

Avaliação de recursos hídricos através de modelação hidrológica: aplicação do programa VISUAL BALAN v2.0 a uma bacia hidrográfica na Serra da Estrela (Centro de Portugal)

Assessment of water resources using hydrological modelling: applying VISUAL BALAN v2.0 code to a river basin in Serra da Estrela (Central Portugal)

ESPINHA MARQUES¹, J.; SAMPER², J.; PISANI², B.V.; ALVARES², D.; VIEIRA³, G.T.; MORA³, C., CARVALHO⁴, J.M.; CHAMINÉ⁴, H.I.; MARQUES⁵, J.M. and SODRÉ BORGES, F¹.

Abstract

Numerical models are needed to evaluate complex hydrological systems. VISUAL BALAN v2.0 is a lumped hydrological code which performs daily water balances in the soil, the unsaturated zone and the aquifer requiring a small number of parameters. VISUAL BALAN has been used to model the river Zêzere catchment upstream of Manteigas (Serra da Estrela, Central Portugal), in order to assess its water resources. Modelling started with the definition of sub-basins based on hydrogeomorphological units. Then, daily temperature and precipitation data from Manteigas meteorological station were extrapolated to each sub-basin considering vertical gradients. Finally, modelling with VISUAL BALAN was performed in four stages: (i) physical characterisation of each sub-basin; (ii) preliminary calculations of the daily water balance; (iii) model calibration by means of flow measurements in the river Zêzere; (iv) result analysis. This basin exhibits complex patterns in hydrometeorological variables such as rainfall and temperature. Several sub-basins have been defined in order to account for the spatial variability in hydrometeorological and geomorphological variables. The model reproduces observed flowrates while its results are coherent with the conclusions of previous studies in similar basins.

Key words: *water balance, hydrological models, aquifer recharge, VISUAL BALAN.*

(1) Dep. de Geologia (CGUP), Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto, Portugal. (E-mail: jespinha@fc.up.pt).

Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe
Coruña. 2006. Vol. 31, pp. 43 - 65

- (2) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de La Coruña, España.
- (3) Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa, Portugal.
- (4) Dep. de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal; e Centro de Minerais Industriais e Argilas (MIA) da Universidade de Aveiro, Portugal.
- (5) Dep. de Engenharia de Minas e Georrecursos, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, Portugal.

INTRODUÇÃO

A modelação tem sido considerada um instrumento fundamental para o estudo de sistemas hidrológicos (por ex.: DINGMAN, 1993; FETTER, 2001; FITTS, 2002). Como os sistemas de medição dos processos hidrológicos apresentam limitações quanto ao tipo de técnicas usadas e quanto à distribuição espaço-temporal dos registos, a modelação surge como um modo de simular o comportamento hidrológico, extrapolando os dados disponíveis (BEVEN, 2001). Neste contexto, a modelação tem sido habitualmente usada para auxiliar a compreensão do funcionamento dos sistemas e, mesmo, para a previsão do seu comportamento futuro, de acordo com modificações de uma ou mais das suas características.

Existem numerosas classificações de modelos. No caso dos modelos aplicados em Hidrogeologia, FETTER (2001) menciona os seguintes tipos: (i) modelos físicos à escala, (ii) modelos analógicos e (iii) modelos matemáticos. Se, numa fase inicial do emprego destes métodos, os modelos dos tipos (i) e (ii) eram os mais frequentes, com a generalização de computadores e programas informáticos eficientes, os modelos matemáticos passaram a predominar (SINGHAL and GUPTA, 1999).

O modelo dum sistema natural é, por definição, uma representação formal e simplificada duma dada realidade. A elaboração dum modelo conceptual preliminar (expresso por ideias, palavras e valores numéricos) constitui o fundamento da modelação matemática subsequente (NAP, 2001), sendo a qualidade dos resultados obtidos grandemente dependente da qualidade do modelo conceptual previamente adoptado. O processo de conceptualização implica a compreensão da natureza do sistema hidrológico, as suas características genéricas (tais como a litologia, o tipo de solo, o relevo, a variabilidade espacial dos parâmetros hidráulicos, a hidrogeoquímica, as características geológicas e geométricas dos limites do sistema, etc.) e os processos físicos e químicos envolvidos; o modelo matemático pro-

cura, por seu turno, simular o modelo conceptual. O modelo conceptual é consequência da percepção do investigador em relação ao funcionamento do sistema, a qual depende grandemente da sua experiência, com destaque para a de campo. O desenvolvimento dum modelo exige um processo iterativo: os resultados da modelação matemática contribuem para o aperfeiçoamento do modelo conceptual e vice-versa, de modo encadeado.

BEVEN (2001), sugere duas fases para a selecção do modelo matemático mais apropriado para cada caso. Em primeiro lugar, deve-se escolher entre um modelo agregado (ou seja, que trata a bacia como um todo, considerando valores médios para as diferentes variáveis de estado e parâmetros, sendo obtidos resultados globais) e um modelo distribuído (ou seja, com valores das variáveis de estado, parâmetros e resultados distribuídos no espaço, recorrendo, para isso, à discretização da bacia). Em segundo lugar, há que decidir entre um modelo determinístico (ou seja, que produz apenas um resultado mediante um certo conjunto de dados de entrada) e um modelo estocástico (ou seja, que admite alguma incerteza nos resultados em consequência de incerteza nos dados).

O presente trabalho ilustra a aplicação do método do balanço hidrológico ao sector da Serra da Estrela correspondente à bacia hidrográfica do rio Zêzere a montante da vila de Manteigas (Fig. 1), tendo como principal objectivo estimar a disponibilidade de recursos hídricos subterrâneos. Para tal, foi usado o programa VISUAL BALAN v2.0, o qual permite realizar balanços hidrológicos sequenciais diários abrangendo o solo, a zona não saturada e o aquífero. O programa tem como base um modelo matemático agregado e determinístico.

Esta região apresenta características geológicas, geomorfológicas e climáticas específicas, que condicionam directamente o ciclo hidrológico regional e, consequentemente, a disponibilidade de recursos hídricos. Estes recursos, de elevada qualidade e valor económico, incluem águas subterrâneas (normais e termominerais) e águas superficiais.

O processo de elaboração dum modelo hidrológico conceptual preliminar - juntamente com os resultados irrealistas das primeiras tentativas de modelação através do programa VISUAL BALAN - evidenciou a elevada variabilidade espacial das características físicas da bacia estudada, exigindo um trabalho de definição de sub-bacias mais homogéneas, baseadas em unidades hidrogeomorfológicas. De seguida, os dados provenientes da estação meteorológica de Manteigas (precipitação diária e temperatura média diária) foram extrapolados para cada sub-bacia, tomando como base o cálculo de gradientes verticais de precipitação e temperatura.

O programa VISUAL BALAN foi, então, novamente aplicado, tendo a comparação entre os valores calculados e medidos do escoamento no rio Zêzere permitido avaliar e calibrar o modelo.

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 é dominada pela megaestrutura regional designada por zona de falha de Bragança-Vilariça-Manteigas (ZFBVM), a qual corresponde a um desligamento de movimento esquerdo que constitui uma das mais importantes estruturas do sistema tardi-Varisco de fracturas do Noroeste da Ibéria (Fig. 1). A sua reactivação durante o Cenozóico pela tectónica compressiva Alpina, juntamente com a reactivação de falhas regionais predominantemente inversas (tais como a falha de Seia-Lousã), deu origem ao soerguimento do maciço montanhoso da Serra da Estrela sob forma dum *horst* numa estrutura do tipo *pop-up* (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 integra a Cordilheira Central Ibérica, uma cadeia montanhosa de orientação ENE-WSW, correspondendo a uma morfoestrutura de tipo "montanha de blocos" (*cf.* O. RIBEIRO, 1954), com cerca de 500 km de extensão e 40 km de largura, estendendo-se desde a Serra da Lousã até a Somosierra, a norte de Madrid. A Serra da Estrela é o sector mais oriental e elevado 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 (LAUTENSACH, 1932; DAVEAU, 1969). Com altitude máxima de 1993 m (a mais elevada de Portugal Continental), esta montanha exhibe características climáticas e geomorfológicas particulares que desempenham um papel importante no ciclo hidrológico local, especialmente no sub-ciclo hidrogeológico.

A bacia do Zêzere a montante de Manteigas (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, de 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. Estes planaltos são compósitos, exibem superfícies aplanadas a diferentes altitudes e incluem alguns vales amplos. 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).

