

## CONCEPTUALIZAÇÃO DO PROCESSO DE RECARGA E DO BALANÇO HÍDRICO DE SISTEMAS AQUÍFEROS NO PLANEAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS POR SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

Manuel Mendes Oliveira

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal  
Tel: 21 844 3436, Fax: 21 844 3016, Internet: <http://www.dha.lnec.pt/nas>, Email: [moliveira@lnec.pt](mailto:moliveira@lnec.pt)

Palavras-chave: Recarga, Disponibilidades, Escoamento, Balanço hídrico subterrâneo

### RESUMO ALARGADO

A recarga de águas subterrâneas pode ser estimada utilizando procedimentos que modelam de uma forma sequencial (Figura 1) a precipitação, a infiltração no solo, o aumento do armazenamento no solo devido a essa infiltração, o escoamento directo que se produz por a capacidade de infiltração do solo ser inferior à precipitação, a evapotranspiração da água do solo e a água que se infiltra abaixo da base do solo (infiltração profunda) quando o teor de humidade do solo é superior ao valor da sua capacidade de campo e a água drena por acção da gravidade. A água de infiltração profunda é utilizada como um estimador da recarga da zona saturada mais próxima da superfície.

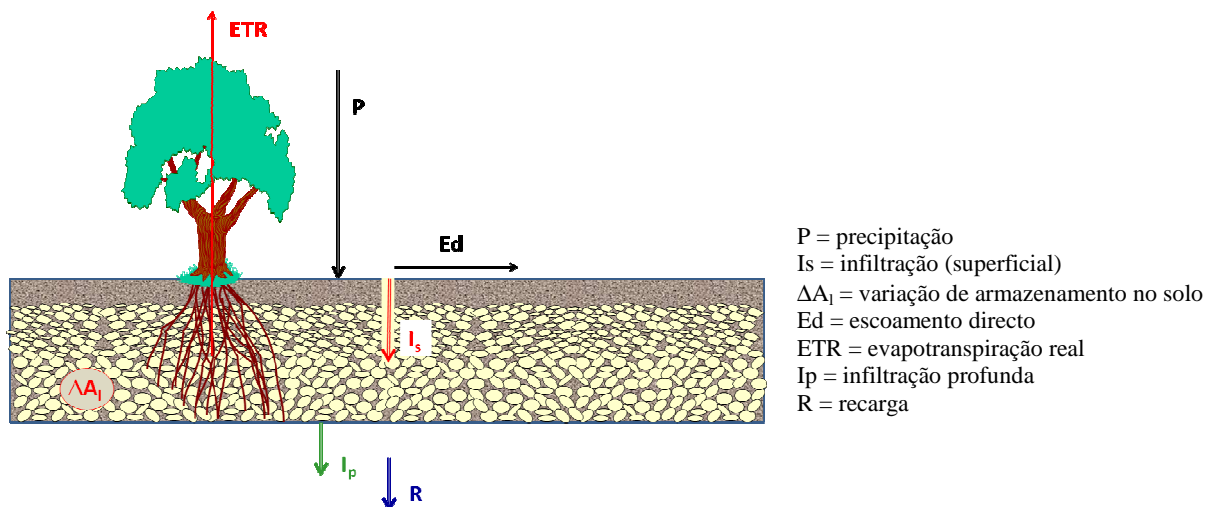


Figura 1 – Conceptualização do processo de recarga no modelo de balanço hídrico sequencial diário

Estes procedimentos podem ser implementados em modelos de balanço hídrico sequencial diário. Dois destes modelos são o BALSEQ, desenvolvido por Lobo Ferreira (1981, 1982), e o BALSEQ\_MOD, desenvolvido em Oliveira (2004, 2006). O segundo resulta de uma actualização/complementação do primeiro e pode ser corrido para cada fracção de território onde se possa assumir homogeneidade no solo e na ocupação do solo; neste modelo cada ocupação do solo pode ser descrita por até três cobertos diferentes: solo com coberto 1, solo com coberto 2, e solo descoberto.

Para cada solo é necessário caracterizar porosidade, porosidade eficaz, ponto de emurchecimento permanente, condutividade hidráulica vertical e material do horizonte superior do solo.

