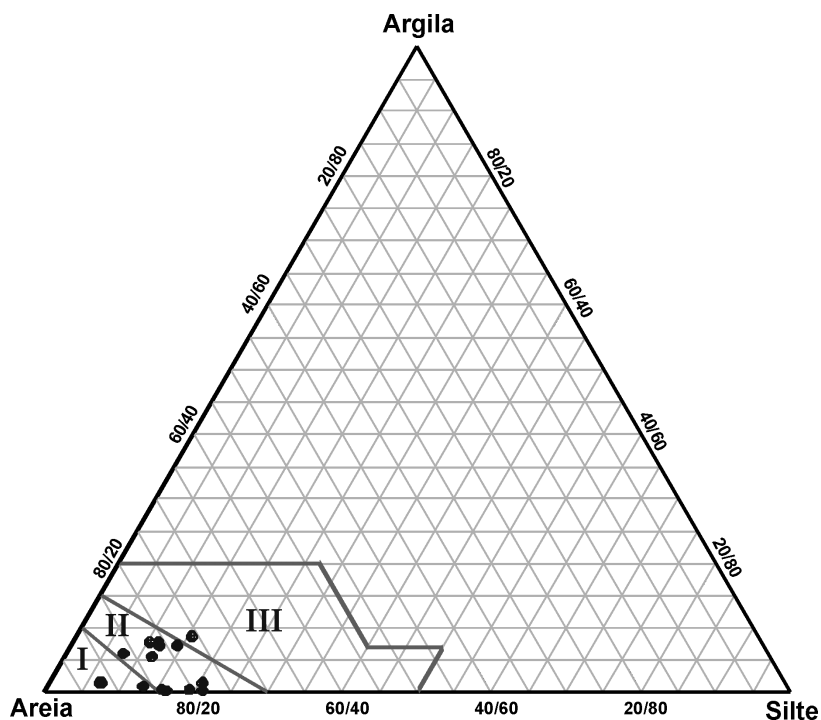


Figura 4. Representação dos resultados no triângulo das texturas, de acordo com o critério de SSDS (1993). (I: arenoso; II: arenoso-franco; III: franco-arenoso).

Local (ver fig. 2)	Densidade real (g/cm ³)	Porosidade total (%)	pH	Matéria orgânica (g/kg)
1	1,25	44,7	4,6	71,7
2	1,26	49,6	4,6	57,4
3	1,16	52,7	4,8	71,6
4	1,21	42,7	4,4	48,8
5	0,94	49,7	4,1	133,1
6	1,07	45,2	4,7	103,8
7I	0,88	51,9	4,1	187,5
7II	1,09	53,4	4,3	71,1
8	0,68	62,2	4,3	240,5
9	0,88	55,6	4,3	188,4
10	0,96	48,4	4,8	84,1
Média	1,03	50,6	4,5	114,3

Quadro 2. Algumas propriedades do horizonte A dos solos da BZMM (adaptado de ESPINHA MARQUES *et al.*, 2007).

A mineralogia dos solos da BZMM evidencia origem claramente detrítica, revelada pelo predomínio dos filossilicatos (representados, maioritariamente, por micas), quartzo, plagioclase e feldspato potássico. No que respeita aos minerais argilosos, verifica-se que o teor médio é máximo no caso da illite, seguindo-se a caulinite, a vermiculite aluminosa, a illite-esmectite e a esmectite. A geoquímica dos solos reflecte a mineralogia, sendo os elementos mais abundantes o Fe e o Al, seguindo-se o Mg, o K, o Ca e o P.

METODOLOGIA DA AVALIAÇÃO IN SITU DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO

A condutividade hidráulica de um meio poroso mede a capacidade para esse meio transmitir um fluido, em geral, a água. Este parâmetro é definido através da lei de Darcy, a qual, para o caso de um fluxo unidimensional, pode ser descrita do seguinte modo:

$$Q = K_s A i$$

onde Q é o caudal que atravessa o meio poroso, K_s é a condutividade hidráulica saturada, A é a área da secção do meio poroso atravessado e i é o gradiente hidráulico. Pode ser expressa em diversas unidades, tais como cm s^{-1} , m s^{-1} , cm h^{-1} ou m d^{-1} .

Num solo saturado, todos os poros estão preenchidos por água e, a maior parte deles, transmitem-na (FETTER, 1999). Pelo contrário, nos solos insaturados, uma parte dos poros está cheia de ar, o que ocasiona uma diminuição da condutividade hidráulica. Deste modo, a água na ZNS desloca-se, sobretudo, através dos poros que permanecem preenchidos por água.

No primeiro caso (fluxo hídrico em solo saturado), a condutividade hidráulica saturada é função das características do fluido

e do solo (e.g., RADCLIFFE & RASMUSSEN, 2002):

$$K_s = \frac{k\rho g}{\eta}$$

onde k é a permeabilidade intrínseca do solo, ρ é densidade da água, g é a aceleração da gravidade e η é a viscosidade da água. Solos com textura fina, habitualmente com poros pouco interligados e com reduzida dimensão, tendem a ter valores de K_s mais baixos. Por outro lado, solos com textura grosseira tendem a ter valores de K_s mais elevados.