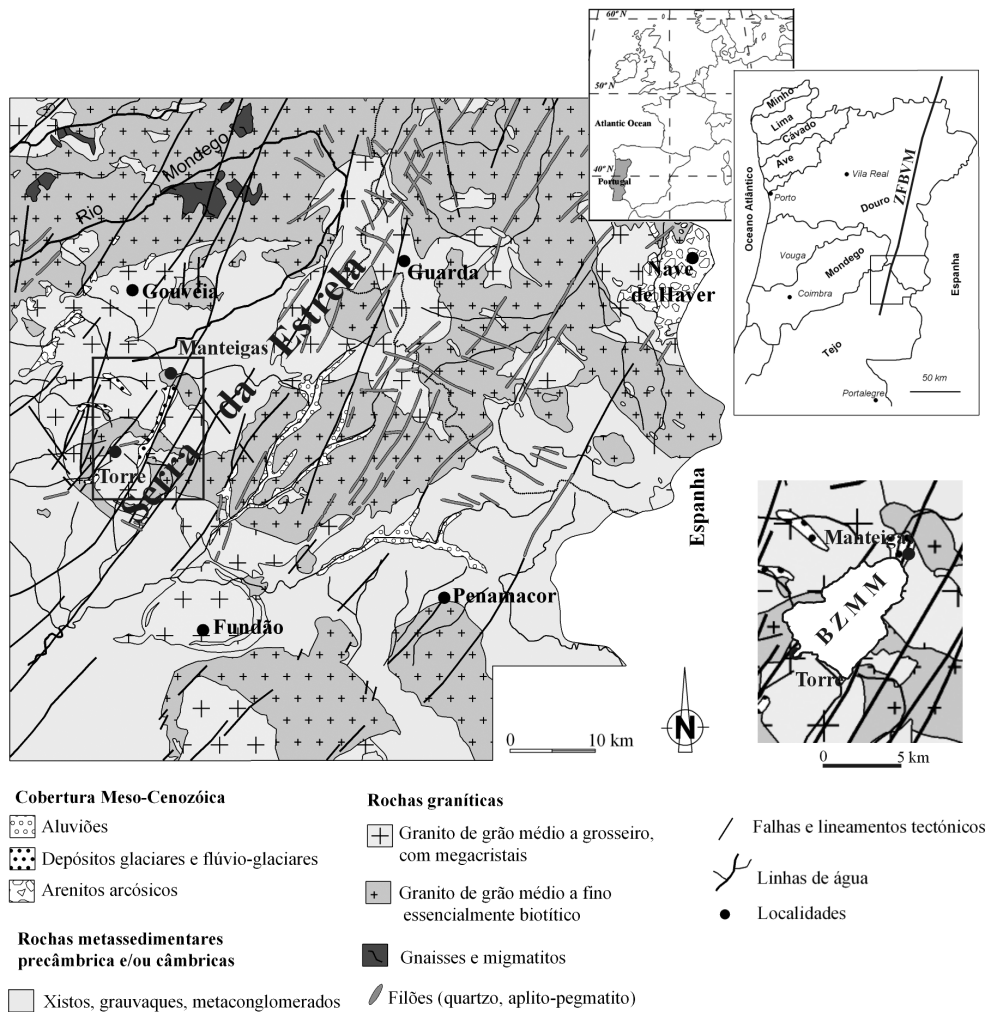


Figura 1. Geologia da região da Serra da Estrela (simplificado de OLIVEIRA et al., 1992)

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. A zona ocidental do maciço apresenta maior número de dias com precipitação do que a zona oriental (mas um valor médio anual ligeiramente inferior). Por outro lado constata-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 devido à sua relação com o fluxo das massas de ar, nomeadamente com mecanismos complexos de convergência e divergência controlados pela morfologia da montanha.

A informação relativa à queda de neve é escassa e de reduzida qualidade. No entanto, a importância hidrológica da neve, nomeadamente no que respeita ao papel desempenhado pela mesma na infiltração e recarga dos aquíferos, justifica o aprofundamento do conhecimento do seu padrão de precipitação e da evolução sazonal da cobertura nevosa. A irregularidade espacial e temporal dos fenómenos relacionados com a neve tem sido referida em estudos anteriores (ANDRADE *et al.*, 1992; MORA and VIEIRA, 2004).

VIEIRA and MORA (1998) verificaram que a temperatura média mensal medida nas estações meteorológicas das Penhas Douradas, Lagoa Comprida e Penhas da Saúde revelam que 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.

A distribuição espacial da precipitação na Serra da Estrela é complexa e os padrões são variáveis de ano para ano. O principal factor explicativo é a altitude, mas, como se referiu, a exposição ao fluxo sinóptico das massas de ar pluviogénicas é também determinante. Esta última componente é de difícil modelação e, embora tenham sido testadas diferentes variáveis através de regressão múltipla, tentando reflecti-la (por ex. latitude e longitude), os resultados obtidos não foram estatisticamente significativos. Optou-se assim, por apenas considerar a altitude, calculando modelos de regressão simples para os valores médios mensais e anuais. Usaram-se dados das estações meteorológicas de Gouveia, Seia, Vale de Rossim, Valhelhas, Covilhã,

Celorico da Beira e Fornos de Algodres (Instituto da Água) e de Penhas Douradas, Lagoa Comprida, Penhas da Saúde, e Fundão (Instituto de Meteorologia) para o período de 1953 a 1983. A utilização da discriminação mensal permite melhor estimar a variabilidade espacial da precipitação na montanha, pois os gradientes altitudinais não são constantes ao longo do ano (MORA, 2006). Os modelos obtidos são todos estatisticamente significativos (Quadro 1).

Mês	Modelo analítico	R ²
Janeiro	$y = 0.142x + 77.9$	0.63
Fevereiro	$y = 0.102x + 94.84$	0.60
Março	$y = 0.098x + 67.78$	0.71
Abril	$y = 0.075x + 49.65$	0.76
Maió	$y = 0.077x + 36.34$	0.76
Junho	$y = 0.46x + 22.04$	0.75
Julho	$y = 0.009x + 7.97$	0.75
Agosto	$y = 0.012x + 8.64$	0.83
Setembro	$y = 0.036x + 23.87$	0.92
Outubro	$y = 0.11x + 41.98$	0.79
Novembro	$y = 0.13x + 70.97$	0.72
Dezembro	$y = 0.12x + 86.81$	0.67
Anual	$y = 0.99x + 542.22$	0.73

Quadro1. Relação entre precipitação média mensal (y, em mm) e altitude (x, em m).

A distribuição espacial das temperaturas médias mensais do ar é mais simples de modelar do que a precipitação, pois o controlo exercido pela altitude é o mais significativo. Além disso, os factores locais, como a morfologia, que influenciam determinantemente as temperaturas máximas e mínimas, não influenciam de forma significativa as temperaturas médias mensais e anuais. Usaram-se os dados das estações meteorológicas de Penhas Douradas, Penhas da Saúde, Lagoa Comprida, Nelas e Fundão (IM) para o período de 1953 a 1983 e as regressões simples obtidas revelaram-se estatisticamente muito significativas, com coeficientes de determinação sempre superiores a 0,9 (Quadro 2).

Mês	Modelo analítico	R ²
Janeiro	$y = -0.005x + 9.6$	0.99
Fevereiro	$y = -0.005x + 10.9$	0.99
Março	$y = -0.005x + 12.8$	0.99
Abril	$y = -0.006x + 14.8$	0.98
Maió	$y = -0.006x + 17.91$	0.98
Junho	$y = -0.006x + 21.77$	0.98
Julho	$y = -0.005x + 24.15$	0.90
Agosto	$y = -0.005x + 24.46$	0.92
Setembro	$y = -0.005x + 21.87$	0.96
Outubro	$y = -0.005x + 17.51$	0.98
Novembro	$y = -0.005x + 12.57$	0.99
Dezembro	$y = -0.004x + 9.51$	0.98
Anual	$y = -0.0056x + 16.4$	0.98

Quadro 2. Relação entre temperatura média mensal (y, em °C) e altitude (x, em m).

Com o propósito de fornecer a base do modelo conceptual a adoptar na modelação com o programa VISUAL BALAN, foram estabelecidas unidades hidrogeomorfológicas (ESPINHA MARQUES et al., 2006; ESPINHA MARQUES, *in prep.*). A elaboração deste tipo de unidade resultou da necessidade de se identificar áreas homogéneas relativamente aos principais factores habitualmente considerados para o estudo da circulação de águas subterrâneas, em particular no que respeita à infiltração, recarga e descarga dos aquíferos (e.g., CASTANY, 1972; CUSTÓDIO and LLAMAS, 1996; FITTS, 2002): o relevo, o substrato geológico e, adicionalmente, as condições climáticas. Estes factores, por seu turno, controlam grandemente a distribuição espacial dos tipos de solo e do respectivo coberto vegetal, os quais, por seu lado, influenciam o processo da infiltração. De facto, a região estudada caracteriza-se pela forte variabilidade espacial de todos aqueles factores, donde resulta uma apreciável complexidade hidrológica, a qual não pode ser apreendida apenas através de unidades hidrogeológicas.