Para cada ocupação do solo é necessário dar indicação se ele é permeável ou não e se o for caracterizar os períodos de desenvolvimento dos tipos culturais se eles existirem, a data de início do período de

desenvolvimento, as profundidades atingidas pelas raízes das plantas durante os períodos de desenvolvimento e as frações de terreno abrangidas, os seus coeficientes culturais e o limite de depleção de água do solo a 100%. A informação dependente de cada solo pode resultar de análises de perfis de solos específicos de um local a estudar. No caso de não existirem estes perfis para locais específicos pode-se fazer a interpretação de perfis de solos publicados, como Oliveira (2004, 2006) que, com base nos dados de perfis de solos publicados em SROA (1973), caracterizou os parâmetros respectivos.

Os parâmetros dependentes da ocupação do solo, no que diz respeito aos cobertos vegetais podem ser extraídos dos conhecimentos locais existentes ou, em alternativa, de publicações como o de Allen *et al.* (1998), que para muitos tipos de cobertos vegetais refere as suas propriedades. Como exemplo, para diversas ocupações de solos da Carta de Ocupação do Solo do CNIG (COS'90), Oliveira (2004, 2006) apresenta uma caracterização destes parâmetros.

Esta metodologia pode ser aplicada a todos os tipos litológicos desde que se conheçam os parâmetros característicos do meio, e utilizando especificidades na interpretação dos seus resultados.

Nos meios de porosidade intergranular com a presença de um solo, independentemente do terreno ser coberto ou descoberto, o método aplica-se directamente.

No caso de afloramentos rochosos o método também se aplica directamente assumindo que os parâmetros correspondentes ao solo têm as propriedades da rocha e que, no caso de haver fracturação que permita a entrada de água na rocha, uma percentagem do escoamento directo que é calculado pela corrida do modelo também se infiltra, constituindo recarga, ficando o escoamento directo diminuído deste volume.

O caso da ocorrência de formações carsificadas aflorantes encerra outra particularidade. No caso de constituírem afloramentos rochosos (rocha nua) e de não haver formas de retenção de água à superfície que armazene a água e depois permita a sua evaporação, pode-se considerar que toda a precipitação se infiltra.

Ainda nos sistemas cársicos aflorantes, se existir um solo onde se pode ou não desenvolver um coberto vegetal (Figura 2), o modelo de balanço hídrico sequencial diário também pode ser utilizado, existindo a evapotranspiração resultante da presença desse solo (que terá as propriedades de um solo proveniente de calcários, muitas vezes um solo argiloso – terra rossa). O escoamento directo que é gerado, tratando-se de formações carsificadas, após um percurso à superfície acaba por se infiltrar, constituindo também recarga do aquífero. Nestas situações deixa de haver escoamento directo. No caso da ocupação do solo existente dar origem a áreas impermeabilizadas, por exemplo áreas urbanas, pode-se considerar que o escoamento directo é colectado e desviado para fora do sistema aquífero, não constituindo neste caso recarga do aquífero.

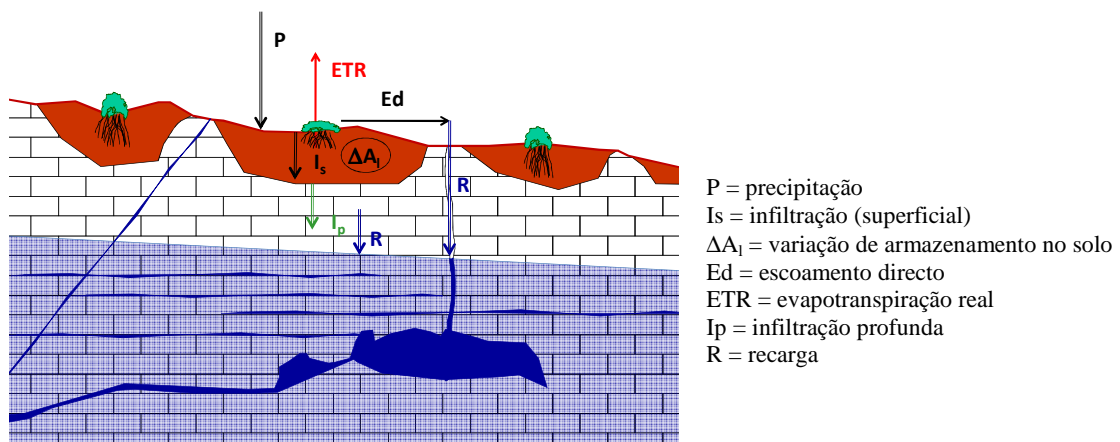


Figura 2 – Conceptualização do processo de recarga em meios cársicos aflorantes

Após o processo de recarga a água escoam ao longo das linhas de fluxo subterrâneo em direcção às zonas de descarga do sistema aquífero. Dependendo do local onde se dá a recarga, o escoamento subterrâneo atingirá profundidades e distâncias diferentes, pelo que, em regime natural, a água existente a determinada profundidade em determinado local ter-se-á infiltrado num local específico (Figura 3).