No segundo caso (fluxo hídrico em solo não saturado), a condutividade hidráulica insaturada (K_i) pode ser encarada como função do teor de água do solo ou do potencial matricial. À medida que a água é drenada do solo inicialmente saturado, os poros maiores são primeiramente esvaziados, especialmente em solos bem estruturados ou com textura grosseira (em que a dimensão dos poros tem uma reduzida variabilidade) onde, por consequência, K_i diminui bruscamente. Pelo contrário, nos solos mais argilosos, com uma distribuição mais ampla das dimensões dos poros, a sua drenagem conduz a uma diminuição de K_i mais suave.

A equação de GARDNER (1958) é, frequentemente, utilizada para descrever K_i em função da carga de pressão (h):

$$K_i(h) = K_s \exp [a(h - h_a)] \quad \text{se } 0 < a < +\infty \quad \text{e } h < h_a \leq 0$$

$$K(h) = K_s \quad \text{se } h \geq h_a$$

onde K_i , K_s e h são definidos como anteriormente; h_a é a carga hidráulica à qual se inicia a entrada de ar no solo durante a drenagem, a partir do estado de saturação, ou, alterna-

tivamente, a carga até à qual ocorre entrada de água no solo durante o processo de humedecimento até à saturação; a é um parâmetro de forma que depende, fundamentalmente, da textura e da estrutura do solo. Na maior parte dos solos naturais, $h_a \approx 0$ e $a \approx a^*$ (REYNOLDS & ELRICK, 2002). a^* representa a razão entre a gravidade e as forças da capilaridade durante a infiltração ou drenagem e, normalmente, varia entre 0,01 e $0,5 \text{ cm}^{-1}$ (WHITE & SULLY, 1987). Valores

elevados de a^* indicam que o movimento da água é, fundamentalmente, gravítico, tendo lugar em solos com textura grosseira e/ou com estrutura forte; pelo contrário, os solos com textura fina e/ou mal estruturados tendem a apresentar valores reduzidos de a^* , significando que predominam as forças da capilaridade sobre a da gravidade. ELRICK *et al.* (1989) apresentam valores indicativos de a^* para aplicação com critérios de campo (quadro 3).

Tipo de solo	a^* (cm^{-1})
Materiais sem estrutura, argilosos ou siltosos (tais como os usados no isolamento de aterros sanitários), sedimentos lacustres ou marinhos, etc.	0,01
Solos simultaneamente com textura fina (argilosa ou siltosa) e sem estrutura; podem incluir certas areias finas.	0,04
A generalidade dos solos com textura argilosa a siltosa e estrutura nítida; estão aqui incluídos solos de areias finas a médias. É a categoria onde se enquadra a maioria dos solos agrícolas.	0,12
Solos compostos por areias grossas ou materiais com maior granulometria; podem estar incluídos alguns solos de estrutura excepcionalmente bem definida e/ou com abundantes fendas e outros macroporos, etc.	0,36

Quadro 3. Valores de a^* de acordo com a textura e a estrutura do solo (adaptado de ELRICK *et al.*, 1989).

Na presente investigação, a condutividade hidráulica do solo foi estudada através de um método de campo — tendo, para o

efeito, sido realizados ensaios de permeabilidade *in situ* com recurso ao permeâmetro de carga constante (fig. 5 e 6).