A definição destas unidades desenrolou-se através de três fases: (i) num primeiro momento, tomando como ponto de partida o relevo, foi estabelecido um zonamento da

BZMM segundo os principais tipos morfológicos: planalto, vertente, fundo de vale e colo; (ii) seguidamente, os limites das unidades foram apurados considerando os tipos de substrato geológico (rocha granítica ou depósitos fluvioglaciários); deste modo, acentuouse o predomínio dum dado litótipo em cada unidade hidrogeomorfológica; (iii) por último, levando em conta a forte variabilidade espacial das condições climáticas, algumas unidades hidrogeomorfológicas foram divididas tendo em conta a altitude - unidade inferior e unidade superior - e, no caso das encostas do segmento NNE-SSW do vale do Zêzere, a orientação predominante das vertentes - unidade oriental e unidade ocidental.

No final do processo, foram definidas nove unidades hidrogeomorfológicas (Fig. 2), denominadas segundo a forma de relevo dominante, a saber: (1) Planalto Oriental; (2) Encostas Orientais; (3) Fundo de Vale (inferior); (4) Colo da Nave de Santo António; (5) Fundo de Vale (superior); (6) Encostas Ocidentais; (7) Encostas dos Cântaros; (8) Planalto Ocidental (inferior); (9) Planalto Ocidental (superior). O Quadro 3 apresenta as principais características de interesse hidrológico de cada unidade, segundo AGROCONSULTORES and GEOMETRAL (2004), ESPINHA MARQUES et al. (2006) e ESPINHA MARQUES (*in prep.*). A Figura 3 ilustra alguns aspectos de interesse hidrológico existentes na BZMM.

O CÓDIGO VISUAL BALAN

VISUAL BALAN é um código hidrológico agregado, desenvolvido especialmente para a estimação dos recursos hídricos (SAMPLER et al., 1999). Resolve as equações do balanço hidrológico no solo (em sentido pedológico), na zona não saturada (a qual, neste código, exclui o solo pedológico) e no aquífero, estimando as componentes de maneira sequencial (Fig. 4).

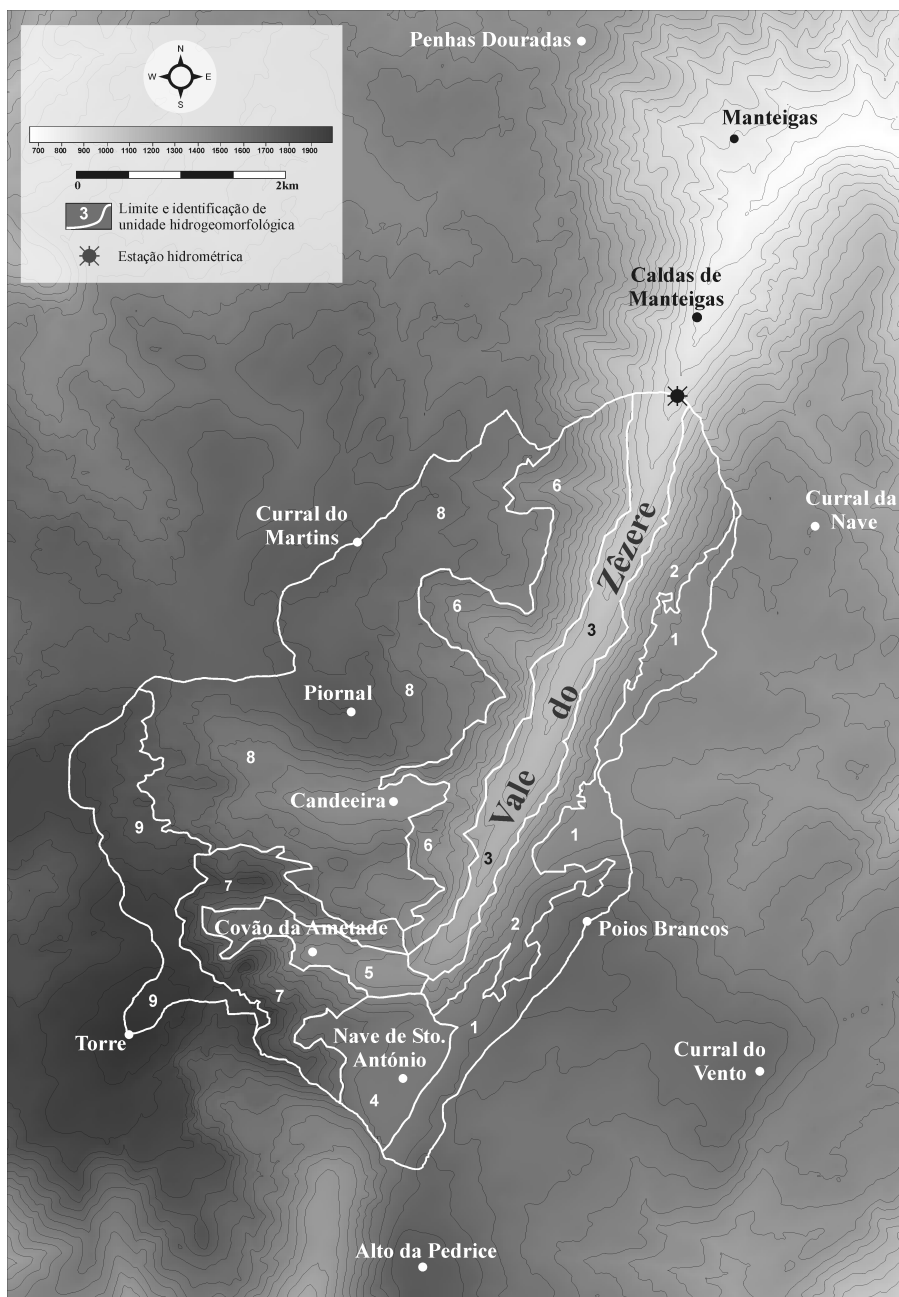


Figura 2. Unidades hidrogeomorfológicas da BZMM: (1) Planalto Oriental; (2) Encostas Orientais; (3) Fundo de Vale (inferior); (4) Colo da Nave de Santo António; (5) Fundo de Vale (superior); (6) Encostas Ocidentais; (7) Encostas dos Cântaros; (8) Planalto Ocidental (inferior); (9) Planalto Ocidental (superior); (adaptado de Espinha Marques, *em prep.*).

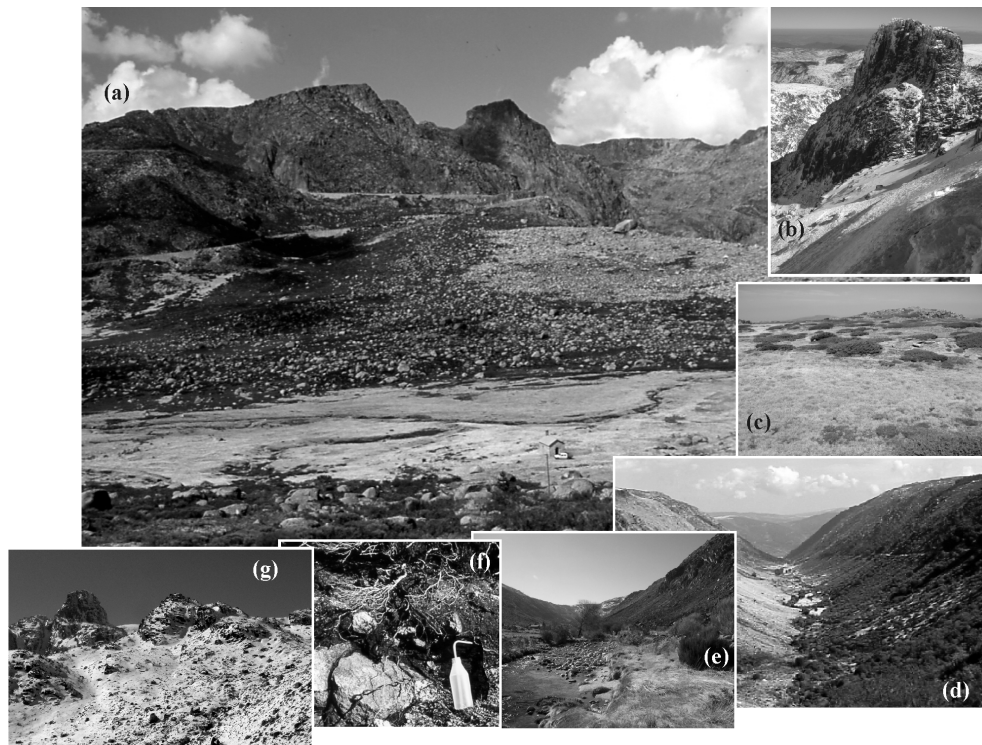


Figura 3. Alguns aspectos da bacia do rio Zêzere a montante de Manteigas: (a) cervunal da Nave de Santo António, em primeiro plano, depósito de moreia, em plano intermédio, e Encostas dos Cântaros, ao fundo; (b) Cântaro Magro; (c) cervunal, zimbral e afloramentos graníticos nas imediações da Torre; (d) vale glaciário do Zêzere; (e) fundo do vale glaciário do Zêzere; (f) Leptossolo; (g) encostas nevadas.

