



## Hidrologia

### 6. Escoamento

- 6.1 Introdução
- 6.2 Mecanismos e formação do escoamento
  - 6.2.1 Escoamento em encosta
  - 6.2.2 Escoamento subsuperficial
  - 6.2.3 Escoamento subterrâneo
- 6.3 Fatores que influenciam o escoamento
- 6.4 Medição do escoamento
  - 6.4.1. Esquema geral
  - 6.4.2 Medição de alturas
  - 6.4.3 Medição de caudais
  - 6.4.4 Rede hidrométrica
  - 6.4.5 Medição do escoamento em Portugal
- 6.5 Análise do escoamento
  - 6.5.1 Escoamento anual
  - 6.5.2 Escoamento mensal
  - 6.5.3 Escoamento diário
- 6.6 Estudo do hidrograma
  - 6.6.1 Componentes do hidrograma
  - 6.6.2 Forma do hidrograma
  - 6.6.3 Separação das componentes do hidrograma

Secção de Engª Rural

- Volume de Escoamento,  $V_Q$ , de uma bacia hidrográfica: quantidade de água que atravessa uma *secção de um curso de água* num determinado intervalo de tempo (ano, mês, dia, etc).
- Unidades do escoamento:
  - *volume* ( $m^3$ ,  $hm^3$ ,  $km^3$ );
  - *altura de água* uniformemente distribuída sobre a área da bacia hidrográfica (mm)

Exemplo:  
 Área da bacia =  $50 \text{ km}^2$   
 Volume de escoamento =  $1\,100\,000 \text{ m}^3$



$$VQ = \frac{1\,100\,000}{50\,000\,000} = 22 \text{ mm}$$

### 6.1 INTRODUÇÃO



Secção de Engª Rural

- Caudal de escoamento,  $Q$ , de um curso de água: exprime a relação entre o volume de água,  $VQ$ , que passa numa **secção desse curso de água** e que resulta da contribuição de toda a bacia hidrográfica a montante, e o respetivo tempo de passagem.

- caudal específico,  $q_{esp}$ : relação entre o caudal na secção  $Q$  e a área da região de contribuição,  $A$

É um caudal por unidade de superfície, permitindo fazer comparações de caudais provenientes de áreas distintas

$$q_{esp} = \frac{Q}{A}$$

Exemplos de unidades:  
 $m^3 s^{-1} km^{-2}$ ,  $m^3 s^{-1} ha^{-1}$ ,  $L s^{-1} ha^{-1}$



Secção de Eng.ª Rural

- caudal médio de um curso de água,  $\bar{Q}$ : volume de escoamento médio que passa num intervalo de tempo, podendo definir-se:
  - Caudal médio diário (num dado dia);
  - Caudal médio mensal (num dado mês);
  - Caudal médio anual (num dado ano);
  - Caudal médio plurianual (num período de vários anos – geralmente utilizado com caudal de projeto)
- escoamento integral ou acumulado  $Q_{cum}$ : Quando se pretende mencionar o volume de escoamento relativo, não à unidade de tempo, mas sim a um período mais prolongado

$$Q_{cum} = R(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} Q(t) dt$$

Secção de Eng.ª Rural

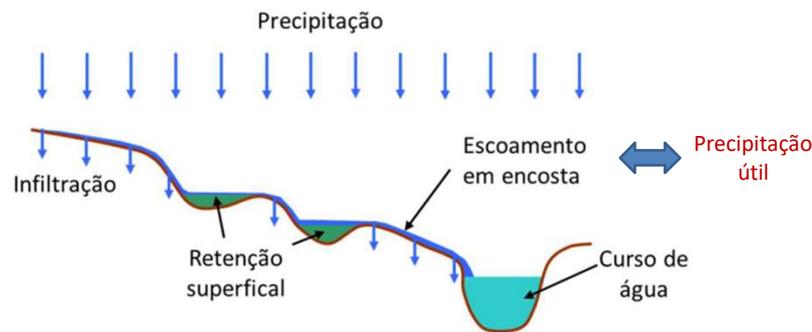
## 6.2. MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO ESCOAMENTO

### 6.2.1 escoamento em encosta (*overland flow*)

#### Escoamento Hortoniano

Escoamento correspondente à fração da precipitação que não se consegue infiltrar, por apresentar uma *intensidade superior à capacidade de infiltração do solo após o empoçamento e evaporação* (saturação à superfície do solo, de cima para baixo).