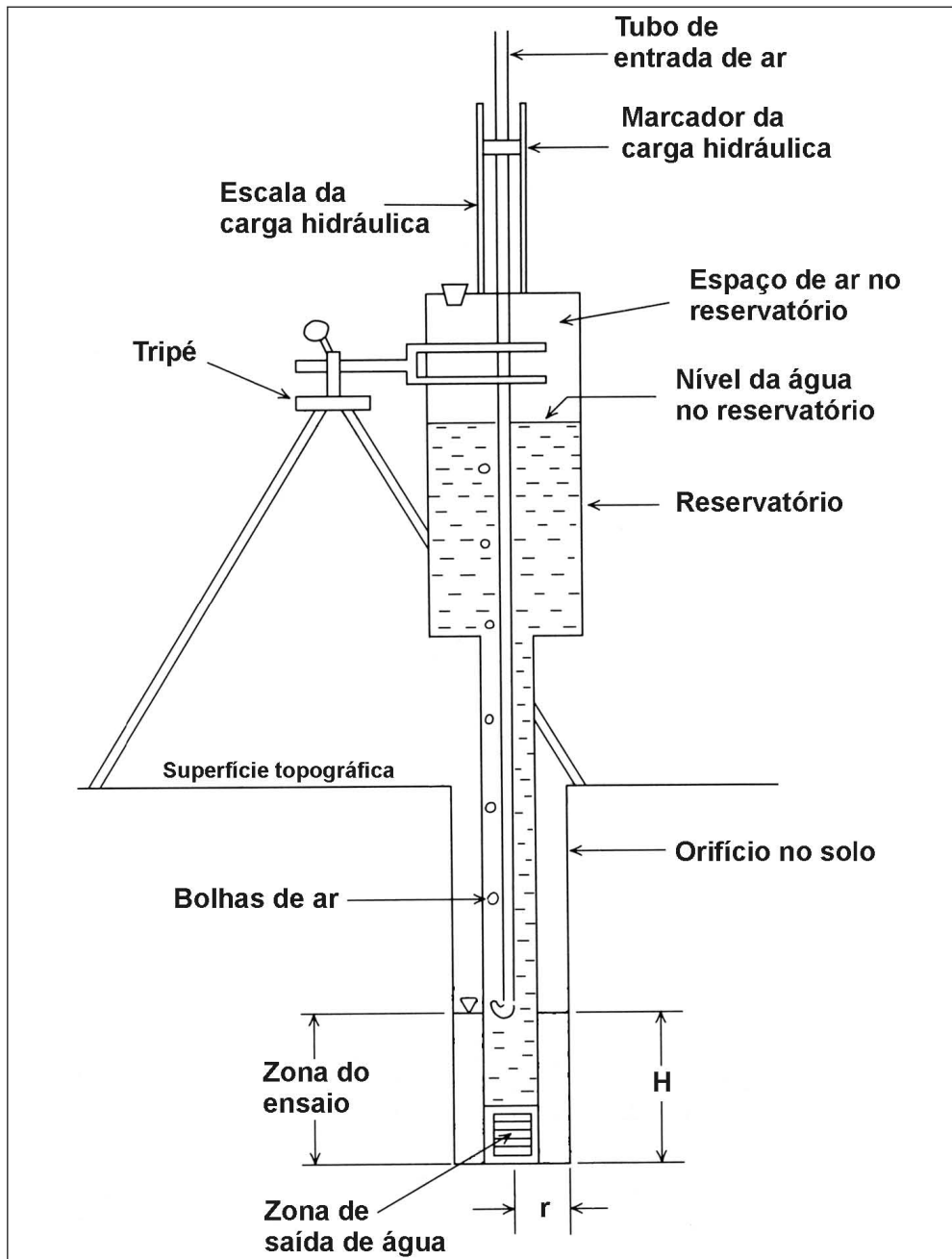


Figura 5. Esquema do permeâmetro de Guelph (modificado de REYNOLDS, 1993).