Este código assume como base a equação do balanço da água no solo entre dois momentos do tempo, t_0 e t_1 ($\Delta t = t_1 - t_0$), expressando-se do seguinte modo:

$$P + D - I_n - E_s - ETR - P_e = \Delta \theta$$

Ou, considerando $I = P + D - I_n - E_s$:

$$I - (ETR + P_e) = \Delta \theta$$

P é a precipitação, D a água de irrigação, I_n a intercepção, E_s o escoamento superficial, ETR a evapotranspiração real, P_e a recarga em trânsito ou precipitação eficaz (a qual coincide com a recarga do aquífero caso não existam fluxos laterais na zona não saturada,

ainda que com diferença temporal), $\Delta \theta$ a variação do teor de humidade no solo e I a infiltração. As componentes do balanço expressam-se em termos de volume de água acumulado a longo do intervalo Δt .

O código VISUAL BALAN requer poucos parâmetros, sendo apresentado num ambiente amigável para a entrada de dados e a saída de resultados (Fig. 5). Os níveis piezométricos e os caudais do escoamento no rio Zêzere podem ser comparados com os valores medidos, permitindo a calibração do modelo.

VISUAL BALAN e sua versão anterior (BALAN) foram aplicados por hidrologistas e

Unidade Hidrogeomorfológica	Altitude média (m)	Fracção da área da bacia (%)	Litologia dominante	Perfil do solo dominante	Unidades Pedológicas (1. Dominantes, 2. Subdominantes, 3. Eventuais)	Grupos hidrologicos do solo	Cobertura vegetal
1. Planalto Oriental	1514	8,85	Granito	AC, AR	1. Umbrissolos; 2. Afloramentos rochosos e Leptosolos	C, D	Floresta de resinosas e folhosas, giestal, urzal
2. Encostas Orientais	1337	10,38	Granito	AC, AR	1. Umbrissolos; 2. Afloramentos rochosos e Leptosolos	C, D	Floresta de resinosas e folhosas, giestal, urzal
3. Fundo de Vale (inferior)	1113	9,44	Depósito fluvioglaciário	AC	1. Umbrissolos, 2. Umbrissolos e Fluvissois	A, B, C, D	Pastagens, zonas cerealíferas, giestal, floresta de folhosas e resinosas, urzal
4. Colo da Nave de Santo António	1557	4,36	Depósito fluvioglaciário	AC, ABC	1. Umbrissolos, 2. Fluvissois	A, B, C, D	Cervunal, urzal, giestal
5. Fundo de Vale (superior)	1511	2,90	Granito/ Depósito fluvioglaciário	AR, AC	1. Afloramentos rochosos, 2. Leptosolos, Fluvissois, 3. Umbrissolos	D, C	Cervunal, giestal, floresta de folhosas e resinosas, urzal, pastagens, zonas cerealíferas
6. Encostas Ocidentais	1354	14,73	Granito	AR, AC	1. Afloramentos rochosos, 2a. Leptosolos (topo da vertente), 2b. Umbrissolos (base da vertente)	D, B, A, C	Giestal, urzal, pastagem, floresta de resinosas
7. Encostas dos Cântaros	1704	8,57	Granito	AR	1. Afloramentos rochosos, 3. Leptosolos úmbricos	D	Urzal
8. Planalto Ocidental (inferior)	1596	33,76	Granito	AR	1. Afloramentos rochosos, 2. Leptosolos, 3. Umbrissolos	D, C	Urzal, giestal, cervunal, zimbral
9. Planalto Ocidental (superior)	1857	7,01	Granito	AR	1. Afloramentos rochosos, 2. Leptosolos, 3. Umbrissolos.	D	Cervunal, zimbral

Quadro 3 - Características das unidades hidrogeomorfológicas.

hidrogeólogos de Espanha e América Latina em diferentes campos da Hidrologia. O programa tem sido objecto de numerosas aplicações, em particular na estimação dos recursos hídricos (SAMPER and GARCIA VERA 1997, 2000, 2004; HEREDIA and MURILO,

2002; SORIANO and SAMPER, 2000; SAMPER et al., 2005a,b), em estudos de gestão de resíduos radioactivos de baixo nível (SAMPER and CARRERA, 1995) e na gestão de resíduos tóxicos (ALIAGA et al., 2004).

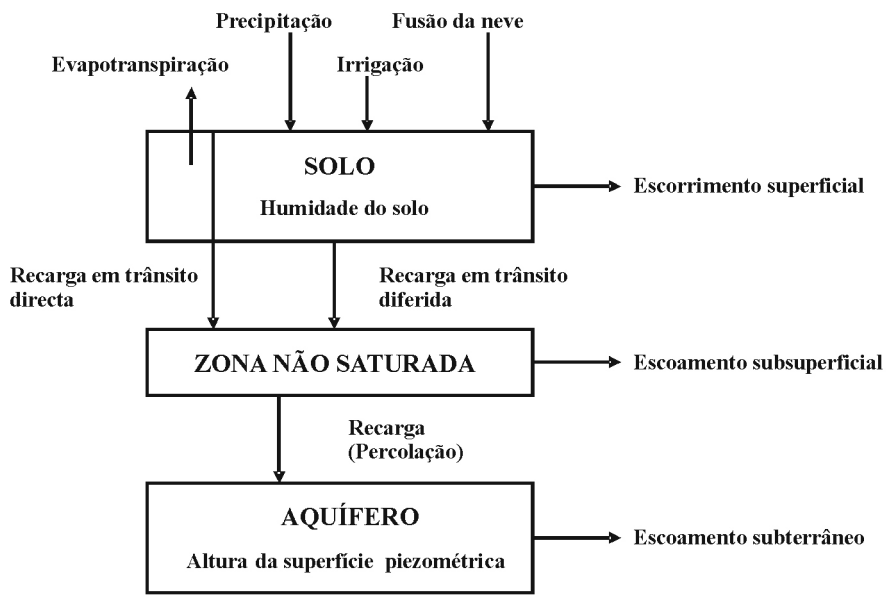


Figura 4. Esquema hidrológico conceptual adoptado pelo VISUAL BALAN (adaptado de SAMPER et al., 1999).

De acordo com o esquema conceptual adoptado pelo VISUAL BALAN (Fig. 4), a água da precipitação, da fusão da neve e da irrigação distribuem-se entre intercepção, escoamento superficial e infiltração. Ou seja, a precipitação uma vez deduzida a intercepção juntamente com a água de irrigação e a água libertada pela fusão da neve constituem as principais entradas no solo. A intercepção pode ser calculada mediante o método de Horton ou de Singh. A fusão da neve é um

mecanismo adicional de geração de escoamento superficial. O método incorporado está baseado na metodologia do programa SWMM (HUBER and DICKINSON, 1992). Por seu lado, a infiltração pode ser calculada mediante o método de Horton ou do Número de Curva do Soil Conservation Service (USDA, 1986). O escoamento superficial é calculado como a diferença entre a água ministrada ao solo (por via natural ou por irrigação) e a infiltração.

Parte da água infiltrada abandona o solo através da ETR, outra parcela é adicionada à água armazenada no solo contribuindo o restante para a denominada recarga em trânsito ou precipitação eficaz. Esta última parcela constitui a entrada de água na zona não saturada.

Os valores de evapotranspiração potencial (ETP) podem ser introduzidos pelo utilizador ou calculados com um dos seguintes métodos: Thornthwaite, Blanney-Criddle, Makkink, Penman, Turc e Hargreaves. A ETR é calculada a partir da ETP usando o método original de Penman-Grindley ou variantes com modificações ligeiras.

O VISUAL BALAN pode considerar o fluxo preferente (rápido) através do solo. Desta forma, a recarga em trânsito pode ter duas componentes: (i) fluxo preferente, ou recarga em trânsito directa, que pode ocorrer através de fissuras e/ou macroporos, atravessando o solo sem sofrer evapotranspiração; e (ii) fluxo Darcyniano, ou recarga em trânsito diferida, que obedece à lei de Darcy sendo mais lento que o fluxo preferente, e dependendo da reserva útil e da condutividade hidráulica. A recarga em trânsito diferida é calculada considerando que somente ocorre quando a humidade é maior que a capacidade de campo, não podendo exceder a permeabilidade vertical do solo.

