

ESTIMATIVA DA RECARGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS A PARTIR DA ANÁLISE DOS HIDROGRAMAS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA ÁREA ABRANGIDA PELA FOLHA 6 DA CARTA HIDROGEOLÓGICA DE PORTUGAL À ESCALA 1:200 000

Manuel M. OLIVEIRA

Geólogo. Núcleo de Águas Subterrâneas do LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, (+351) 21 844 34 36, moliveira@lnec.pt

Augusto M. COSTA

Geólogo. Departamento de Hidrogeologia do INETI, Estrada da Portela, Apartado 7586, 2720-866 Alfragide, (+351) 21 470 54 00, augusto.costa@ineti.pt

Alain FRANCES

Geólogo. Departamento de Hidrogeologia do INETI, Estrada da Portela, Apartado 7586, 2720-866 Alfragide, (+351) 21 470 54 00, frances.alain@ineti.pt

RESUMO

No âmbito da preparação da folha 6 da Carta Hidrogeológica de Portugal na escala 1:200 000, que abrange genericamente a região do Alto Alentejo (Portugal), foram estudadas dez bacias hidrográficas, utilizando precipitações e escoamentos monitorizados pelo Instituto da Água (INAG). Dependendo da bacia hidrográfica, foram analisadas séries de escoamento relativas a períodos de 4 a 28 anos hidrológicos, onde se estimaram precipitações anuais médias entre 489 mm/a e 936 mm/a e escoamentos totais anuais médios entre 49 mm/a e 623 mm/a.

Utilizando uma técnica de decomposição dos hidrogramas de escoamento, obtiveram-se escoamentos de base anuais médios entre 17 mm/a e 423 mm/a, que correspondem a valores entre 3 % e 45 % da precipitação calculada nas bacias. Utilizando os valores de escoamento de base anuais e os valores de precipitações anuais apresentam-se funções de escoamento de base anual vs. precipitação anual para cada bacia hidrográfica.

Os valores de escoamentos de base anuais médios são analisados criticamente e esta informação é cruzada com as áreas de afloramento de agrupamentos de formações geológicas definidos para este efeito, concluindo-se quanto ao respectivo comportamento hidrogeológico.

A técnica de cruzamento da informação visa o cálculo de um coeficiente de escoamento de base ($c_{Eb,j}$) característico de cada agrupamento de formações geológicas, que representa, para cada agrupamento, a parte da precipitação que é transformada em escoamento de base.

As rochas carbonatadas do soco hercínico originam coeficientes nulos, o que se justifica por não haver coincidência entre as bacias hidrográficas e hidrogeológicas ($c_{Eb,j}=0.0\%$). Nas restantes formações obtiveram-se resultados entre 3.5% (rochas essencialmente xistentas paleozóicas) e 21.9% no Pliocénico detrítico (Conglomerados de Ulme e arenitos de Almeirim). O erro resultante da aplicação dos coeficientes encontrados ao conjunto das bacias foi de 59 mm (excluindo a bacia de Rasa, que não foi considerada nesta análise, por razões que se explicam no texto).

Palavra-chave: Recarga, Alto Alentejo, hidrogramas, escoamento de base, hidrogeologia.

1 INTRODUÇÃO

A cartografia hidrogeológica é uma forma sintética de apresentação do conhecimento hidrogeológico.

A inclusão de informação de natureza meteorológica e hidrométrica em cartas hidrogeológicas é prática comum. Já nas folhas 7, 8 e 1 da Carta Hidrogeológica de Portugal na escala 1:200 000 (ESTEVES COSTA, 1986, 1988 e YOLANDA PEDROSA, 1998) foi incluída informação desta natureza. Nestas folhas apresentou-se igualmente o resultado do cruzamento de informação meteorológica, hidrográfica e geomorfológica (COSTA & COSTA, 1986).

Neste trabalho são apresentados resultados preliminares de uma colaboração entre o Instituto Geológico e Mineiro (IGM) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com vista à obtenção de informação a incluir na folha 6 da Carta Hidrogeológica de Portugal à escala 1:200 000. Esta abrange, em termos gerais, a região do Alto Alentejo (Portugal).

É apresentada a técnica de decomposição de hidrogramas para a avaliação da recarga de aquíferos, são apresentados os resultados obtidos em dez bacias hidrográficas da região, é apresentada a técnica de cruzamento de informação destes dados com a informação geológica e são apresentados e discutidos alguns resultados preliminares.

2 METODOLOGIA

2.1 Decomposição de hidrogramas

2.1.1 O hidrograma de escoamento superficial

O escoamento de um curso de água superficial (E) é composto (1) por escoamento directo (Ed), produzido na bacia hidrográfica a montante do local onde é medido, resultante da água de precipitação que não se infiltra à superfície do solo e que não fica retida (por exemplo nas copas das árvores, em edifícios, em barragens, etc.), e (2) por escoamento de base (Eb), resultante de água que se infiltra no solo, escoar subterraneamente e acaba por no seu percurso aflorar à superfície, constituindo por isso a descarga das águas subterrâneas para a bacia hidrográfica:

$$E = E_d + E_b \quad (1)$$

A relação entre estas três componentes ao longo do tempo é traduzida pelo hidrograma de escoamento (Figura 1). No hidrograma definem-se as seguintes partes distintas (LENCASTRE e FRANCO, 1984): (1) curva de crescimento; (2) ponta do hidrograma; (3) curva de decrescimento; (4) curva de esgotamento. A curva de crescimento corresponde ao aumento do escoamento que ocorre por efeito da chuva. A ponta do hidrograma ocorre no valor máximo de escoamento. A curva de decrescimento corresponde à diminuição progressiva do escoamento directo até que este se anula. O tempo de crescimento mais o tempo de decrescimento define o tempo base do hidrograma e corresponde ao período durante o qual se verifica o escoamento directo. A curva de esgotamento ou de recessão corresponde ao decréscimo do escoamento que provém somente do escoamento de base.

As duas grandes componentes do escoamento (directo e de base) podem ser individualizadas no hidrograma. Teoricamente, pode ser difícil localizar no hidrograma a posição do ponto onde se dá o fim do escoamento directo. LINSLEY et al. (1975) apresentam a seguinte expressão para calcular aproximadamente o tempo desde o pico do hidrograma até um ponto seleccionado arbitrariamente na curva de esgotamento que pretende traduzir o fim do escoamento directo:

$$N = 0,8 \cdot A^{0,2} \quad (2)$$

onde A é a área em km² e N é o número de dias. Os mesmos autores referem que o tempo N pode ser melhor determinado após inspecção de vários hidrogramas, tendo em atenção que o tempo durante o

qual ocorre escoamento directo não deve ser excessivamente longo e a subida do escoamento de base não deve ser muito grande (LINSLEY et al., 1975).