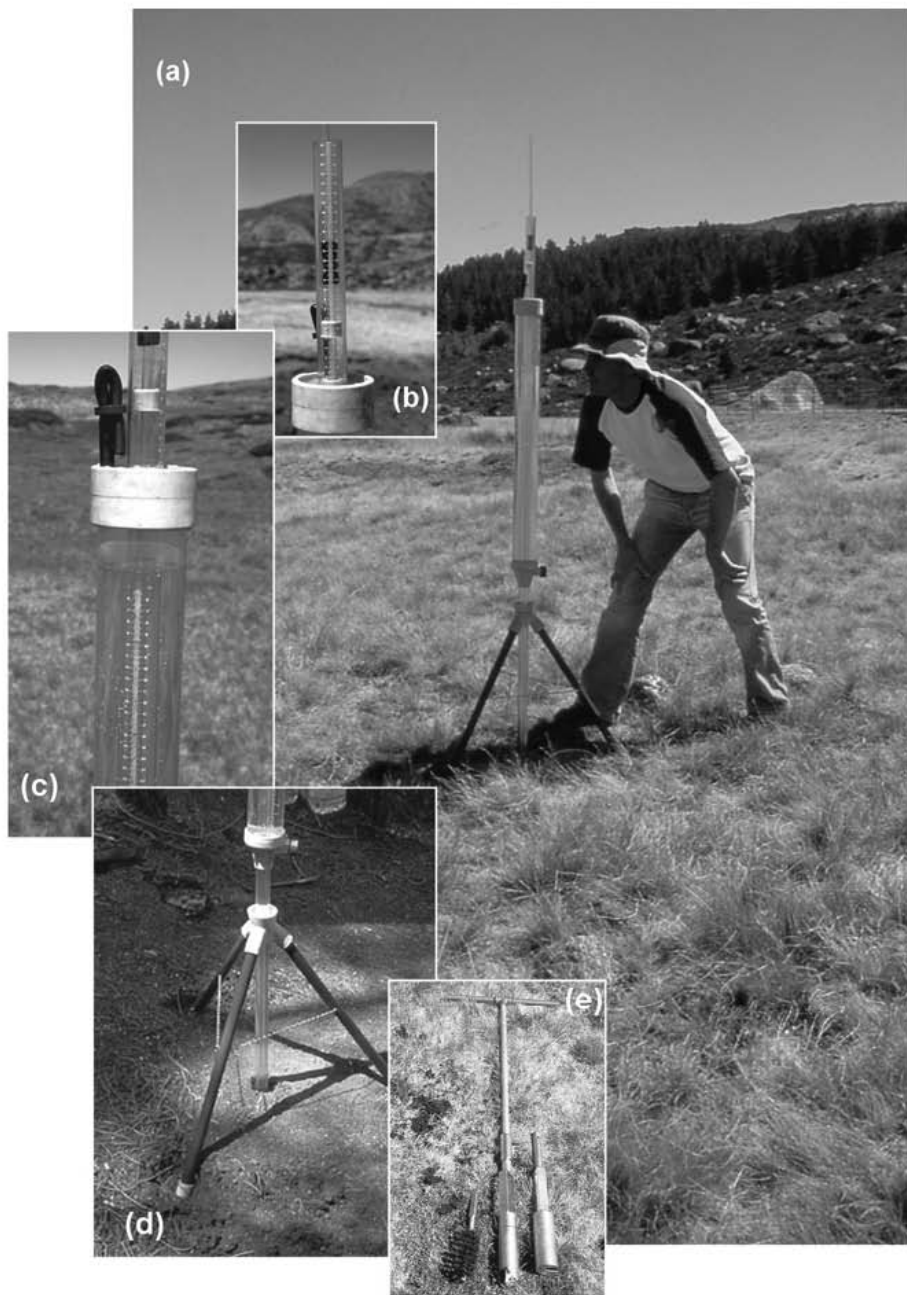


Figura 6. Ensaio de campo com permeâmetro de Guelph: (a) aspecto geral; (b) escala da carga hidráulica; (c) reservatório; (d) zona do tripé; (e) trados para abertura do orifício no solo (extraído de ESPINHA MARQUES, 2007).

De acordo com REYNOLDS et al. (1983), quando K_s é medida na ZNS é, habitualmente, designada por condutividade hidráulica saturada de campo (K_{sc}), reconhecendo o facto de, mesmo em condições “de saturação”, parte dos poros permanecerem insaturados. Assim, um meio poroso em saturação de campo contém menos água do que se estivesse completamente saturado. Dependendo da quantidade de ar aprisionado no solo, o valor de K_{sc} pode ser metade, ou menos, do valor de K_s obtido por saturação completa (BOUWER, 1978; REYNOLDS & ELRICK, 1987). No entanto, para muitos estudos na ZNS, K_{sc} é considerado mais apropriado do que K_s , porque, na generalidade dos processos naturais de infiltração, a saturação completa do meio poroso nunca é atingida (REYNOLDS, 1993).

Para a determinação in situ de K_{sc} , foi utilizado um modelo de permeâmetro de carga constante conhecido como “permeâmetro de Guelph” (REYNOLDS & ELRI-

CK, 1986; ELRICK et al., 1989; REYNOLDS, 1993; REYNOLDS & ELRICK, 2002). O método do permeâmetro de Guelph pode aplicar uma ou mais cargas hidráulicas durante o mesmo ensaio. No caso de ser aplicada uma única carga hidráulica, utiliza-se a seguinte expressão geral para calcular K_{sc} :

$$K_{sc} = CAR/[2\pi H^2 + C\pi r^2 + (2\pi H/a^*)]$$

onde K_{sc} e a^* foram definidos anteriormente; C é um factor de forma adimensional, função da razão entre a carga hidráulica, H , e o raio do orifício, r , ($C = f(H/r)$), obtido do gráfico da figura 7 ou calculado através das equações a seguir apresentadas); A (cm^2) é a área da secção do reservatório do permeâmetro; R (cms^{-1}) é a taxa de rebaixamento da água no reservatório do permeâmetro. A carga hidráulica (H) é materializada pelo nível constante da água no orifício cilíndrico aberto no solo.

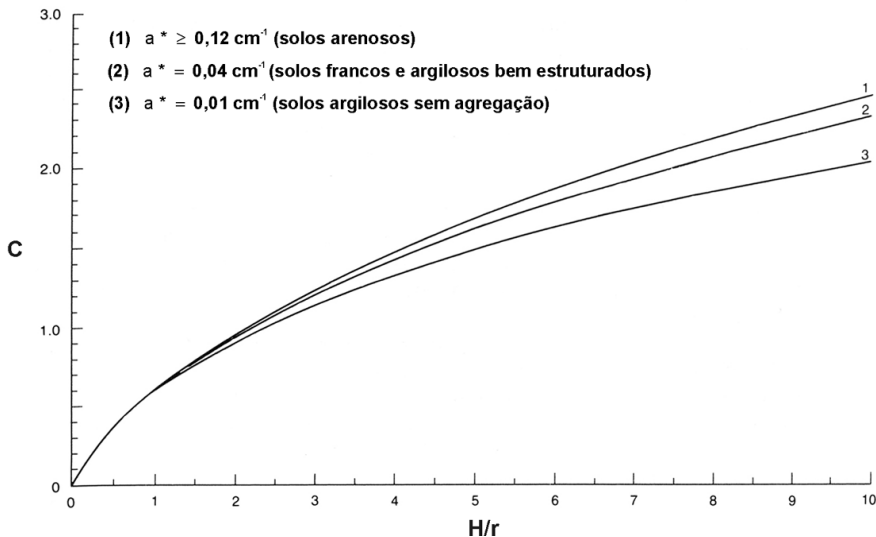


Figura 7. Factor de forma (C) para utilização no método do permeâmetro de Guelph (adaptado de REYNOLDS & ELRICK, 2002).