É adoptado um modelo conceptual de fluxo na zona não saturada segundo o qual a água pode fluir horizontalmente atingindo a superfície como escoamento subsuperficial ou movimentar-se verticalmente até ao aquífero alimentando a recarga (por percolação). Para o cálculo da percolação é utilizada uma formulação da Lei de Darcy que leva em consideração a presença de aquíferos suspensos. No balanço na zona não saturada existe uma entrada (a recarga em trânsito) e duas saídas (o escoamento subsuperficial e a recarga do aquífero resultante da percolação).

A recarga constitui, então, a entrada da água no aquífero. Para o balanço de água no aquífero VISUAL BALAN permite considerar modelos uni e multicelulares interligados.

O fluxo entre as células calcula-se mediante um esquema explícito de diferenças finitas comparável à solução da equação 1-D de fluxo transitório. A descarga subterrânea é a saída natural do aquífero para nascentes, rios ou outro reservatório de água superficial.

A variação do volume de água armazenada no aquífero (ΔV_a) por unidade de superfície está relacionada com a variação do nível piezométrico (Δh) através da equação $\Delta V_a = S \cdot \Delta h$ onde S é o coeficiente de armazenamento do aquífero.

Por outro lado, o caudal total de saída da bacia (ou seja, o escoamento através do rio Zézere) é calculado como a soma do escoamento superficial, do escoamento subsuperficial e da descarga subterrânea. O programa permite estimar automaticamente os parâmetros do modelo mediante a minimização de uma função objectivo (mínimos quadrados) usando o algoritmo multidimensional de Powell. Permite, também, realizar análise de sensibilidade dos resultados face a variações dos parâmetros do modelo.

O programa VISUAL BALAN tem interfaces que facilitam a introdução de dados e o pós-processamento dos resultados do modelo (Fig. 6). Estas interfaces incluem: (i) menus para introduzir e armazenar a informação; (ii) tabelas com valores recomendados de parâmetros hidrológicos; (iii) gráficos e figuras de variáveis hidrológicas relevantes.

Os modelos hidrológicos agregados consideram as bacias e sub-bacias como unidades de trabalho. Desta forma, dados e parâmetros de entrada e saída são considerados como uma média representativa da área em estudo, não considerando a variabilidade espacial das informações.

Tal como se referiu anteriormente, VISUAL BALAN tem por base um modelo agregado donde resultam limitações à sua capacidade de estimar o balanço hídrico e os componentes hidrológicos em bacias complexas, como no caso da Serra da Estrela. Neste caso, forma consideradas 9 sub-bacias, com o objectivo de se melhorar a modelação.

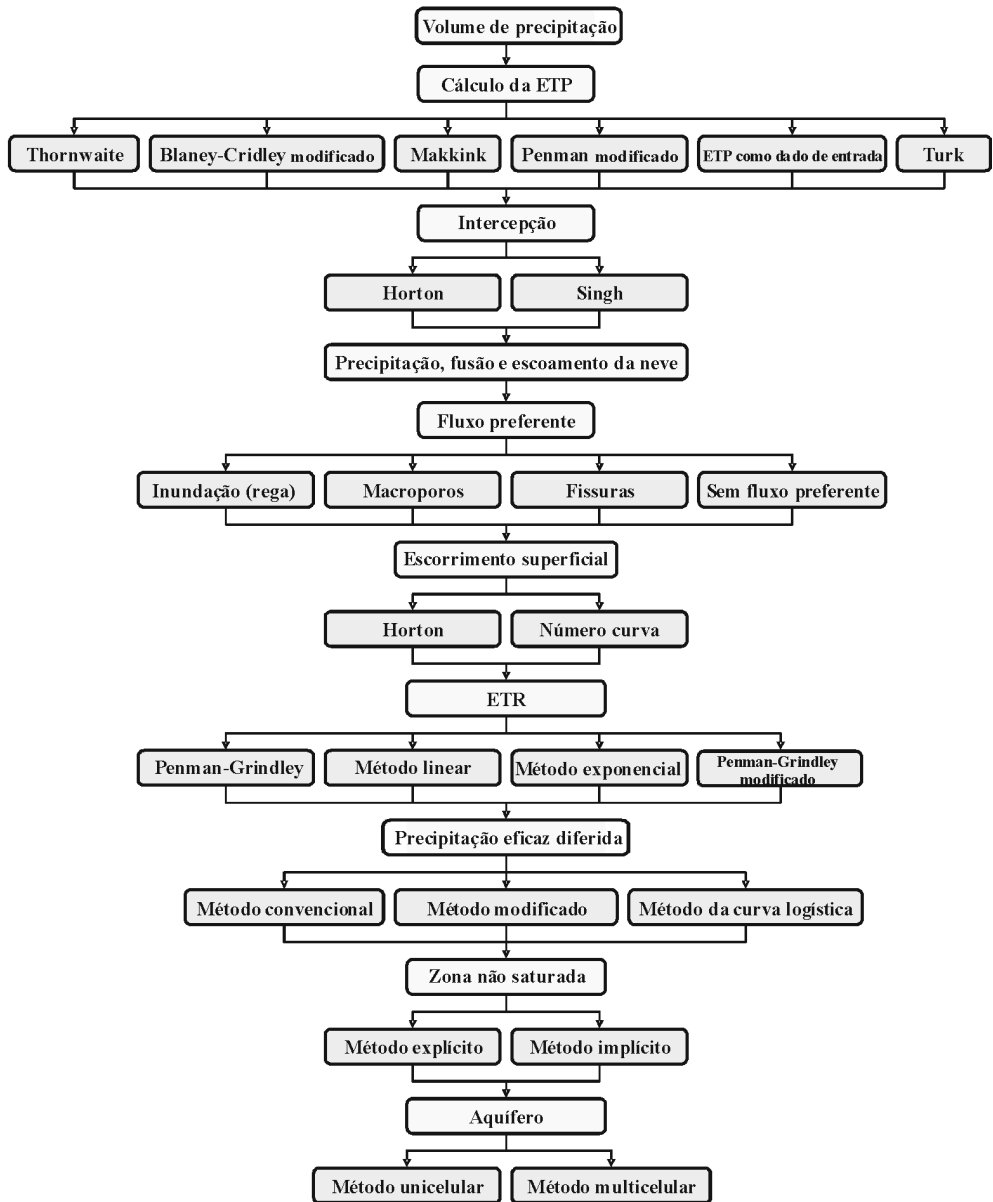


Figura 6. Diagrama de opções do VISUAL BALAN v2.0 para os cálculos dos componentes hidrológicos (adaptado de SAMPER et al., 1999).

APLICAÇÃO DO CÓDIGO VISUAL BALAN

Fases da modelação

O processo de modelação hidrológica da BZMM iniciou-se com a elaboração dum modelo conceptual preliminar, em resultado das primeiras observações de campo, observação de fotografia aérea, pesquisa bibliográfica e tratamento de dados meteorológicos.

Concretamente, foram realizados reconhecimentos de campo abrangendo a litologia, a tectónica, a geomorfologia, a hidrogeoquímica, a zona não saturada (com destaque para as características dos solos) e a ocupação do solo. A observação de fotografia aérea complementou as observações de campo, especialmente no que respeita à distribuição espacial das litologias e da ocupação do solo. Nesta fase, optou-se por utilizar a informação relativa à temperatura média diária e da precipitação diária (anos hidrológicos entre 1986-87 e 1994-95) provenientes da estação meteorológica das Penhas Douradas. Esta estação foi seleccionada por a sua altitude (1380 m) ser mais próxima da altitude média da BZMM (1505 m) do que a da estação meteorológica de Manteigas (815 m).

O primeiro modelo conceptual assumiu a bacia como um bloco único, sendo esta descrita em termos de valores médios das suas características (litologia, solo, ocupação do solo, etc.). Os valores de temperatura e de precipitação da estação das Penhas Douradas seriam extrapolados sem qualquer ajustamento para toda a bacia.

No entanto, este modelo revelou-se irrealista devido ao reduzido valor da precipitação registada nas Penhas Douradas no período considerado, juntamente com a elevada variabilidade espacial das características da bacia. Por um lado, a precipitação média anual registada durante este período nas Penhas Douradas foi de 1406 mm - claramente abaixo do valor normal de 1951-1980 (1799 mm), INMG, 1991 - ao passo que o escoamento

médio anual medido na estação hidrométrica do Zêzere (de código 11L/01) foi de 1601 mm, facto que, por si só, colocou grandes dificuldades à extrapolação dos valores da precipitação para toda a bacia. Por outro lado, verificou-se que, para o mesmo período, a precipitação média anual registada em Manteigas foi de 1570 mm, mais próxima dos valores normais de 1951-1980 (1668 mm).