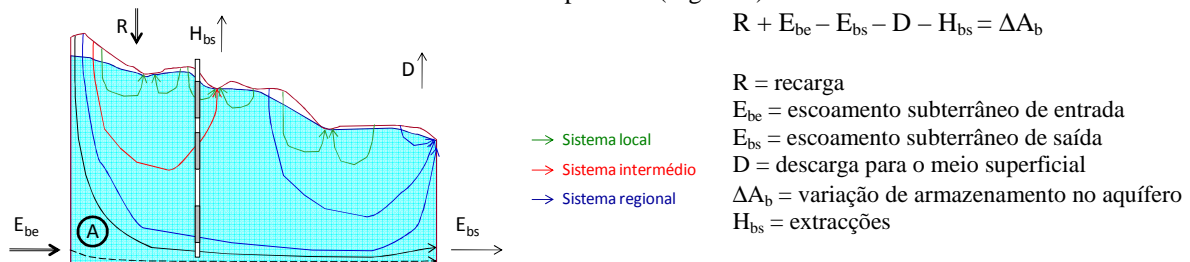


Figura 3 – Linhas de fluxo de escoamento subterrâneo e balanço hídrico de um sistema aquífero

Assim, num sistema aquífero podem-se definir sistemas de escoamento locais, regional e intermédios. Os sistemas de escoamento locais referem-se a água que se infiltra no solo, recarrega o sistema aquífero, tem um percurso subterrâneo e descarrega para o curso de água superficial mais próximo do local da infiltração dentro da área de ocorrência da massa de águas subterrâneas.

Os sistemas de escoamento intermédios incluem locais de recarga que descarregam para cursos de água superficiais que não são os mais próximos do local de recarga.

No sistema de escoamento regional, o local de descarga não é o curso de água superficial mais próximo do local de recarga mas sim o limite do sistema aquífero.

No caso do sistema aquífero estar conectado a um sistema vizinho, pode não haver descarga para a superfície e a saída fazer-se por escoamento subterrâneo para o sistema vizinho. Pode também acontecer que um sistema aquífero receba água de um sistema aquífero adjacente.

No caso de haver extracção de água subterrânea do sistema, dependendo da localização dos ralos da captação, a água provém de áreas de recarga distinta. Isto independentemente de as linhas de fluxo junto aos ralos da captação se alterarem em direcção a eles.

Considerando os diversos aspectos mencionados o balanço hídrico subterrâneo de um sistema aquífero é dado por:

$$R + E_{be} - E_{bs} - D - H_{bs} = \Delta A_b \quad \text{Eq. 1}$$

onde as entradas de água no sistema são dadas pela recarga (R) e pelo escoamento subterrâneo ( $E_{be}$ ), as saídas do sistema são as naturais, descarga (D) para o meio superficial e escoamento subterrâneo ( $E_{bs}$ ), e as artificiais, extracção de águas subterrâneas pelo homem ( $H_{bs}$ ). Pode em algumas situações específicas também haver recarga artificial do sistema ( $H_{be}$ ). A diferença entre as entradas e as saídas correspondem à variação do armazenamento subterrâneo dentro do aquífero ( $\Delta A_b$ ). No caso do sistema aquífero ser isolado dos sistemas aquíferos vizinhos os termos  $E_{be}$  e  $E_{bs}$  são nulos e a Eq.1 simplifica-se para  $R - D - H_{bs} = \Delta A_b$ .