As curvas de $C = f(H/r)$ têm as seguintes expressões:

$$C_1 = [H / (2,074 r + 0,093 H)]^{0,754}$$

se $a^* \geq 0,12 \text{ cm}^{-1}$

$$C_2 = [H / (1,992 r + 0,091 H)]^{0,683}$$

se $a^* = 0,04 \text{ cm}^{-1}$

$$C_3 = [H / (2,102 r + 0,118 H)]^{0,655}$$

se $a^* = 0,01 \text{ cm}^{-1}$

Importa, ainda, referir a existência de diversas classificações dos solos quanto à permeabilidade (e.g., RAPOSO, 1996; MMA, 2000). No âmbito do presente estudo, adoptou-se a classificação proposta por SSDS (1993), baseada no valor de K_s , tal como se expõe no quadro 4.

Classe de permeabilidade	K_s ($\mu\text{m/s}$)	K_s (cm/h)
Muito alta	> 100,0	> 36,0
Alta	10,0 – 100,0	3,6 – 36,0
Moderadamente alta	1,0 – 10,0	0,36 – 3,6
Moderadamente baixa	0,1 – 1,0	0,036 – 0,36
Baixa	0,01 – 0,1	0,0036 – 0,036
Muito Baixa	< 0,01	< 0,0036

Quadro 4. Classificação dos solos quanto à permeabilidade (adaptado de SSDS, 1993).

AValiação DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DOS SOLOS NA BZMM

A condutividade hidráulica saturada dos solos foi avaliada *in situ* pelo método do permeâmetro de carga constante (permeâmetro de Guelph), de acordo com o método anteriormente descrito. Assim, mediu-se a condutividade hidráulica saturada de campo nos horizontes A (e, no caso do solo do local 8, no horizonte H) dos solos estudados, excepto nos casos em que a pedregosidade dos mesmos impossibilitou a aplicação deste dispositivo.

Foram utilizadas cargas hidráulicas, sucessivas e crescentes, de 5 cm e 10 cm, e um orifício com 3 cm de raio e 15 cm de profun-

didade — de acordo com o padrão indicado por SOILMOISTURE (2005). A avaliação de campo indicou, em todos os casos, o valor de a^* como sendo igual a $0,36 \text{ cm}^{-1}$ (ver quadro 3). Nestas condições, as expressões de cálculo de K_{sc} assumem a seguinte forma:

$$K_{sc1} = 3,007 \times 10^{-3} AR_1 \quad \text{se } H = 5 \text{ cm}$$

$$K_{sc2} = 1,535 \times 10^{-3} AR_2 \quad \text{se } H = 10 \text{ cm}$$

onde **A** e **H** foram anteriormente definidos; K_{sc1} e K_{sc2} são a condutividade hidráulica saturada de campo para cada carga hidráulica; R_1 e R_2 são as taxas de rebaixamento da

água no reservatório do permeâmetro para cada carga hidráulica. O valor final de K_{sc} resultou da média de K_{sc1} e K_{sc2} , de acordo com o procedimento descrito por REYNOLDS & ELRICK (2002).

No quadro 5 apresenta-se, a título de exemplo, uma folha de registo das observações dos ensaios. No quadro 6 apresentam-se os resultados de K_{sc} obtidos nos solos da BZMM.

Folha de Registo de Ensaio com Permeâmetro de Guelph					
Data: 12/06/2004		Investigador: Jorge Marques		Profundidade do orifício: 15.0 cm	
Nota: o raio padrão é de 3.0cm					
Constantes do reservatório					
Reservatórios combinados		X: 35,22 cm ²	✓ Ensaio: 2A (Giestal sobre moreia 1)		
Reservatório interno		Y: 2.15 cm ²			
Tabela 1 - leituras com carga hidráulica de 5cm					
Número da leitura	Tempo (min)	Intervalo de tempo (min)	Nível da água no reservatório (cm)	Varição no nível (cm)	Taxa de variação do nível (cm/min)
1	0	-	3,0		
2	1	1	6,0	3,0	3,0
3	2	1	7,8	1,8	1,8
4	3	1	9,2	1,4	1,4
5	4	1	10,5	1,3	1,3
6	5	1	11,6	1,1	1,1
7	6	1	12,7	1,1	1,1
8	7	1	13,7	1,0	1,0
9	8	1	14,7	1,0	1,0
10	9	1	15,7	1,0	1,0
11	10	1	16,7	1,0	1,0
12	11	1	17,6	0,9	0,9
13	12	1	18,4	0,8	0,8
14	13	1	19,4	1,0	1,0
15	14	1	20,2	0,8	0,8
16	15	1	20,9	0,7	0,7
17	16	1	21,7	0,8	0,8
18	17	1	22,6	0,9	0,9
19					
20					
Tabela 2 - leituras com carga hidráulica de 10cm					
Número da leitura	Tempo (min)	Intervalo de tempo (min)	Nível da água no reservatório (cm)	Varição no nível (cm)	Taxa de variação do nível (cm/min)
1	0	-	28,5		
2	1	1	30,0	1,5	1,5
3	2	1	31,5	1,5	1,5
4	3	1	33,1	1,6	1,6
5	4	1	34,6	1,5	1,5
6	5	1	36,1	1,5	1,5
7	6	1	37,5	1,4	1,4
8	7	1	38,9	1,4	1,4
9	8	1	40,4	1,5	1,5
10	9	1	41,8	1,4	1,4
11	10	1	43,3	1,5	1,5
12	11	1	44,7	1,4	1,4
13	12	1	46,2	1,5	1,5
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
Cálculos					
R_1	Taxa estável do fluxo da Tabela 1	=	0,83333 / 60 =	0,01389	cm/seg
R_2	Taxa estável do fluxo da Tabela 2	=	1,45000 / 60 =	0,02417	cm/seg
Condutividade hidráulica saturada de campo					
H = 5 cm:	$K_{sc1} = 0,003007 \times (X \text{ ou } Y) \times R_1$	=	0,00147	cm/seg	
H = 10 cm:	$K_{sc2} = 0,001535 \times (X \text{ ou } Y) \times R_2$	=	0,00131	cm/seg	
K_{sc} média		=	0,00139	cm/seg	