Assim, um novo modelo conceptual foi elaborado, considerando sub-bacias baseadas nas unidades hidrogeomorfológicas atrás descritas. Adoptou-se, também, a informação meteorológica da estação de Manteigas, a qual foi extrapolada para cada sub-bacia considerando-se os gradientes verticais de temperatura e precipitação atrás apresentados assim como a altitude média das mesmas. Deste modo, a cada sub-bacia fez-se corresponder uma estação meteorológica virtual com valores extrapolados de precipitação diária e temperatura média diária. O valor da precipitação média anual no conjunto da BZMM obtido por este processo (2336 mm) é compatível com o proposto em estudos anteriores (e.g., DAVEAU et al., 1977; DAVEAU et al., 1997) para este sector da Serra da Estrela.

O programa VISUAL BALAN foi, então, aplicado em quatro fases: i) caracterização de cada sub-bacia, no que respeita à sua situação geográfica, características do solo, da zona não saturada e do aquífero; ii) cálculos preliminares do balanço hidrológico sequencial diário; iii) calibração comparando os valores calculados dos caudais de escoamento no rio Zêzere com os valores medidos; iv) análise dos resultados para cada sub-bacia e para a totalidade da bacia hidrográfica.

Cálculo e calibração do balanço hidrológico

O processo de cálculo do balanço hidrológico foi efectuado por tentativa e erro, tendo a calibração sido conseguida através de sucessivas aproximações resultantes da manipulação dos parâmetros do modelo.

Precipitação níveal	Sub-bacia 1									Sub-bacia 2									Sub-bacia 3									Sub-bacia 4									Sub-bacia 5									Sub-bacia 6									Sub-bacia 7									Sub-bacia 8									Sub-bacia 9								
	Temp. limiar de precipitação (°C)	-									-									-									2									2									-									2									2									2							
Intercepção (método de Horton)	Cobertura vegetal		Pequenas herbáceas		Pinhal		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas		Pequenas herbáceas																																														
	Altura da planta (m)	0.3		-		1.27		0.3		0.2		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1																																													
Solo	Capacidade de armazenamento (mm)		1		0.2		1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1																																														
	Coeficiente de intercepção		0.1		0.2		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1																																														
Água utilizável (mm)		50		30		100		100		100		100		100		100		100		100		100		100		100		100		100		100		100		100																																													
Conductividade hidráulica (m/s)		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵		6.9 x 10 ⁻⁵																																															
Recarga em trânsito directa		CKRD (*)		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5																																															
FRD(*)		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5																																															
Recarga em trânsito diferida		Método convencional (*)		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5																																															
Escorrimento superficial (método de Horton)		Cap. de infiltração máxima (no ponto de emulhecimento permanente) - mm/d		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45																																															
Cap. de Infiltração mínima (na capacidade de campo) - mm/d		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45																																															
Cálculo da ETP		Método de Thornthwaite		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45		45																																															
Cálculo da ETR (máx. de Penman- Grindley modificado)		CRPG(*)		40		6		6		40		40		40		45		40		45		40		45		40		45		40		40																																																	
Zona não saturada		CEPG(*)		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1																																																	
Coef. de esgotamento do fluxo subsuperficial (1/d)		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15																																																	
Coef. de armazenamento (1/d)		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06		0.06																																																	
Coef. de armazenamento (1/d)		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵		1.128 x 10 ⁵																																																	
Coef. de esgotamento (1/d)		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03																																																	

(*) Ver SAMPER *et al.* (1999).

Quadro 4. Principais parâmetros e opções aplicados na modelação hidrológica

Para tal, foram introduzidos os dados de base e os parâmetros caracterizando cada sub-bacia (Quadro 4): hidrometeorologia, solo, dados geográficos, recarga em trânsito, evapotranspiração potencial e real, a interceptação e escoamento superficial. Por outro lado, foram definidos parâmetros adicionais caracterizando a zona não saturada e o aquífero.

O processo de calibração foi orientado, por um lado, pelo ajustamento dos caudais de escoamento no rio Zêzere medidos aos caudais calculados e, por outro lado, pela coerência entre os resultados do balanço obtidos em cada momento com aqueles disponíveis na bibliografia (e.g., MENDES and BETTENCOURT, 1980; CARVALHO et al., 2000), em especial os referentes a estudos hidrogeológicos (percentagem da precipitação correspondente à recarga dos aquíferos) e climatológicos (evapotranspiração real e potencial) realizados em Portugal.

Durante o processo de calibração, o modelo mostrou ser particularmente sensível à variação dos valores de parâmetros relacionados com o solo, e a zona não saturada. Em particular, foi observada sensibilidade à diferença entre a capacidade de campo e o ponto de emurchecimento permanente (ou seja, a reserva útil), à espessura e condutividade hidráulica do solo, ao método escolhido para o cálculo da infiltração (o método de Horton produziu resultados de melhor qualidade do que o método do número de curva) e ao coeficiente de esgotamento do fluxo subsuperficial.

Resultados e discussão

Os principais resultados obtidos através da modelação hidrológica da BZMM constam do Quadro 5 e do gráfico da Figura 7. Por seu lado, as Figuras 8 e 9 ilustram a boa qualidade do ajustamento entre caudais (mensais e anuais) medidos e calculados pelo VISUAL BALAN.

O valor da ETP calculado 606 mm é próximo do indicado por MENDES and BETTENCOURT (1980) para a estação meteorológica

das Penhas da Saúde (558 mm). Já o valor calculado da ETR (325 mm) fica bastante aquém do indicado por aqueles autores (498 mm). Uma razão que, certamente, contribui para esta diferença é o facto de MENDES and BETTENCOURT (1980) adoptarem um valor de água utilizável de 150 mm, bastante superior aos valores seguidos na modelação com o VISUAL BALAN (entre 30 e 100 mm). Por outro lado, grande parte do que o VISUAL BALAN calcula como interceptação deve ser incluído na ETR.

A recarga dos aquíferos calculada corresponde a cerca de 15% do valor da precipitação média anual na BZMM. Estes resultados são coerentes com os propostos por outros autores para sistemas hidrogeológicos instalados em rochas cristalinas na Zona Centro-Ibérica. Concretamente, PEREIRA (1999) apresenta um valor 20%, LIMA (1994) propõe o intervalo entre 14.6 e 21.7% enquanto que CARVALHO et al. (2000) indicam 14 a 17%. No entanto, estes autores chamam a atenção para a elevada variabilidade espacial da taxa da recarga dos aquíferos, dependendo das condições hidrogeológicas de cada situação, podendo esta atingir valores locais consideravelmente diferentes dos referidos.

O escoamento calculado através do rio Zêzere (1613 mm) distribui-se do seguinte modo: 305 mm de escoamento superficial (18.9 % do total), 947 mm de fluxo subsuperficial (58.7 %) e 361 mm de descarga subterrânea (22.4%).

Os factores que mais condicionaram a qualidade dos resultados foram a elevada complexidade hidrológica da BZMM aliada à escassez de informação hidrometeorológica. Com efeito, a estação meteorológica de Manteigas situa-se fora da bacia, se bem que muito próxima do seu limite setentrional. Por consequência, a informação meteorológica diária referente às zonas mais elevadas da bacia é inexistente, facto que implicou o atrás descrito processo de extrapolação dos dados da estação de Manteigas. Uma vez que a extrapolação dos valores diários de precipita-

ção e temperatura se baseou em gradientes verticais regionais, é de esperar que este processo possa ter ocultado especificidades climáticas locais, especialmente as relacionadas com a exposição das vertentes, com efeitos

inevitáveis sobre o processo de modelação e sobre os resultados finais.

No entanto, apesar dos constrangimentos mencionados, os resultados podem ser considerados como de boa qualidade.

	Média anual (mm)	Média anual (hm ³)	Total no período (mm)	Total no período (hm ³)
Precipitação	2335.55	72.51	21020.19	652.62
Recarga em trânsito	1306.01	40.55	11753.70	364.92
Fluxo preferente	46.05	1.43	—	—
Evapotranspiração potencial	606.15	18.82	—	—
Evapotranspiração real	324.61	10.08	2921.59	90.71
Escorrimento superficial	304.61	9.46	2741.37	85.11
Fluxo subsuperficial	947.11	29.41	8523.53	264.63
Caudal subterrâneo	361.34	11.22	3251.86	100.96
Caudal total no rio Zêzere	1612.95	50.08	14516.68	450.71
Recarga dos aquíferos	361.65	11.23	3254.85	101.05
Intercepção	401.68	12.47	3615.05	112.24
Precipitação nival	373.11	11.58	3358.11	104.26
Escorrimento nival	334.15	10.37	3007.11	93.36

Quadro 5. Principais resultados do balanço hidrológico na BZMM no período 1986-87 a 1994-95.