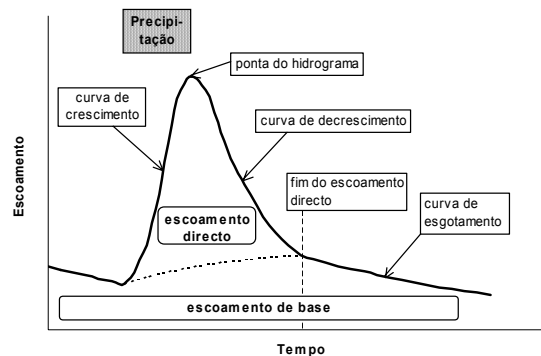


Figura 1 – Características do hidrograma de escoamento

2.1.2 Decomposição do hidrograma de escoamento superficial

A técnica geral da decomposição do hidrograma de escoamento superficial segue um dos métodos apresentados por LINSLEY et al. (1975) e consiste em unir os escoamentos registados no início da subida e no final do escoamento directo.

Para a aplicação desta técnica devem-se seleccionar bacias hidrográficas que apresentem as seguintes características:

- coincidam aproximadamente com bacias hidrogeológicas;
- existam simultaneamente registos diários de precipitação e de escoamento;
- sejam de preferência de área pequena (o que implicitamente significa que se situem na parte montante dos cursos de água);
- possuam litologia homogénea (se se pretender estudar o escoamento em função do tipo litológico);
- não existam barragens (para não impedir a detecção na estação hidrométrica, da reacção natural da bacia aos episódios de precipitação);
- não existam extracções de água feitas pelo homem ou então, no caso de existirem, que sejam desprezáveis ou que possam ser quantificadas no tempo, de forma a poderem ser consideradas posteriormente nos cálculos.

O modelo da decomposição dos hidrogramas de escoamento que se utiliza tem como pressuposto que os cursos de água são apenas e sempre receptores. Ou seja, recebem os escoamentos de base e directo, mas nunca cedem água para as formações geológicas das suas margens. Nesta situação não há variação de armazenamento de água nos leitos devido a escoamento proveniente do curso de água.

O método da decomposição dos hidrogramas começou a ser desenvolvido por OLIVEIRA et al. (1997a,b) e OLIVEIRA (1997) e sofreu uma actualização que se apresentou em OLIVEIRA (2001).

A técnica geral da decomposição consiste em marcar uma linha que une a origem do hidrograma do episódio em análise ao escoamento existente no início do dia $N + 1$ após o pico do hidrograma [Figura 2(A)] ou o final da chuvada [Figura 2(B)]. O dia N refere-se ao número de dias durante o qual ainda ocorre escoamento directo após o pico do hidrograma ou o final da chuvada, podendo ser calculado pela Eq. (2).

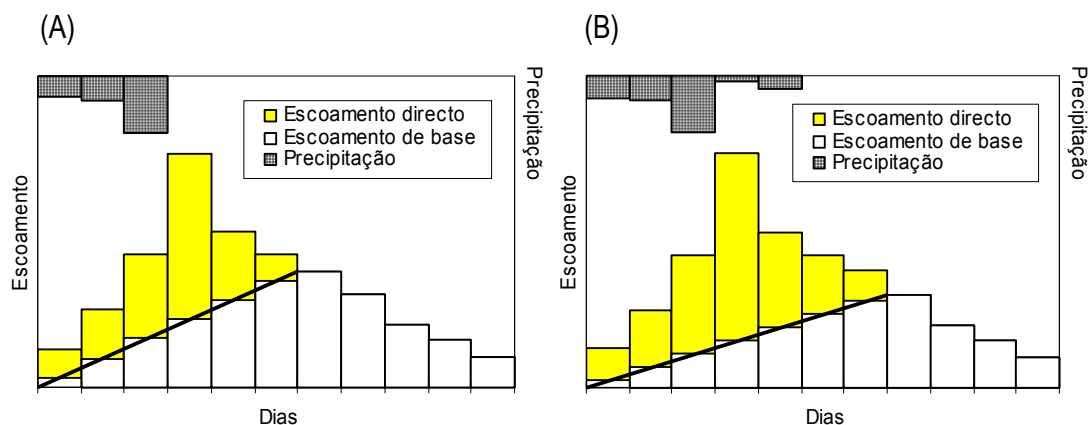


Figura 2 – Exemplo do processo de decomposição do hidrograma, para N = 2 dia, utilizando como critério (A) o dia do pico do hidrograma, (B) o último dia de chuva.

A área acima da linha constitui o escoamento directo do episódio em análise e a área abaixo da linha constitui o escoamento de base.

A complexidade da decomposição dos hidrogramas de escoamento reside na existência de sobreposição de episódios distintos. Neste sentido torna-se necessário desenvolver um conjunto de procedimentos que permitam a individualização dos episódios distintos de P/R. Este assunto e uma descrição mais detalhada da metodologia de decomposição dos hidrogramas de escoamento encontra-se desenvolvido em OLIVEIRA (2001, 2004a,b). A totalidade da metodologia foi incluída no programa de computador Dechidr_VB.vbp.

2.1.3 A recarga estimada a partir do escoamento de base

A metodologia apresentada baseia-se na caracterização do escoamento de base dos cursos de água superficial. Entre a ocorrência da recarga e o escoamento de base subsequente, existe a descarga do meio hídrico subterrâneo saturado para o meio superficial. Assim está-se perante a ocorrência de três processos (recarga → descarga → escoamento de base) e para que o escoamento de base determinado pela metodologia apresentada seja um bom estimador da recarga é necessário que se obedeça a um conjunto de requisitos.

O escoamento de base traduz a descarga do meio subterrâneo para o superficial se: (1) não houver armazenamento de água superficial; (2) não houver evaporação de água superficial; e (3) não houver extracções de água superficial.

Por outro lado, a descarga do meio subterrâneo traduz a recarga do meio se: (1) a única origem de água no meio saturado em análise for a recarga; (2) não houver extracções de água subterrânea; (3) toda a água que deixa o meio saturado escoar para o meio superficial; e (4) não houver evapo(transpi)ração de águas subterrâneas.

2.2 Relações teóricas entre as componentes do balanço hídrico

O texto que se apresenta nesta secção baseia-se em OLIVEIRA (2004a).

Os resultados anuais obtidos considerando a precipitação e a decomposição dos hidrogramas de escoamento de uma bacia hidrográfica exprimem a seguinte relação, válida no caso de se poderem desprezar as acções humanas, considerar que todo o escoamento subsuperficial da bacia é quantificado na secção da bacia em análise, e que a única entrada de água subsuperficial é a infiltração superficial:

$$P = (ETR + Evp + \Delta A) + Ed + D \quad (3)$$

De acordo com esta equação, a água de precipitação é distribuída pelos restantes processos indicados na equação: a evapotranspiração (ETR), a evaporação do meio superficial (Evp), o armazenamento (ΔA , que pode ser do meio superficial, do solo, da zona vadosa ou da zona saturada), o escoamento directo (Ed) e a descarga do meio saturado para o meio superficial (D). Ed + D constituem o escoamento superficial (E). A Figura 3 ilustra a repartição dos valores de precipitação anual pelas diversas componentes do balanço hídrico. Tomando os valores calculados para um ano hidrológico e considerando que o volume de água armazenado na bacia hidrográfica (superficial ou subsuperficialmente) no final e no início do ano hidrológico é semelhante (termos ΔA nulos), até um certo valor de precipitação anual toda a água que cai na bacia é evapo(transpi)rada. Só a partir de um certo valor anual é que se pode gerar escoamento que pode ser directo ou de origem subterrânea. À medida que a precipitação aumenta, tanto o escoamento como a evapo(transpi)ração real também aumentam. A partir de um certo valor de precipitação, esta origina um valor de armazenamento de água no solo e no meio superficial tal que a evapo(transpi)ração real é limitada não pela água disponível para este processo mas pela evapotranspiração potencial. Em termos anuais, é então de esperar que a partir de um certo valor de precipitação, esta forneça a quantidade de água necessária para que se atinja a evapo(transpi)ração potencial, razão pela qual, a partir desse valor, a evapo(transpi)ração se mantém constante e a variação do escoamento da bacia é a mesma que a variação da precipitação.