Quadro 5 — Folha de registo do ensaio de permeabilidade do solo do local 2.

Considerando a média dos ensaios para cada local de estudo, verifica-se que os solos estudados têm, sem exceção, permeabilidade alta (ou seja, entre 3,6 e 36,0 cm/h) segundo o critério SSDS (1993). O valor máximo de K_{sc} é de 13,64 cm/h (local 6) e o mínimo de 3,59 cm/h (local 2). O valor médio de K_{sc} de todos os ensaios é de 6,31 cm/h, com desvio padrão de 3,62 cm/h. A permeabilidade varia, então, num intervalo de valores relativamente estreito, facto que dificulta a identificação dos respectivos factores condicionantes. Com efeito, de acordo com ESPINHA MARQUES (2007), K_{sc} apresenta correlações baixas com variáveis tais como o teor em MO (0,177) ou a porosidade total (-0,192), sendo, apenas, de destacar a correlação desta variável com o teor de areia na terra fina (0,426).

A condutividade hidráulica insaturada como função da carga de pressão foi, então, estudada por intermédio do modelo de GARDNER (1958). Este modelo foi utilizado para representar o comportamento de

campo de K_i , mediante o valor de K_{sc} (6,31 cm/h), obtido através dos ensaios de campo com permeâmetro de carga constante, em condições de quase saturação dos solos.

A representação gráfica da função de condutividade hidráulica insaturada, relativa às condições de campo, consta da figura 8. A análise do gráfico permite verificar que os solos da BZMM são caracterizados por condutividades hidráulicas relativamente elevadas para potenciais de pressão próximos de zero. No entanto à medida que a drenagem tem lugar, K_i diminui rapidamente, atingindo valores próximos de zero com valores de h muito menores do que 341 cm (estimativa da capacidade de campo). Tal comportamento hidráulico é característico de solos com textura grosseira (e.g., FETTER, 1999; RADCLIFFE & RASMUSSEN, 2001; HILLEL 2004) nos quais, à medida que ocorre a drenagem, sucede o rápido esvaziamento dos macroporos, resultando, assim, uma diminuição brusca da capacidade do meio poroso para transmitir água.

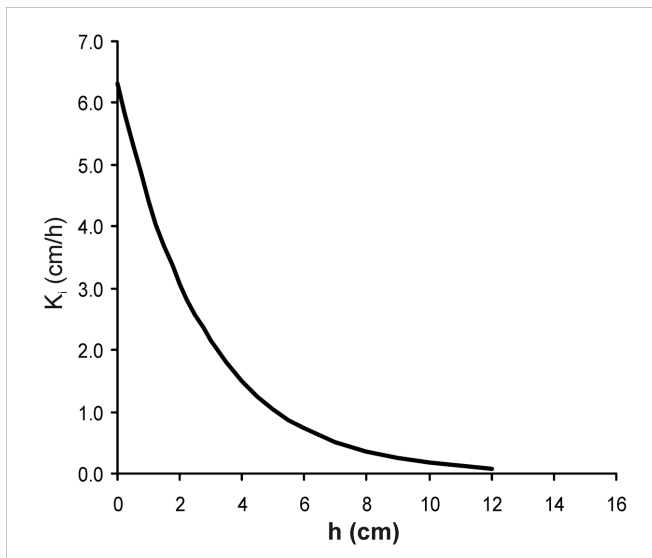


Figura 8. Representação gráfica da função de condutividade hidráulica insaturada da média dos solos da BZMM (modelo de GARDNER, 1958).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento da condutividade hidráulica dos solos é fundamental para a avaliação rigorosa de sistemas hidrológicos e dos respectivos recursos hídricos subterrâneos. Tal importância resulta, em grande medida, do facto de a disponibilidade de recursos hídricos subterrâneos (a qual depende, de sobremaneira, dos processos da infiltração e da recarga dos aquíferos), bem como a sua qualidade, dependerem fortemente das características físicas, químicas e biológicas da zona não saturada.