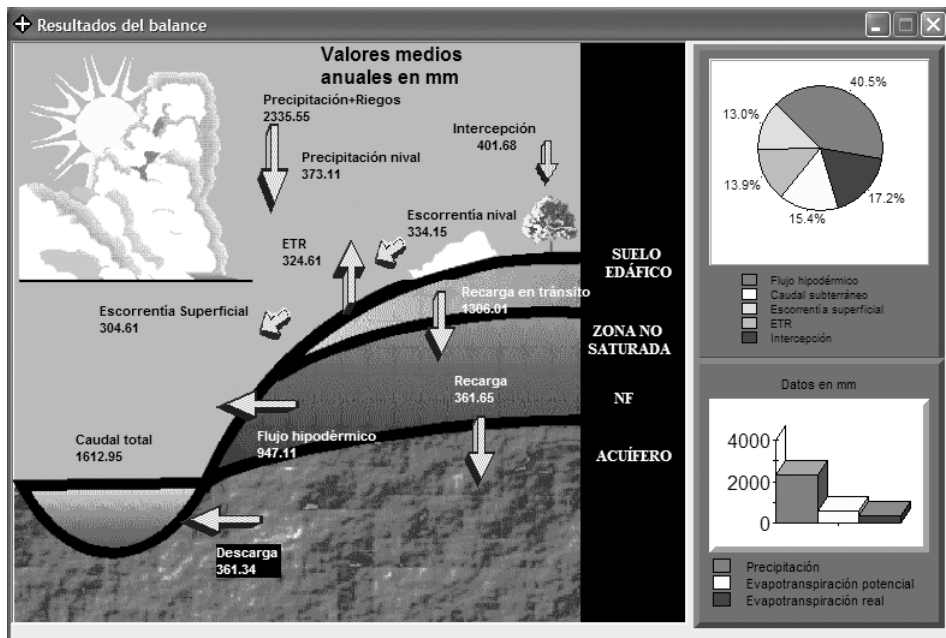


Figura 7. Balanço hidrológico da BZMM (valores médios anuais).

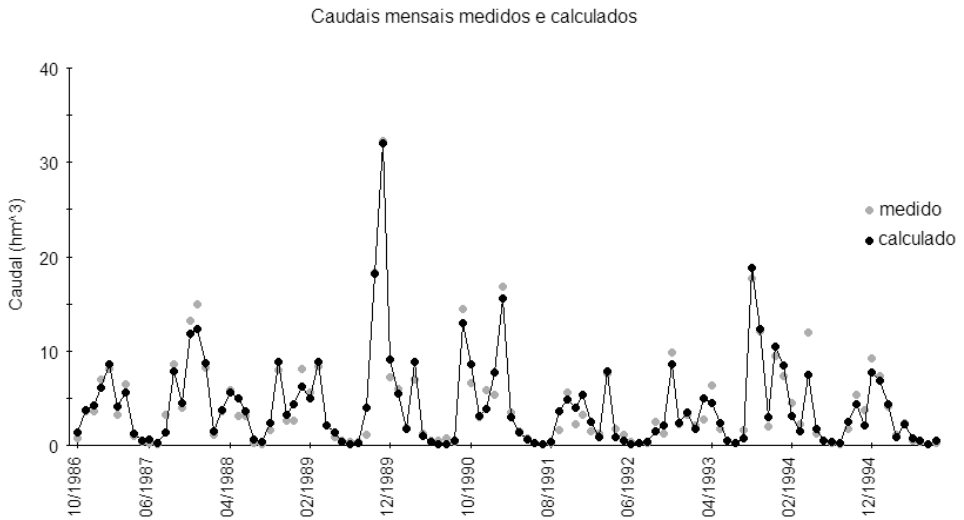


Figura 8. Caudais mensais medidos e calculados.

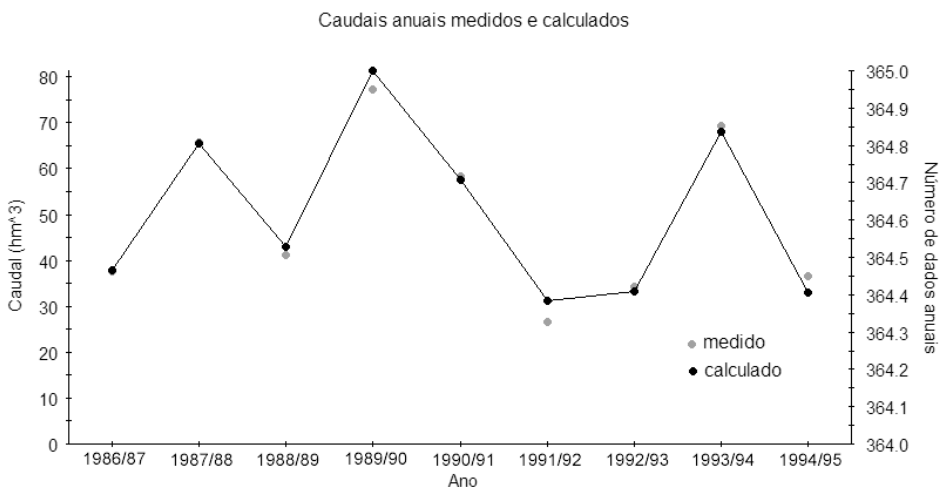


Figura 9. Caudais anuais medidos e calculados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disponibilidade de recursos hídricos na bacia do rio Zêzere a montante da vila de Manteigas, situada no maciço da Serra da Estrela, é condicionada pelas condições geológicas, geomorfológicas e climáticas características desta região montanhosa. Neste contexto, foi aplicado o modelo agregado e determinístico associado ao programa VISUAL BALAN v2.0, o qual permite realizar balanços hidrológicos sequenciais diários abrangendo o solo, a zona não saturada e o aquífero.

A modelação matemática tomou como base um modelo hidrológico conceptual da BZMM que considera a forte a variabilidade espacial das características da bacia que mais influenciam a infiltração e a recarga dos aquíferos: o relevo, o substrato geológico, as condições climáticas, o solo e a cobertura vegetal. De acordo com este modelo, a BZMM foi dividida em 9 sub-bacias, delimitadas segundo unidades hidrogeomorfológicas previamente definidas.

De seguida, o programa VISUAL BALAN foi aplicado em quatro etapas: i) caracterização de cada sub-bacia, no que respeita à sua situação geográfica, características do solo, da zona não saturada e do aquífero; ii) cálculos preliminares do balanço hidrológico sequencial diário; iii) calibração comparando os valores calculados dos caudais de escoamento no rio Zêzere com os valores medidos; iv) análise dos resultados para cada sub-bacia e para a totalidade da bacia hidrográfica. No decurso da calibração,

o modelo revelou-se especialmente sensível à variação dos valores de parâmetros relacionados com o solo e a zona não saturada. Foi conseguido um bom ajustamento entre os caudais medidos e calculados do escoamento através do rio Zêzere.

São de destacar os seguintes resultados: a recarga dos aquíferos corresponde a cerca de 15% do valor da precipitação média anual na BZMM; o escoamento através do rio Zêzere corresponde a 18.9 % de escoamento superficial, 58.7 % de fluxo subsuperficial e 22.4% de descarga subterrânea.

É de referir que, por assentar num modelo agregado, VISUAL BALAN possui limitações à sua capacidade de estimar o balanço hídrico e os componentes hidrológicos em bacias complexas como no caso da Serra da Estrela. Para ser capaz de trabalhar com bacias hidrográficas de grande variabilidade espacial nos parâmetros e nos dados climatológicos, o VISUAL BALAN vem sendo acoplado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), resultando no novo modelo distribuído GIS-BALAN (por ex.: SAMPER *et al.*, 2005a,b).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e de fundos do FEDER através do projecto de I&D HIMOCATCH (contrato POCTI/CTA/44235/02). Os trabalhos desenvolvidos pela equipa da UDC foram realizados no âmbito do Projecto CICYT REN 2003 08882.