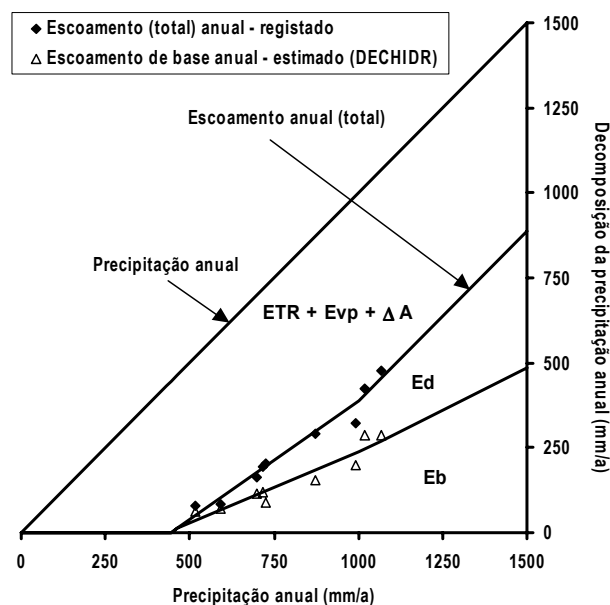


Figura 3 – Decomposição da precipitação anual nas diversas componentes do balanço hídrico (utilizando os dados calculados para 17L01 - Ponte de Panasco) (extraído de Oliveira, 2004a)

Uma forma possível de relacionar o escoamento com a precipitação para o intervalo entre a precipitação aquém da qual não se produz escoamento e aquela a partir da qual a evapotranspiração é dada pela evapotranspiração potencial é através de uma equação de um segmento de recta $E = E(P) = a.P + b$ válida para o intervalo de P em que $E = 0$ e o valor de P para o qual a evapotranspiração iguala a evapotranspiração potencial (que se considera constante para uma bacia; $P = P_u$). Uma forma de escrever a equação anterior que traduz melhor o processo físico em análise é $E = E(P) = a.(P + b/a)$, traduzindo a relação $-b/a$ o valor mínimo de precipitação que é necessário ocorrer para que haja produção de escoamento. Abaixo desse valor toda a precipitação é utilizada no processo de

evapo(transpi)ração. A partir de P_u , dado que se pretende que $ETR + E_{vp}$ seja constante, o escoamento passa a ser descrito pela recta $E = P + E(P_u) - P_u$.

Uma vez que $P - E = ETR + E_{vp}$, as equações de cálculo da $ETR + E_{vp}$ obtêm-se pela diferença entre a precipitação e o escoamento calculado pelas equações anteriores.

Relativamente à decomposição do escoamento superficial, após o início do ano hidrológico o primeiro escoamento a formar-se tanto pode ser (1) o directo, no caso de as primeiras chuvadas serem muito concentradas e os horizontes superiores do solo saturarem originando escoamento directo, como pode ser (2) o de base, no caso de as chuvadas não serem intensas, a água se infiltrar e este processo acabar por provocar a descarga do meio subterrâneo. Nos anos de precipitação mais baixa pode ocorrer qualquer uma destas situações.

Com o aumento dos valores de precipitação anual, ambos os tipos de escoamento superficial anual (directo e de base) crescem com a precipitação de uma forma que dentro da mesma bacia depende das suas propriedades físicas (capacidade para infiltrar água), do regime de precipitação e da distribuição da precipitação na bacia hidrográfica. Uma bacia com uma maior facilidade de infiltração e com o nível freático afastado da superfície tenderá a ter uma componente de escoamento de base superior, enquanto que uma bacia menos permeável à infiltração ou com o nível freático próximo da superfície tenderá a ter uma componente de escoamento directo superior.

A relação dos escoamentos de base e directo, anuais, com a precipitação anual poderá ser também descrita por equações lineares.

Há um intervalo de valores de P , entre o valor de P a partir do qual o escoamento superficial deixa de ser nulo e o valor de P a partir do qual ocorrem as duas formas de escoamento (directo e de base), em que apenas existe uma das formas de escoamento, sendo o valor dessa forma de escoamento dado pelo escoamento superficial. O valor de P a partir do qual passam a existir as duas formas de escoamento é o correspondente à intersecção das funções da forma de escoamento que se produz em primeiro lugar e do escoamento (superficial).

Quando se ajusta uma equação de regressão linear aos valores anuais das diversas formas de escoamento em função da precipitação, as diferenças entre os valores das diversas formas de escoamento obtidos pela decomposição dos hidrogramas e os estimados pela regressão obtida, podem ser justificadas pela distribuição espacial e temporal da precipitação dentro da bacia, uma vez que os restantes parâmetros da bacia se mantêm constantes, ou por diferentes valores de evapotranspiração potencial anual (devidos à ocorrência de temperaturas e ventos diferentes). Outras causas, que podem ser importantes, para a existência destas diferenças, são os erros de determinação dos escoamentos e da precipitação e os erros inerentes à técnica utilizada da decomposição dos hidrogramas.

2.3 Cruzamento da informação geológica com o escoamento de base

Numa bacia hidrográfica ocorrem geralmente diversas formações geológicas. Representando por n o número de formações (ou agrupamentos geológicos) aflorantes, o escoamento de base da bacia hidrográfica (E_b), pode ser expresso por:

$$E_b.A = \sum_{j=1}^n A_j . c_{Eb j} . P \quad (4)$$

onde P representa a precipitação média na bacia hidrográfica, A a área total da bacia, A_j representa a área de afloramento do agrupamento geológico j e $c_{Eb j}$ é um coeficiente (entre 0 e 1) que representa a contribuição desse agrupamento geológico para o escoamento de base da bacia. Para uma só bacia, a equação (4) resolvida em ordem a $c_{Eb j}$ pode proporcionar uma infinidade de soluções.

Se para uma determinada região de estudo se puder assumir que a precipitação e a evapotranspiração potencial são aproximadamente constantes, que nessa região os agrupamentos geológicos têm as mesmas características de infiltração e de produção de escoamento de base e que é

possível definir nessa região m sub-bacias hidrográficas para as quais seja possível calcular os seus escoamentos de base então pode-se estimar a contribuição de cada agrupamento geológico para o escoamento de base total.