Neste contexto, a avaliação in situ da condutividade hidráulica do solo constitui um valioso instrumento de estudo, cujos resultados podem, mesmo ser utilizados para trabalhos de modelação matemática de fenómenos hidrogeológicos e hidropedológicos.

O permeâmetro de Guelph permite realizar ensaios de permeabilidade de solos não saturados, permitindo obter valores de K_{sc} , ou seja, em condições de quase saturação. Tais valores são mais representativos das condições naturais normalmente presentes na ZNS do que os valores de K_s obtidos em laboratório, com completa saturação das amostras de solo.

Os solos da BZMM apresentam, predominantemente perfil do tipo ACR (com

horizonte A úmbrico), textura grosseira, pH ácido, teor de matéria orgânica muito alto e porosidade total superior aos valores de referência para solos grosseiros.

Fora realizados 40 ensaios de permeabilidade no horizonte A e, num dos casos, no horizonte H, tendo sido obtido um valor médio de K_{sc} de 6,31 cm/h. Este valor, classificado como alto, é característico de solos de textura grosseira. Com base neste valor e recorrendo ao modelo de GARDNER (1958), obteve-se uma relação entre K_1 e h igualmente típica de solos grosseiros, com valores de K elevados para h próximo de zero (ou seja, em quase saturação), os quais se reduzem, rapidamente, à medida que h se aproxima da capacidade de campo.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi realizado no âmbito do Projecto de I&D HIMOCATCH (POCTI/CTA/44235/02), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia e por fundos europeus do FEDER. Os autores agradecem ao Prof. Doutor Afonso Martins (Dep. de Edafologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro) pela cedência de diversas informações relativas a solos graníticos de Portugal.

REFERÊNCIAS

- AGROCONSULTORES and GEOMETRAL (2004). Elaboração da carta de solos e de aptidão das terras da zona interior centro. Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica, Lisboa.
- AURELI, A. (2002). What's a head in UNESCO's International Hydrological Programme (IHP VI 2002-2007). *Hydrogeol. J.*, 10:349-350.

- BOUWER, H. (1978). Groundwater hydrology, 480 pp. McGraw-Hill, Inc, New York.
- CARSEL, F. F. and PARRISH, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research* 24, 5:755-769.
- COSTA, J. B. (1995). Caracterização e constituição do solo. 5ª Ed., 527 pp. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.

- DAVEAU, S. (1969). Structure et relief de la Serra da Estrela. *Finisterra, Lisboa*, 4, 7-8: 33-197.
- DAVEAU, S., FERREIRA, A. B., FERREIRA, N. and VIEIRA, G. (1997). Novas observações sobre a glaciação da Serra da Estrela. *Estudos do Quaternário, Lisboa*, 1: 41-51.
- DINGMAN, S. L. (1994). Physical hydrology, 575 pp. Prentice Hall, New Jersey.
- ELRICK, D. E., REYNOLDS, W. D. and TAN, K. A. (1989). Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Groundwater Monit. Rev.*, 9: 184-193.
- ESPINHA MARQUES J., DUARTE J. M., CONSTANTINO, A. T., MARTINS, A. A., AGUIAR, C., ROCHA, F. T., INÁCIO, M., MARQUES, J. M., CHAMINÉ, H. I., TEIXEIRA, J., SAMPER, J., BORGES, F. S. and CARVALHO J. M. (2007). Vadose zone characterisation of a hydrogeologic system in a mountain region: Serra da Estrela case study (Central Portugal). In: L. CHERY & Gh. de MARSILY (Eds.), *Aquifer systems management: Darcy's legacy in a World of impending water shortage, SP-10 Selected papers on Hydrogeology*, IAH, Taylor & Francis Group, Volume 10, pp. 207-221.
- ESPINHA MARQUES, J., MARQUES, J. M., CHAMINÉ, H. I., CARREIRA, P. M., FONSECA, P. E., SAMPER, J., VIEIRA, G. T., MORA, C., TEIXEIRA, J., MARTINS CARVALHO, J., SODRÉ BORGES, F. and ROCHA, F.T. (2006). Hydrogeochemical model of a low temperature geothermal system in a mountainous terrain, Serra da Estrela, Central Portugal. *Geothermal Resources Council Transactions*, 30:913-918.
- ESPINHA MARQUES, J., MARQUES, J. M., CHAMINÉ, H. I., AFONSO, M. J., CARREIRA, P. M., FONSECA, P. E., CABRAL, J., MONTEIRO SANTOS, F. A., VIEIRA, G. T., MORA, C., GOMES, A., TEIXEIRA, J., SAMPER, J., PISANI, B. J., AGUIAR, C., GONÇALVES, J. A., ALMEIDA, P. G., CAVALEIRO, V., MARTINS CARVALHO, J., SODRÉ BORGES, F., AIRES-BARROS, L. and ROCHA, F. T. (2005). Hydrogeological study of a high mountain area (Serra da Estrela, Central Portugal): a multidisciplinary approach. *Cadernos Labor. Xeol. Laxe*, A Coruña, 30:145-166.
- ESPINHA MARQUES, J. M. (2007). Contribuição para o conhecimento da hidrogeologia da região do Parque Natural da Serra da Estrela (Sector de Manteigas – Nave de Santo António – Torre), 466 pp., Universidade do Porto, Faculdade de Ciências. (Tese de Doutoramento).
- FAO – food and agriculture organization of the United Nations (1998). World reference base for soil resources. *World Soil Resources Reports*, 84.
- FETTER, C. W. (1999). Contaminant hydrogeology, 500 pp. Prentice-Hall, New Jersey.
- GARDNER, W. R. (1958). Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 85:228-232.
- HASSAN, R., SCHOLLES, R. and ASH, N. (Eds.) (2005). Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group. *Millennium Ecosystem Assessment*, Series Vol. 1, 917 pp. Island Press, Washington, DC.