Recibido: 12 / 6 / 2006

Aceptado: 10 / 10 / 2006

REFERENCIAS

- 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.
- ALIAGA, R., SAHUQUILLO, A. and CUSTODIO, E. (2004). Estimación de parámetros hidrogeológicos en una formación de baja permeabilidad. IV Asamblea Hispano-Portuguesa de Geofísica y Geodesia, Figueira da Foz, p. 735-736.
- ANDRADE, E., MORA, C., NEVES, M. and VIEIRA, G. (1992). Desportos de Inverno na Serra da Estrela. Contribuição para o estudo da sua viabilidade. *Finisterra*, **53-54**:187-193.
- BEVEN, K. J. (2001). *Rainfall-runoff modeling*. John Wiley & Sons, Chichester, 360 p.
- CARVALHO, J. M., PLASENCIA, N., CHAMINÉ, H. I., RODRIGUES, B. C., DIAS, A.G. and SILVA, M. A. (2000). Recursos hídricos subterrâneos em formações cristalinas do Norte de Portugal. In: SAMPER, J., LEITÃO, T., FERNÁNDEZ, L. & RIBEIRO, L. (eds.). *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica'*. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones, A Coruña. AIH-GE & APRH. Publicaciones ITGE, Madrid, p. 163-171.
- CASTANY, G. (1972). *Prospección y explotación de las aguas subterráneas*. Ed. Omega, Barcelona, 738 p.
- CUSTODIO, E. and LLAMAS, M. R. (1996). *Hidrologia subterránea*, 2 Vols, Ed. Omega, Barcelona, 2350 p.
- DAVEAU, S. (1969). Structure et relief de la Serra da Estrela. *Finisterra*, **4 (7-8)**: 33-197.
- DAVEAU, S., COELHO, C., COSTA, V.G. and CARVALHO, L. (1977). Répartition et rythme des précipitations au Portugal. *Memórias do CEG*, nº3, Lisboa, 192 pp. + 5 mapas.
- DAVEAU, S., FERREIRA, A. B., FERREIRA, N. and VIEIRA, G. (1997) *Novas observações sobre a glaciação da Serra da Estrela (New observations on the Serra da Estrela glaciation)*. *Estudos do Quaternário*, **1**:41-51.
- DINGMAN, S. L. (1994). *Physical hydrology*. Prentice Hall, New Jersey, 575 p.
- HUBER, W. C. and DICKINSON, R.E. (1992). *Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual*. EPA/600/3-88/001a, Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency.
- ESPINHA MARQUES, J. (in prep.). Contribuição para o conhecimento da hidrogeologia da região do Parque Natural da Serra da Estrela (sector de Manteigas-Nave de Sto. António-Torre). Universidade do Porto (Tese de Doutoramento).
- ESPINHA MARQUES, J., DUARTE, J. M., CONSTANTINO, A. T., MARTINS, 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. (2006). Vadose zone characterisation in a mountain hydrogeologic system: Serra da Estrela (Central Portugal) case study. Abstracts of the International Symposium "Aquifer Systems Management", International Association of Hydrogeologists, Theme 1, 165 - 177.
- FETTER, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall, New Jersey, 598 p.
- FITTS, C. R. (2002). *Groundwater science*. Academic Press, London, 450 p.
- HEREDIA, J. and MURILLO, J. (2002). Balance hídrico y estimación de la recarga mediante modelación numérica en pequeñas cuencas del sector suroriental de la isla

- de Gran Canaria. XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia, Zaragoza, 19 p.
- INMG - Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (1991). In: O clima de Portugal. Normais climatológicas da região de "Trás-os-Montes e Alto Douro e Beira Interior" correspondentes a 1951-1980 (ed. Inst. Nac. Met. Geof.), **49**:70 p.
- LAUTENSACH, H. (1932). Estudo dos glaciares da Serra da Estrela. Memórias e Notícias, Coimbra, 6:1-60 (trad. Lautensach, 1929).
- LIMA, A. S. (1994). Hidrogeologia de regiões graníticas (Braga, NW de Portugal). Universidade do Minho, Braga, 202 p. (Tese de Mestrado).
- MENDES, J. C. and BETTENCOURT, M. L. (1980) Contribuição para o estudo do balanço climatológico de água no solo e classificação climática de Portugal Continental. In: O Clima de Portugal (ed. Inst. Nac. Met. Geof.), **24**: 289p.
- MORA, C. and VIEIRA, G. T. (2004). Balance radiactivo de los altiplanos de la Sierra de Estrela (Portugal) en una mañana de invierno. Metodología y primeros resultados. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Geol.), 99 (1-4): 37-45.
- MORA, C. (2006). Climas da Serra da Estrela: características regionais e particularidades locais dos planaltos e do alto vale do Zêzere. Universidade de Lisboa, 427 p. + 1 mapa (Tese de Doutoramento).
- NAP - NATIONAL ACADEMY PRESS (2001). Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. Washington, D.C., 374 p.
- 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., Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- PEREIRA, M. R. (1999). Quantificação da recarga subterrânea em rochas fracturadas da bacia hidrográfica do Tua. In: Seminário Sobre Águas Subterrâneas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Lisboa.
- RIBEIRO, A. (1988). A tectónica alpina em Portugal. Geonovas, **10**:9-11.
- RIBEIRO, A., KULLBERG, M. C., KULLBERG, J. C., MANUPPELA, G. and PHIPPS, S. (1990). A review of Alpine tectonics in Portugal: Foreland detachment in basement and cover rocks. Tectonophysics, **184**:357-366.
- RIBEIRO, O. (1954). Estrutura e relevo da Serra da Estrela. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Tomo homenaje a E. Hernández-Pacheco), p. 549-566.
- SAMPER, J. and CARRERA, J. (1995). Numerical Modelling of Remedial Actions for an Uranium Mill tailings in Spain: from model construction to prediction uncertainty. In: Groundwater Quality: Remediation and Protection. IAHS, **225**:299-310.
- SAMPER, J. and GARCÍA VERA, M. A. (1997). "Estimación de la recarga producida por la lluvia y los excedentes de riego mediante balances diarios de agua en el suelo: Experiencias en diferentes zonas climáticas". Seminario sobre la evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica, Las Palmas de Gran Canaria., Ed. ITGE, p. 367-379.
- SAMPER, J. and GARCÍA VERA, M. A. (2000). Metodología para la cuantificación de los aprovechamientos potenciales de la cuenca del Ebro mediante balances de agua. Technical assistance of UDC to Confederación Hidrográfica del Ebro, 84 p.
- SAMPER, J. and GARCÍA VERA, M.A. (2004). VISUAL-BALAN, un modelo interactivo de balance hidrológico: estado actual y desarrollos futuros. In: VIII

- Simposio de hidrogeología, Zaragoza, p. 595-604.
- SAMPER, J. (1998). Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: Utilización, Calibración e Incertidumbres. *Boletín Geológico y Minero*, **109(4)**:3 1-54.
- SAMPER, J., HUGUET, LL., ARES, J. and GARCÍA VERA, M.A. (1999). Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Technical Publication ENRESA, Madrid, 5/99, 205p.
- SAMPER, J., VERA, M. A. G., PISANI, B., ALVARES, D., ESPINHA MARQUES, J. ALBERTO VARELA, A. and LOSADA, J. A. (2005b). Hydrologic models and Geographic Information Systems for water resources evaluation: Application of GIS-BALAN to Atlantic basins in Spain and Portugal. In: LOPO FERREIRA, J.P. & VIEIRA, J. (eds). *Proceedings The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources - Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, Univ. Minho, Guimarães, LNEC-IAHS (Cd-Rom edition).
- SAMPER, J., VERA, M. A., PISANI, B., ÁLVARES, D., VARELA A. and LOSADA, J. (2005a). Aplicação do Modelo Hidrológico VISUAL BALAN v2.0 em duas Bacias Hidrográficas Espanholas: Estudos de caso e desenvolvimentos. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa/Brasil.
- SINGHAL, B. B. S. and GUPTA, R. P. (1999). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 400 p.
- SORIANO, G. and SAMPER, J. (2000). Hidrogeología de una pequeña cuenca piloto en medios graníticos: Cuenca del Valiñas (A Coruña). In: SAMPER, J., LEITÃO, T., FERNÁNDEZ, L. and RIBEIRO, L. (eds.). *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica'*. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones, A Coruña. AIH-GE & APRH. Publicaciones ITGE, Madrid, p. 163-171.
- USDA - United States Department of Agriculture (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical release 55, 164 p.
- VIEIRA, G. T. and MORA, C. (1998). General characteristics of the climate of the Serra da Estrela. In: Vieira GT (ed), *Glacial and Periglacial Geomorphology of the Serra da Estrela*. Guidebook for the field-trip. IGU Commission on Climate Change and Periglacial Environments, CEG e Departamento de Geografia, Universidade de Lisboa, p. 26-36.
- VIEIRA, G. T. (2004). *Geomorfologia dos planaltos e altos vales da Serra da Estrela: ambientes frios do Plistocénico Superior e dinâmica actual*. Universidade de Lisboa, 724p. (Tese de Doutoramento).