Se $m = n$ trata-se de resolver um sistema de m equações a n incógnitas que são os coeficientes c_{Eb_j} :

$$[A] \cdot [C] = [B] \quad \text{ou} \quad [C] = [A]^{-1} \cdot [B] \quad (5)$$

onde $[A]$ é a matriz das constantes $\frac{P_i \cdot A_{ij}}{A_i}$, $[C]$ é a matriz dos coeficientes c_{Eb_j} , e $[B]$ é a matriz dos escoamentos de base para cada sub-bacia Eb_i .

Os coeficientes da matriz C têm sempre que ter valores entre 0 e 1, e normalmente não deverão ser superiores a 40 %. Ou seja a contribuição de um agrupamento geológico para o escoamento de base não deverá ser superior a 40 % da precipitação (salvo em casos excepcionais como rochas carsificadas ou muito fissuradas). Devido à possibilidade de incumprimento dos requisitos necessários à validade da equação (5), os coeficientes podem dar valores fora do intervalo pretendido e nesse caso pode-se justificar a utilização de uma função de minimização das diferenças entre os escoamentos de base calculados para cada bacia utilizando os coeficientes a determinar e os escoamentos de base determinados pela técnica da decomposição dos hidrogramas, sujeita a restrições dos coeficientes c_{Eb_j} :

$$\text{mínimo} = \text{MIN} \left(\sum_{i=1}^m \text{ABS} \left[\sum_{j=1}^n (A_{ij} \cdot c_{Eb_j} \cdot P_i) - Eb_i \cdot A_i \right] \right) \quad (6)$$

Outra forma de formular o problema seria utilizar o quadrado do argumento em vez do absoluto do argumento.

3 CARACTERIZAÇÃO SUMÁRIA DA GEOLOGIA

A folha 6 da Carta Geológica de Portugal na escala 1:200 000 ainda está em preparação. Por esse motivo, como base de trabalho foi utilizada, a título provisório, uma ampliação da folha sul da Carta Geológica de Portugal na escala 1:500 000 (Oliveira *et al.*, 1992).

A área da folha 6 abrange uma parte da bacia Terciária do Tejo e uma vasta área de substrato hercínico. Este inclui formações de duas zonas geotectónicas distintas:

- Zona de Ossa-Morena, que corresponde à maior parte da extensão, e
- Zona Centro Ibérica, marcada pelas formações que ocorrem na zona norte da área de estudo.

As formações terciárias são constituídas essencialmente por depósitos sedimentares de grés, conglomerados e argilas, enquanto nas formações do substrato hercínico se encontram rochas eruptivas e metassedimentares. Os graus de fracturação e de meteorização das formações do soco hercínico, que condicionam fortemente a instalação de sistemas aquíferos, dependem da natureza litológica da formação e do respectivo enquadramento estrutural e tectónico, entre outros factores.

Em termos hidrogeológicos individualizam-se diversos sistemas aquíferos, sobretudo relacionados com a bacia terciária do Tejo e com as formações de natureza carbonatada (dolomitos, calcários dolomíticos e mármore) do soco hercínico. É reconhecida a existência de outros aquíferos nas restantes áreas, que representam a maior parte da área de estudo, mas a sua individualização e caracterização é difícil. Pretende-se, por isso, incluir na folha 6 uma classificação hidrogeológica das formações geológicas ocorrentes, para o que se revela vantajoso agrupar formações geológicas, após uma análise individual de cada uma.

Quadro 1 – Formações geológicas e agrupamentos geológicos considerados no cruzamento da informação geológica com os escoamentos de base das bacias

Agrupamento geológico	Formações geológicas	Idade
Quaternário	Aluviões, Terraços, Areias e Cascalheiras	Holocénico, Plistocénico
Pliocénico detrítico	Conglomerados de Almeirim, Arenitos de Ulme	Pliocénico
Miocénico detrítico	Argilas de Tomar, Formação de Vale do Guiso	Miocénico
Paleozóicas diversas (metassedimentares de origem detrítica e vulcânica)	Turbiditos (Fm. Terena); Xistos e arenitos (Fm S. Mamede); Xistos negros, liditos, ampelitos e quartzitos (Silúrico do Bordo Sudoeste); Xistos negros e liditos (Silúrico)+Xistos e arenitos (F.Colorada); não diferenciados; Xistos negros e liditos (Silúrico); Xistos cinzentos e psamitos (Ordovícico) não diferenciados Vulcanitos básicos; Filitos e psamitos (Complexo Vulcano-Sedimentar de Moura-Santo Aleixo (Xistos de Moura); Vulcanitos básicos (Complexo Vulcano-Sedimentar de Moura-Santo Aleixo (Xistos de Moura); Formação de Barrancos: xistos cinzentos esverdeados e roxos, psamitos; Arenitos e conglomerados na base no Alto Alentejo; Xistos e grauvaques (Fm. Ossa); Formação do Quartzito Armoricano (Bordo Sudoeste); Sequência ordovícica indiferenciada; Vulcanitos ácidos (Complexo Vulcano-Sedimentar carbonatado de Ficalho-Portel); Vulcanitos básicos (Complexo Vulcano-Sedimentar carbonatado de Ficalho-Portel); Formação de Perais: turbiditos; Formação de Fatuquedo: xistos, grauvaques, arenitos e conglomerados; Xistos (C.V.S. Terrugem); Vulcanitos básicos (C.V.S. Terrugem); Conglomerados; vulcanitos ácidos e arcoses; Xistos, arenitos e conglomerados (Fm. Vila Boim); Conglomerados (Fm. Vila Boim); Vulcanitos básicos (Fm. Vila Boim)	Devónico superior - Câmbrio inferior
Carbonatadas paleozóicas	Mármore (Complexo Vulcano-Sedimentar carbonatado de Estremoz); Mármore (Complexo Vulcano-Sedimentar carbonatado de Ficalho-Portel); Calcários dolomíticos; mármore; Mármore	Ordovícico inferior - Câmbrio inferior
Séries precâmbrias	Formação de Água de Peixes: xistos, grauvaques, chertes negros e vulcanitos ácidos; Formação de Mares: xistos, grauvaques, chertes negros e vulcanitos ácidos; Arenitos (Formação de Morenos); Vulcanitos ácidos (Formação de Morenos); Xistos, grauvaques, chertes negros, anfíbolitos e calcários (Formação de Mosteiros); Xistos e grauvaques (Formação de Urre); Rochas porfíroides (Formação de Urre); Formação de Campo Maior; Séries proterozóicas migmatizadas durante a orogenia hercínica	Proterozóico
Intrusivas hercínicas tardi-orogénicas	Pórfiros riolíticos, pórfiros graníticos e aplito-pegmatitos; Quartzo e quartzo carbonatado; Granodioritos e Tonalitos; Granitos; Granito biotítico; Granito biotítico porfíroide; Gabros e dioritos	Hercínico - Tardi-orogénica
Intrusivas hercínicas orogénicas	Granitos biotíticos porfíroides; Granodioritos; Granito de duas micas; Granito de duas micas porfíroide; Dioritos e gabros; Gabros anortosíticos; Tonalitos	Hercínico - Orogénica
Intrusivas pré-hercínicas	Rochas peralcalinas (Complexo Vulcano-Sedimentar carbonatado de Estremoz); Rochas peralcalinas; Ortognaisses	Câmbrio médio – Ordovícico inferior; Pre-Hercínico