- HILLEL, D. (2004). Introduction to environmental soil physics, 494 pp. Elsevier Academic Press, Amsterdam, San Diego.
- LAUTENSACH, H. (1932). Estudo dos glaciares da Serra da Estrela. Memórias e Notícias, Coimbra, 6: 1-60.
- MMA – Ministério de Médio Ambiente (2000). Guia para la elaboración de estudios del medio físico, 809 pp., Madrid. (Serie Monografias).
- MORA, C. (2006). Climas da Serra da Estrela, características regionais e particularidades locais dos Planaltos e do Alto Vale do Zêzere, 427 pp. Universidade de Lisboa. (Tese de Doutoramento).
- NAP – National Academy Press (1997). Valuing ground water. Economic concepts and approaches, 189 pp. Washington, D.C.
- NIELSEN, D. R., VAN GENUCHTEN, M. T. and BIGGAR, J. W. (1986). Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone. *Water Resources Research*, 22:89S-109S.
- OLIVEIRA, J. T., PEREIRA, E., RAMALHO, M., ANTUNES, M. T., and MONTEIRO, J. H., [Coords.] (1992). Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000. 5ª Ed., 2 folhas. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- RADCLIFFE, D. E. and RASMUSSEN, T. C. (2002). Soil water movement. In: A. W. WARRICK, Ed., *Soil physics companion*, p. 85-126. CRC Press, Boca Raton.
- RAPOSO, J. R. (1996). A rega, dos primitivos regadios às modernas técnicas de rega, 485 pp. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- REYNOLDS, W. D. (1993). Saturated hydraulic conductivity: field measurement. In: M. R. CARTER, Ed., *Soil Sampling and Methods of Analysis*, p. 599-613. Lewis Publ., Boca Rato.
- REYNOLDS, W.D. and ELRICK, D.E. (1986). A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity–pressure head relationship. *Ground Water Monitoring Review*, Winter, p.84–95.
- REYNOLDS, W. D. and ELRICK, D. E. (1987). A laboratory and numerical assessment of the Guelph permeameter method. *Soil Sci.*, 144:282–299.
- REYNOLDS, W. D. and ELRICK, D. E. (2002). Constant head well permeameter (vadose zone). In: J. H. DANE & G. C. TOPP, Eds, *Methods of soil analysis*, part 4, physical methods, p. 844-858. Soil Science Society of America, Inc., Wisconsin.
- REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. E. and TOPP, G. C. (1983). A re-examination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.*, 136:250-268.
- RIBEIRO, A. (1988). A Tectónica Alpina em Portugal. *Geonovas*, Rev. Assoc. Portg. Geól., Lisboa, 10:8-11.
- RIBEIRO, A., QUESADA, C. and DALLMEYER, R. D. (1990). Geodynamic evolution of the Iberian Massif. In: R. D. DALLMEYER & E. MARTÍNEZ-GARCÍA, Eds, *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, p.397-410. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- SOILMOISTURE (2005). Model 2800K1 Guelph permeameter operating instructions, 51 pp. Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara.
- SSDS – Soil Survey Division Staff (1993). Examination and description of soils. In: *Soil Survey Manual (new edition). Agricultural Handbook No. 18*, Chapter 3. Soil Conservation Service, Washington DC.

- USSCS – U. S. Soil Conservation Service (1964.) Hydrology, Section 4. In: *SCS National Engineering Handbook*. Washington, DC.
- VARELA, M. (1993). El medio físico. Relaciones agua-aire-suelo. In: L. CANDELA & M. VARELA, Eds, *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas. Teoría, medición y modelos*, p. 11-26. Cimne, Barcelona.
- VIEIRA, G. T. (2004). Geomorfologia dos planaltos e altos vales da Serra da Estrela. Ambientes frios do Plistocénico Superior e dinâmica actual, 724 pp.; 1 mapa. Universidade de Lisboa. (Tese de Doutoramento).
- WHITE, I. and SULLY, M. J. (1987). Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resources Research*. 23:1514-1522.