Nos planos de gestão de região hidrográfica os balanços hídricos são feitos por sub-bacia hidrográfica, o que, quando se pretende integrar a parte subterrânea do ciclo hidrológico, introduz maior complexidade. Estas devem-se ao facto das fronteiras das sub-bacias hidrográficas não coincidirem com os limites dos sistemas aquíferos e ao facto de o regime de exploração de águas subterrâneas quando abordado ao nível da sub-bacia hidrográfica induzir maior quantidade de escoamento subterrâneo proveniente do mesmo sistema aquífero mas de fora dos limites da sub-bacia. A Figura 4 ilustra as situações referidas considerando uma sub-bacia hidrográfica (rectângulo cinzento) que se dispõe sobre dois sistemas aquíferos (em tons de azul diferentes).

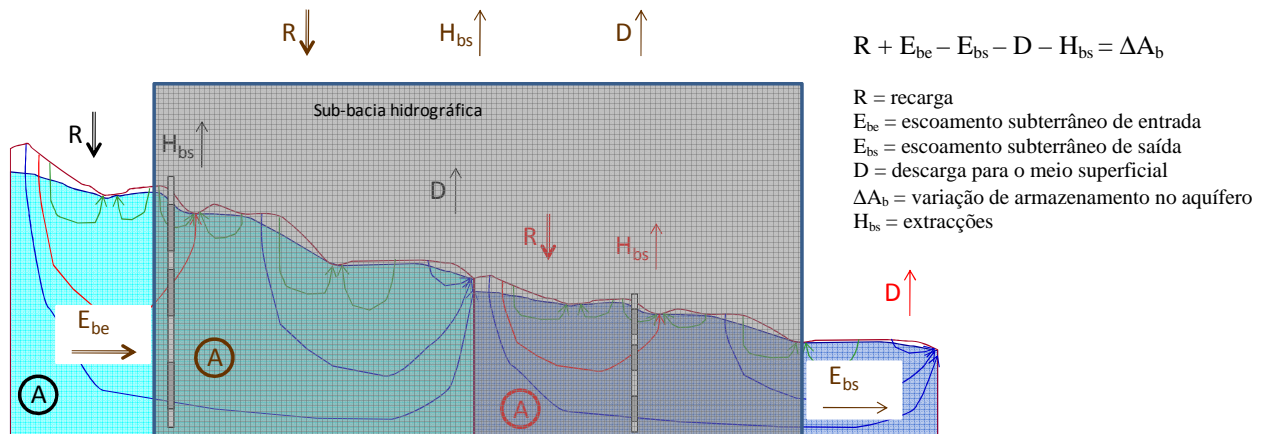


Figura 4 – Linhas de fluxo de escoamento subterrâneo em dois sistemas aquíferos que são parcialmente englobados numa sub-bacia hidrográfica e balanço hídrico subterrâneo da área da sub-bacia hidrográfica

A equação do balanço hídrico subterrâneo da sub-bacia hidrográfica é a mesma que a Eq. 1, embora o escoamento subterrâneo de entrada e de saída traduzam agora as condições de escoamento subterrâneo dentro dos próprios sistemas aquíferos e não as trocas de escoamento subterrâneo entre sistemas aquíferos adjacentes. A nível do balanço hídrico subterrâneo por sistema aquífero estas últimas podiam não existir ou ser pequenas e de valor aproximadamente constante, correspondendo a escoamentos subterrâneos a nível regional de longa duração.

Já no caso da sub-bacia hidrográfica estes escoamentos subterrâneos de entrada e de saída vão variar muito em função do regime de exploração da sub-bacia.

O Quadro 1 sintetiza os diversos processos existentes no balanço hídrico subterrâneo, comparando as situações de balanço hídrico a nível de sistema aquífero e a nível de sub-bacia hidrográfica. As colunas deste quadro podem ser vistas como as colunas de uma folha de cálculo em que se faz um balanço hídrico subterrâneo sequencial (diário, mensal, anual), em que para cada período considerado se calculam os processos referidos e onde o

armazenamento após entrada (Ae) de um período é calculado em função do armazenamento após saída (A) do período anterior. Neste balanço hídrico subterrâneo o armazenamento após saída não pode ser superior a uma capacidade de armazenamento subterrâneo do sistema aquífero/sub-bacia hidrográfica; se o for, o excesso de armazenamento deve ser distribuído pelas saídas naturais do sistema: escoamento subterrâneo de saída ( $E_{bs}$ ) ou descarga para a superfície (D).