Foram definidos nove agrupamentos litológicos (Quadro 1) em função da semelhança de comportamento hidrogeológico de cada formação geológica:

- aluviões e terraços e cascalheiras do Quaternário, por se tratarem de formações geralmente conectadas hidraulicamente;
- formações pliocénicas, compostas por níveis detríticos pouco argilosos, permeáveis;
- formações miocénicas correspondentes à base da cobertura, predominantemente argilosas, sendo por isso, globalmente, de baixa permeabilidade,
- formações metassedimentares; foram definidos os agrupamentos seguintes:
 - formações metassedimentares precâmbrias, constituindo um conjunto relativamente homogéneo e de áreas individuais insignificantes;
 - formações metassedimentares xistosas, vulcânicas e detríticas paleozóicas, incluindo a formação dos quartzitos armorianos com propriedades hidráulicas muito diferentes e que numa fase posterior de estudo deverão ser considerados separadamente;
 - formações metassedimentares carbonatadas, que constituem essencialmente aquíferos já identificados.
- rochas eruptivas, em que predominam as rochas ácidas (granitos); foram agrupadas atendendo fundamentalmente à idade da intrusão em relação à orogenia hercínica, pois considerou-se

que o facto de um maciço rochoso ter sido sujeito ou não a determinada fase tectónica dessa orogenia, poderia ter reflexos no grau de fracturação e meteorização desse maciço e, consequentemente, na capacidade de infiltração da água da chuva. Consideraram-se três grupos distintos:

- maciços pré-hercínicos;
- maciços hercínicos orogénicos;
- maciços hercínicos tardi-orogénicos.

4 SELECÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

De acordo com a informação publicada no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), do INAG, em 2002, na área abrangida pela folha 6 da Carta 1:200 000 foi identificada a existência de 35 estações hidrométricas, activas ou desactivadas. Destas estações, o SNIRH disponibiliza informação sobre os caudais médios diários obtidos em 15 estações hidrométricas. Destas 15 estações hidrométricas não foram consideradas cinco, quer por as bacias hidrográficas a montante apresentarem áreas muito elevadas, quer por haver formas de armazenamento superficial na bacia hidrográfica que alteram os valores do escoamento superficial.

Os períodos de análise de dados corresponderam à maior série de dados possível, escolhendo-se sempre como início o dia 1 de Outubro e como final o dia 30 de Setembro dos anos hidrológicos para os quais existe informação.

Para as dez estações hidrométricas identificadas, o Quadro 2 sintetiza as características das bacias hidrográficas a estudar assim como o período de análise de dados, ordenadas de N para S e de E para W. A Figura 4 localiza essas bacias bem como as estações hidrométricas e os postos udométricos existentes. O Quadro 3 representa os agrupamentos geológicos definidos na secção 2 e as respectivas áreas de afloramento em cada bacia estudada.

Quadro 2 - Períodos com registos de dados no SNIRH e área aproximada das sub-bacias hidrográficas

Código	Designação	Data de início dos dados	Data de fim dos dados	Número de anos hidrológicos analisados	Área aproximada (km ²)
17L/01	Pte. Panasco	1981-10-01	1990-09-30	9	109
17M/01	Rasa	1981-10-01	1985-09-30	4	8
18I/01	Moinho Novo	1981-10-01	1990-09-30	10	634
18K/01	Ponte Vila Formosa	1980-10-01	1990-09-30	10	652
18L/01	Couto de Andreiros	1963-10-01	1990-09-30	24	244
19M/01	Monforte	1961-10-01	1990-09-30	28	136
19N/01	Monte Pisão	1981-10-01	1990-09-30	9	218
19N/02	Ponte Algalé	1982-10-01	1990-09-30	6	122
20I/04	Pavia	1959-10-01	1990-09-30	22	610
23I/01	Flor da Rosa	1955-10-01	1965-09-30	10	300

5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

5.1 Análise dos escoamentos superficiais

Para cada sub-bacia, OLIVEIRA (2004b) refere os postos udométricos utilizados para o cálculo da precipitação na sub-bacia e apresenta, para cada sub-bacia, os resultados por ano hidrológico e por episódio de precipitação/recarga individualizado. O Quadro 4 sintetiza a litologia, os valores anuais médios encontrados para cada sub-bacia, apresenta o valor mediano do escoamento de base, e apresenta as fracções do escoamento de base em relação à precipitação e ao escoamento superficial.

O Quadro 5 apresenta as equações de regressão linear do escoamento de base anual e do escoamento (superficial) anual sobre a precipitação anual e respectivos coeficientes de correlação. Os

valores apresentados referem-se ao número de anos referidos no Quadro 4. Em relação aos coeficientes de correlação entre Eb e P todas as sub-bacias apresentam coeficiente de correlação superior a 0,75.

Quadro 3 – Agrupamentos geológicos e áreas que ocupam em cada bacia hidrográfica (valores em km²)

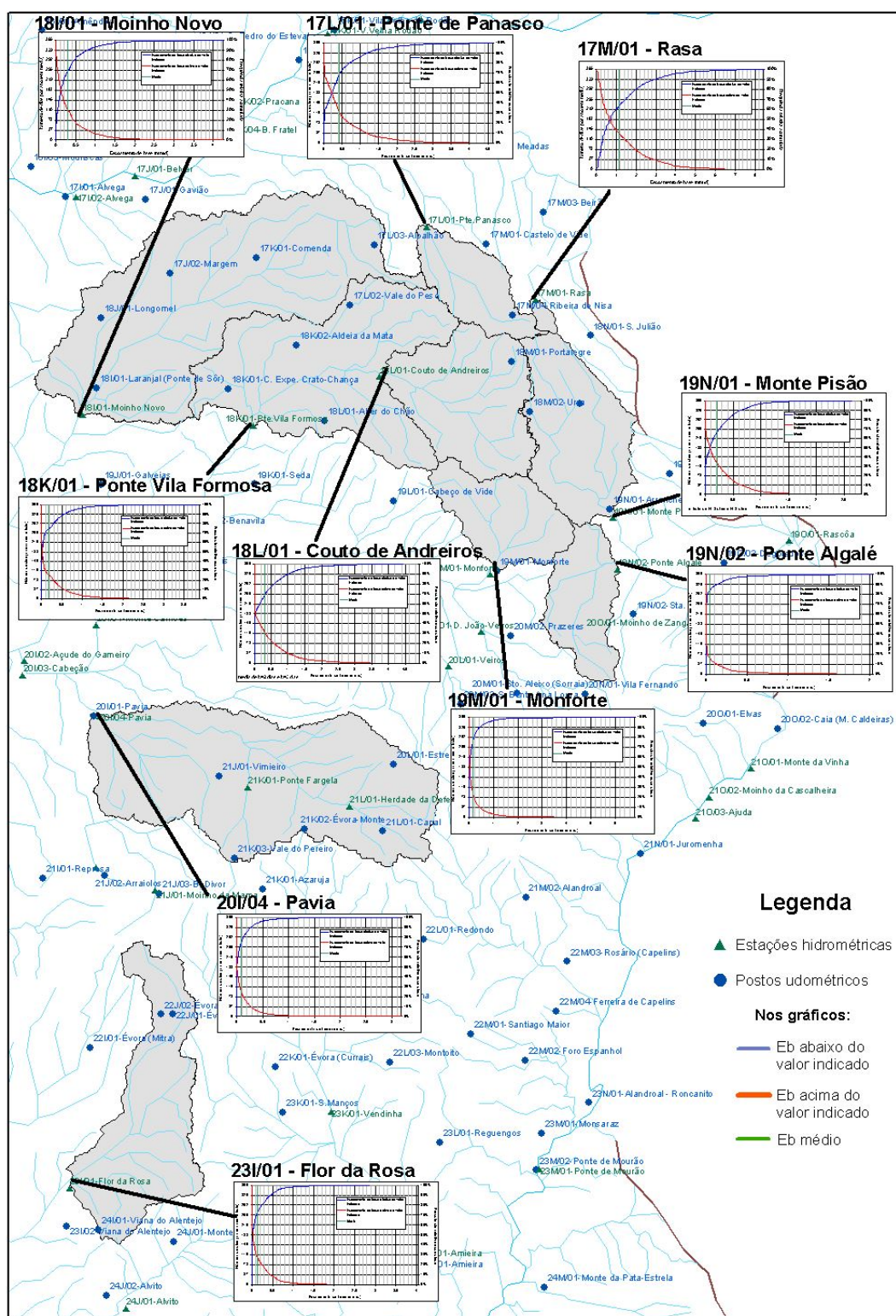
Agrupamento geológico	Ponte Panasco-17L/01	Rasa-17M/01	Moinho Novo-18I/01	Ponte Vila Formosa-18K/01	Couto de Andreiros-18L/01	Monforte-19M/01	Monte Pisão-19N/01	Ponte Algalé-19N/08	Pavia-20I/04	Flor da Rosa-23I/01	Área por litologia
Quaternário			46,8	4,8							51,6
Pliocénico detrítico			350,7	12,7					3,4		366,8
Miocénico detrítico			12,4	69,3					45,5		127,2
Paleozóicas diversas	8,7	8,4	0,0	34,3	12,1	5,1	79,0	15,3	292,5	37,1	492,7
Carbonatadas paleozóicas				8,1	0,8	13,9	0,7	12,3	23,8	8,2	67,7
Séries precâmbrias			11,5	157,9	90,6	36,7	105,1			38,1	439,9
Intrusivas hercínicas tardi-orogénicas	4,6		215,7	97,1		33,9	1,2	97,3		77,6	527,5
Intrusivas hercínicas orogénicas			1,3	198,6	116,2	15,0	0,4		240,1	128,9	700,5
Intrusivas pre-hercínicas	95,8		7,5	80,0	22,8	34,9	33,5		2,7	9,8	287,0
Área da bacia	109,2	8,4	645,9	662,9	242,5	139,5	219,9	124,9	608,0	299,8	3060,9

Quadro 4 – Síntese das litologias dominantes, valores anuais médios resultantes da decomposição dos hidrogramas, e escoamento de base mediano, por sub-bacia hidrográfica

Bacia hidrográfica	Litologia dominante	Nº de anos utilizados nos cálculos	Prec. média (P) (mm/a)	Esc. total médio (E) (mm/a)	Esc. directo médio (Ed) (mm/a)	Esc. base médio (Eb) (mm/a)	Esc. base mediano (mm/d)	Eb/P (%)	Eb/E (%)
Ponte Panasco-17L/01	gr	9	801	248	95	153	0,217	19	62
Rasa-17M/01	m	4	936	623	201	423	0,664	45	68
Moinho Novo-18I/01	misto	10	723	184	80	104	0,115	14	57
Ponte Vila Formosa-18K/01	misto*	10	684	172	109	63	0,017	9	37
Couto de Andreiros-18L/01	gr+m	24	654	276	160	116	0,032	18	42
Monforte-19M/01	gr+m*	28	587	215	161	54	0,012	9	25
Monte Pisão-19N/01	gr+m	9	783	195	115	80	0,085	10	41
Ponte Algalé-19N/08	gr*	6	489	49	32	17	0,000	3	35
Pavia-20I/04	gr+m*	22	647	142	110	32	0,005	5	23
Flor da Rosa-23I/01	gr+m*	10	769	280	230	50	0,017	6	18

Litologia dominante: gr→ rochas ígneas, m→ rochas metamórficas, misto→ rochas sedimentares e (ígneas ou metamórficas), *ocorrência de rochas carbonatadas carsificadas

A Figura 4, para além de sintetizar a informação obtida, permite observar a distribuição espacial das funções de distribuição de probabilidade (distribuição das frequências acumuladas) dos escoamentos de base calculados em cada uma das sub-bacias.



Bases cartográficas:

Rede Hidrográfica: Mapa do Atlas do Ambiente (escala 1:1000000)

Estações hidrométricas e postos udométricos: SNIRH-Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

Bacias: Limites digitalizados sobre cartografia 1:25000 e Planos de Bacias Hidrográficas do Tejo e do Sado

Figura 4 – Localização das sub-bacias hidrográficas estudadas com indicação das estações hidrométricas e os postos udométricos existentes na área abrangida pela Folha 6 à escala 1:200 000. Distribuição dos resultados do escoamento de base obtidos pela decomposição dos hidrogramas de escoamento por sub-bacia hidrográfica

Quadro 5 – Equações de regressão linear do escoamento de base e do escoamento superficial sobre a precipitação, respectivos coeficientes de correlação (r) e limites de aplicação de cada uma das equações para definir o escoamento de base, por sub-bacia hidrográfica

Bacia hidrográfica	Regressão linear do escoamento de base sobre a precipitação (mm/a)		Regressão linear do escoamento sobre a precipitação (mm/a)		Segmentos de recta do escoamento de base	
	Equação 1	r	Equação 2	r	Equação 1 P mínima	Equação 2 P mínima
Ponte Panasco-17L/01	$E_b=0,4161 \cdot P-179,7$	0,947	$E=0,6984 \cdot (P-444,9)$	0,976	464,0	444,9
Rasa-17M/01	$E_b=0,5418 \cdot P-84,9$	0,991	$E=0,9144 \cdot (P-254,6)$	0,959	396,9	254,6
Moinho Novo-18I/01	$E_b=0,2573 \cdot P-81,7$	0,776	$E=0,4896 \cdot (P-347,4)$	0,863	380,5	347,4
Ponte Vila Formosa-18K/01	$E_b=0,2058 \cdot P-78,1$	0,887	$E=0,6713 \cdot (P-428,6)$	0,938	450,3	428,6
Couto de Andreiros-18L/01	$E_b=0,3339 \cdot P-102,2$	0,755	$E=1,0750 \cdot (P-397,6)$	0,909	438,9	397,6
Monforte-19M/01	$E_b=0,2161 \cdot P-73,3$	0,924	$E=0,9467 \cdot (P-341,5)$	0,902	367,1	341,5
MontePisão-19N/01	$E_b=0,2080 \cdot P-82,7$	0,925	$E=0,5498 \cdot (P-428,7)$	0,925	447,6	428,7
Ponte Algalé-19N/08	$E_b=0,1384 \cdot P-50,6$	0,904	$E=0,4539 \cdot (P-382,0)$	0,877	389,2	382,0
Pavia-20I/13	$E_b=0,1270 \cdot P-50,2$	0,842	$E=0,6380 \cdot (P-424,9)$	0,899	432,3	424,9
Flor da Rosa-23I/01	$E_b=0,1286 \cdot P-49,0$	0,850	$E=0,9347 \cdot (P-438,6)$	0,954	483,3	438,6