Quadro 1- Processos que interessam ao balanço hídrico subterrâneo por sistema aquífero e por sub-bacia hidrográfica

Processo	Entradas	Entradas	Entradas	Entradas	Armazenamento	Saídas	Saídas	Saídas	Armazenamento
Processo	Recarga a partir da precipitação (Rp)	Recarga da área de drenagem (Rd)	Escoamento subterrâneo (Ebe)	Recarga artificial (Hbe)	Armazenamento após entrada (Ae)	Extracção (Hbs)	Descarga para a superfície (D)	Escoamento subterrâneo (Ebs)	Armazenamento após saída (A)
Descrição	Recarga por infiltração da água da chuva que precipita na massa de águas considerada	Recarga por infiltração do escoamento directo proveniente da área exterior à massa de águas considerada	Escoamento subterrâneo proveniente de massas de águas subterrâneas adjacentes; é condicionado a pelas extracções e pela descarga	Introdução de água pela acção humana através de infra-estruturas de recarga artificial ou por infiltração de excedentes de rega	Armazenamento previamente existente na massa de águas acrescido de todas as entradas. Trata-se de um processo transitório no balanço.	Extracção de água subterrânea por acção humana	A descarga pode depender do armazenamento após entrada e das extracções.	Escoamento subterrâneo para uma massa de águas subterrâneas adjacente; é condicionado pelas extracções e pelo armazenamento	Armazenamento após a entrada diminuído de todas as saídas
Sistema aquífero	Recarga natural da massa de águas subterrâneas	Recarga por infiltração do escoamento directo proveniente da área de drenagem da massa de águas subterrâneas	Escoamento subterrâneo proveniente de massas de águas subterrâneas com conexão hidráulica (pode ser nulo)	Recarga artificial dentro dos limites da massa de águas subterrâneas	Armazenamento previamente existente na massa de águas subterrâneas acrescido de todas as entradas	Extracção de água subterrânea da massa de águas subterrâneas	É englobado no escoamento superficial da bacia hidrográfica por cima da massa de águas subterrâneas	Escoamento subterrâneo para uma massa de águas subterrâneas adjacente com a qual tenha conexão hidráulica (pode ser nulo)	Água que se mantém armazenada na massa de águas subterrâneas
Sub-bacia hidrográfica	Recarga natural das massas de águas subterrâneas dentro do limite da sub-bacia hidrográfica	= 0	Escoamento subterrâneo existente na massa de águas subterrâneas dentro do limite da sub-bacia hidrográfica	Recarga artificial das massas de águas subterrâneas dentro do limite da sub-bacia hidrográfica	Armazenamento previamente existente no meio subterrâneo dentro do limite da sub-bacia hidrográfica acrescido de todas as entradas	Extracção de água subterrânea dentro do limite da sub-bacia hidrográfica	É englobado no escoamento superficial da sub-bacia hidrográfica	Escoamento subterrâneo existente na massa de águas subterrâneas que sai para fora do limite da sub-bacia hidrográfica	Água que se mantém armazenada nas massas de águas subterrâneas dentro do limite da sub-bacia hidrográfica

Notas: Recarga (R) = Rp+ Rd; massa de águas subterrâneas tem o mesmo sentido que sistema aquífero

## AGRADECIMENTOS

Trabalho desenvolvido no âmbito do projecto “Gestão quantitativa de sistemas aquíferos” do tema Ambiente e Sustentabilidade do Plano de Investigação Programada do LNEC para 2009-2012 (Processo 0607/11/17760).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998) – “Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements”, FAO, Irrigation and Drainage Paper, nr. 56.
- Lobo Ferreira, J.P. (1981, 1982) – “Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Scarce (Lack) Hydrogeological Data”. Proceedings of Euromech 143/2-4 Setp. 1981,

- Rotterdam, A.A. Balkema (Ed. A. Verruijt e F.B.J. Barends). Também: Memória N° 582, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1982.
- Oliveira, M.M. (2004, 2006) – “Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação”. Doutorado em Geologia (Hidrogeologia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, 440 pp., 2004. Também: Teses e Programas de Investigação - TPI 42, ISBN 972-49-2093-3, Editora LNEC, 2006.
- S.R.O.A. (1973) – "Carta dos solos de Portugal. II Volume: classificação e caracterização morfológica dos solos". Ministério da Economia, Secretaria de Estado da Agricultura, Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário, Volume II, 6ª Ed.