Como referido na secção 2.2, o escoamento de base pode ser descrito, em função da precipitação, por segmentos de recta. No caso da primeira forma de escoamento (directo ou de base) que ocorre ser o E_b , este é descrito pelo segmento de recta de regressão de E sobre P desde a precipitação a partir da qual E deixa de ser nula até à precipitação em que as rectas de E e de E_b se intersectam, sendo descrito pelo segmento da recta de regressão de E_b sobre P a partir desse ponto até à precipitação máxima considerada. No caso da primeira forma de escoamento a gerar-se ser o E_d , então E_b é descrito somente pelo segmento de recta de regressão de E_b sobre P entre a precipitação para a qual E_b deixa de ser nula e a precipitação máxima. O Quadro 5 apresenta os valores de P a partir dos quais se aplica cada uma das equações. A Figura 5 representa as funções do escoamento de base anual sobre a precipitação para cada uma das sub-bacias estudadas.

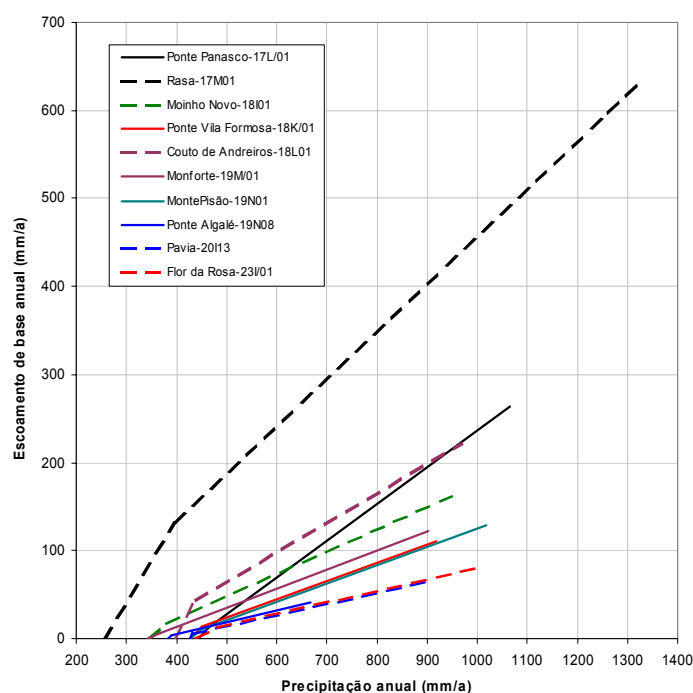


Figura 5 – Escoamento de base anual em função da precipitação anual determinada para cada sub-bacia estudada (as funções representam-se até ao valor máximo de precipitação anual de cada sub-bacia).

De acordo com as equações apresentadas para todas as sub-bacias, a primeira forma de escoamento a ocorrer, estimada a partir das rectas de regressão, é o escoamento de base.

Em relação aos resultados obtidos, verifica-se que na sub-bacia de Couto de Andreiros, e de alguma forma também em Rasa, Monforte e Flor da Rosa, o pendor da recta do escoamento (Equação 2 do Quadro 5) é aproximadamente unitário, o que significa que não há variação da parcela ETR + Evp com a P, o que pode indiciar que nestas bacias, quando há produção de escoamento, já se satisfaz a evapo(transpi)ração potencial.

Como se pode verificar na Figura 5, a função do escoamento de base da sub-bacia de Rasa projecta-se distintamente das restantes funções. Esta diferença pode ser justificada por as condições hidrogeológicas, geomorfológicas e de ocupação do solo da bacia serem diferentes das condições das outras bacias analisadas, de tal forma que na sub-bacia de Rasa o escoamento é privilegiado em detrimento da evapotranspiração. Contudo, poder-se-iam considerar outras hipóteses para justificar esta função do escoamento de base, por exemplo que a série de precipitação média diária da bacia possa ter sido calculada por defeito, uma vez que não há nenhum posto udométrico situado no ponto mais alto da bacia (Serra de S. Mamede).

5.2 Escoamentos de base vs. agrupamentos geológicos

Para procurar uma relação entre os escoamentos de base e os agrupamentos geológicos (através dos coeficientes $c_{Eb j}$), utilizaram-se nove sub-bacias estudadas. Rasa foi excluída deste estudo devido às questões apresentadas na secção anterior.

Começou por se resolver a equação (5). O cálculo da matriz dos coeficientes [C] foi feito recorrendo ao programa MathLab. Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 6. Uma vez que se obtiveram coeficientes superiores à unidade, procurou-se o mínimo da equação (6), considerando-se como restrições que os coeficientes se deveriam situar entre 0 e 30 %. A equação (6) foi resolvida através da função "Solver" incluída no programa Microsoft Excel 2000 e que utiliza o algoritmo GRG2 (Generalized Reduced Gradient). As áreas A_{ij} e A_i consideradas são as indicadas no Quadro 3. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 6. O mínimo obtido pela equação (6) foi de 59 mm.

Quadro 6 – Formações geológicas e agrupamentos geológicos considerados no cruzamento da informação geológica com os escoamentos de base das bacias

Agrupamento geológico	Equação (5) $c_{Eb j}$ (%)	Equação (6) $c_{Eb j}$ (%)
Quaternário	202.3%	9.0%
Pliocénico detrítico	101.8%	21.9%
Miocénico detrítico	621.3%	6.3%
Paleozóicas diversas	48.5%	3.5%
Carbonatadas paleozóicas	35.7%	0.0%
Séries precâmblicas	18.4%	12.0%
Intrusivas hercínicas tardi-orogénicas	20.7%	3.9%
Intrusivas hercínicas orogénicas	55.8%	6.6%
Intrusivas pré-hercínicas	10.1%	21.3%

Para esta análise fez-se uma simplificação muito grande ao considerar que o coeficiente $c_{Eb j}$ se mantinha constante para um mesmo agrupamento geológico, sendo por isso independente da precipitação na bacia e das propriedades intrínsecas da bacia. Esta situação não é verdadeira, principalmente quando se tem variações de precipitação tão importantes como as registadas na zona norte e na zona sul da Folha 6. Esta será a principal razão pela qual a resolução da Equação (5) não forneceu bons resultados.

Com base na aplicação da equação (6) e tendo presente a simplificação efectuada pode-se fazer os seguintes comentários:

- Quaternário: o valor de c_{Ebj} de 9.0% poderá estar subvalorizado uma vez que estão identificadas numerosas situações em que as aluviões são recarregadas pelos aquíferos envolventes;
- Pliocénico detritico: o valor calculado de 21,9% poderá resultar dos níveis permeáveis reconhecidos nestas formações (Conglomerados de Ulme e arenitos de Almeirim);
- Miocénico detritico: o valor de 6,3% parece traduzir a predominância de fácies argilosas nestas formações (Argilas de Tomar, Formação de Vale do Guiso);
- Paleozóicas diversas: o valor 3,5% para o conjunto parece razoável;
- Carbonatadas paleozóicas: os valores nulos de escoamento de base encontrados para as formações deste grupo justificam-se porque a descarga do escoamento subterrâneo de água que se infiltra nestas formações se faz para fora das bacias hidrográficas em análise (como o confirmam os trabalhos de COSTA (1985) para o anticlinal de Estremoz, onde o escoamento subterrâneo no flanco SW do anticlinal se faz para NW, e de FERNANDES *et al.* (1999) para o caso da extremidade NW do sistema aquífero de Alter do Chão-Monforte);
- Séries precâmblicas: o valor encontrado de 12,0% para o conjunto das bacias pode ser o resultado de rochas muito duras e frágeis intensamente fracturadas que originam numerosas pequenas nascentes em formações precâmblicas;
- Rochas intrusivas hercínicas tardi-orogénicas: o valor 3,9% parece reflectir uma contribuição modesta para o escoamento de base, o que reflecte situações em geral de menor fracturação nos maciços intrusivos que sofreram menos fases de deformação hercínicas;
- Rochas intrusivas hercínicas orogénicas: o valor de 6,6% encontrado pode reflectir a importância de se tratar de intrusões anteriores às referidas atrás;
- Rochas intrusivas pré-hercínicas: o valor encontrado para este agrupamento de 21,3% parece resultar em larga medida dos ortognaisses. Também o facto de serem rochas com uma textura gnaissóide muito fracturadas parece concordante com um elevado contributo para o escoamento de base.

6 CONCLUSÕES

A decomposição de hidrogramas com a determinação do respectivo escoamento de base constitui uma técnica de investigação hidrogeológica que fornece informação sobre a importância relativa da descarga das águas subterrâneas no escoamento de uma bacia. A sua aplicação a diversas pequenas bacias hidrográficas de uma região relativamente homogénea do ponto de vista geomorfológico, mas com uma acentuada diversidade de formações geológicas, associada a técnicas de optimização no cruzamento da informação, parece constituir uma abordagem nova para a classificação hidrogeológica das formações geológicas, com aplicação na cartografia hidrogeológica.

Não se trata de qualquer processo automático e a experiência apresentada revela a necessidade de validar os resultados que se obtêm, com um conhecimento do terreno sólido.

Os valores encontrados para os coeficientes de escoamento de base em função do agrupamento geológico são bons indicadores da infiltração eficaz de cada agrupamento geológico se se considerar que toda a água que se infiltra nessas formações geológicas é descarregada por essas formações geológicas para dentro da bacia hidrográfica, e que não há outras entradas de água nessas formações geológicas. Os únicos casos em que os modelos conceptuais de escoamento subterrâneo não se ajustam a esta situação são nalguns casos as aluviões, que podem receber água por escoamento subterrâneo proveniente das formações geológicas envolventes, e noutros casos as formações carbonatadas paleozóicas, que apresentam escoamento subterrâneo para fora da bacia hidrográfica. Nesta última situação, a recarga estimada a partir do escoamento de base encontra-se estimada por defeito.

Os valores apresentados de coeficientes de escoamento de base estão de acordo com os valores expectáveis de infiltração eficaz para este tipo de formações geológicas.

Será estudada a melhor forma de representar cartograficamente a informação agora obtida. Esta informação será utilizada na definição dos agrupamentos de formações geológicas e será definida uma tabela classificativa com base no coeficiente C_{Eb} .

BIBLIOGRAFIA

COSTA, A. M. (1985). Características hidrogeológicas dos principais afloramentos de rochas carbonatadas do substrato hercínico no Alentejo- 1º Congresso sobre O ALENTEJO, II volume, Évora, pp.657-665.

COSTA, F. E. & COSTA, A. M. (1986). Processamento automático de dados hidrogeomorfológicos e a sua aplicação na cartografia hidrogeológica- textos das comunicações ao IV Congresso do Algarve, I volume, Montechoro, p.603-610.

ESTEVES COSTA, F. (1986). Folha 7 da Carta Hidrogeológica de Portugal na escala 1:200 000, Serviços Geológicos de Portugal.

ESTEVES COSTA, F. (1988). Folha 8 da Carta Hidrogeológica de Portugal na escala 1:200 000, Serviços Geológicos de Portugal.

FERNANDES, J.; RIBEIRO, L. (1999). Análise Espaço-Temporal da Piezometria do Sistema Aquífero Monforte – Alter do Chão, Seminário sobre Aguas Subterrâneas, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa.

LENCASTRE, A.; FRANCO, F.M. (1984). Lições de Hidrologia. Lisboa, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. 451 pp.

LINSLEY Jr., R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. (1975). Hydrology for Engineers. Second Edition. McGraw Hill Kogakusha, Ltd.

OLIVEIRA (1997). "DECHIDR.BAS - Um Programa de Computador para Estimar a Recarga de Águas Subterrâneas a Partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento", in Seminário sobre Águas Subterrâneas. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 10 a 12 de Dezembro de 1997.

OLIVEIRA, J. T; PEREIRA E.; RAMALHO M. M.; ANTUNES M. T.; MONTEIRO J. H. (1992). 5ª edição da Carta Geológica de Portugal à escala 1:500 000, Serviços Geológicos de Portugal

OLIVEIRA, M.M. (2001). "A Estimativa da Recarga das Águas Subterrâneas a Partir da Decomposição de Hidrogramas de Escoamento Superficial – O Programa de Computador DECHIDR_VB.VBP", in Seminário sobre "A Hidroinformática em Portugal", Publicação em CD-ROM, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 15-16 Novembro, 2001.

OLIVEIRA, M.M. (2004a). Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação. Doutoramento em Geologia (Hidrogeologia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, 440 pp.

OLIVEIRA, M.M. (2004b). Estimativa da recarga de águas subterrâneas a partir da análise dos hidrogramas de escoamento superficial na área abrangida pela Folha 6 da Carta Hidrogeológica de Portugal à escala 1:200 000. Relatório 379/04 - NAS, Lisboa, LNEC, Dezembro de 2004, 123 pp.

OLIVEIRA, M.M.; MOINANTE, M.J.; LOBO FERREIRA, J.P. (1997a). Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC. Relatório Final. Lisboa, LNEC, Relatório 60/97-GIAS, 535 pp.

OLIVEIRA, M.M.; MOINANTE, M.J.; LOBO FERREIRA, J.P. (1997b). "Determinação da Recarga de Águas Subterrâneas a Partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento", in Seminário sobre Águas Subterrâneas, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 10 a 12 de Dezembro de 1997.

YOLANDA PEDROSA M. (1998). Folha 1 da Carta Hidrogeológica de Portugal na escala 1:200 000, Instituto Geológico e Mineiro