A esta fração chama-se **precipitação útil,  $P_u$** .



Secção de Eng.ª Rural

Quando se inicia uma precipitação, parte da água pode ser retida pela cobertura vegetal e por outros obstáculos que a impeçam de atingir o solo, voltando à atmosfera sob a forma de vapor. Chama-se a este fenómeno **intercepção**;

Se a precipitação se prolonga no tempo, a água atinge o solo e fica inicialmente retida nas depressões do terreno, iniciando-se a **infiltração**;

Durante este período inicial, o acréscimo de caudal no curso de água é produzido unicamente pela pequena fração da água precipitada diretamente na rede hidrográfica.

A partir do momento que a precipitação caída excede as capacidades relativas aos processos anteriormente descritos, o volume de água excedente, em obediência às leis da gravidade, escoam-se à superfície do terreno até à linha de água mais próxima, dando origem ao **escoamento superficial ou em encosta**.

As linhas de água de menor secção (sulcos, ravinas, regatos, ribeiros e ribeiras) associam-se noutras de secção sucessivamente maior (rios) - **rede hidrográfica**. Salvo raras exceções (bacias endorreicas), a rede comunica com o mar.

A **retenção superficial** refere-se a parcela de água que não se infiltra nem dá origem a escoamento superficial, isto é, à água intercetada, a água armazenada nas depressões do solo e a que passa ao estado de vapor durante a ocorrência da precipitação.

Secção de Eng.ª Rural

- O escoamento em encosta também se designa por escoamento superficial e escoamento direto;
- Resulta da precipitação útil, ou seja, da fração de precipitação que depois de satisfeitos os processos de evaporação, infiltração e retenção superficial na bacia, chega à rede hidrográfica;
- Ocorre em superfícies impermeáveis de zonas urbanas e em áreas naturais com solos delgados, como os das zonas áridas e semiáridas;
- Corresponde à componente mais significativa do escoamento nos períodos de precipitação intensa.

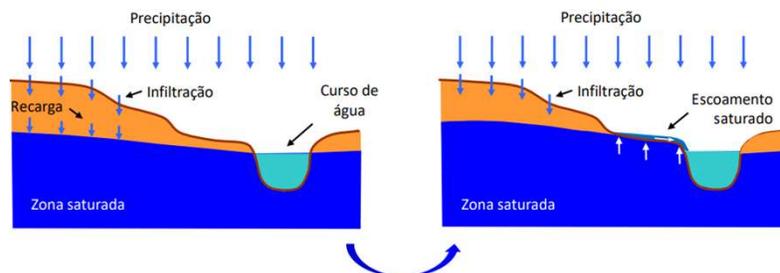
Secção de Eng.ª Rural

#### Escoamento saturado (de Hewlett)

É também um tipo de escoamento em encosta, correspondente à fração da precipitação que não se consegue infiltrar por o solo se encontrar saturado.

Ao contrário do escoamento Hortoniano, a saturação efetua-se de baixo para cima, devido à existência de escoamento sub-superficial ou/e à subida do nível freático.

- Como as velocidades de escoamento em meio poroso são reduzidas, nem toda a bacia contribui com escoamento saturado, desenvolvendo-se áreas variáveis de contribuição para o escoamento, que podem constituir cerca de 10% da área da bacia durante uma tempestade
- Este tipo de escoamento ocorre preferencialmente na base das encostas e em regiões húmidas e com vegetação densa.



### 6.2.2 Escoamento subsuperficial (*subsurface flow, interflow*)

Escoamento em meio poroso, saturado ou não, relativamente próximo da superfície do solo, que acaba por voltar à superfície (exfiltração) e a alimentar o curso de água. Também se designa por escoamento intermédio.

Escoamento essencialmente horizontal, que pode ter origem em:

- solo anisotrópico, com elevada condutividade hidráulica lateral, superior à condutividade vertical, dando origem a escoamento não saturado

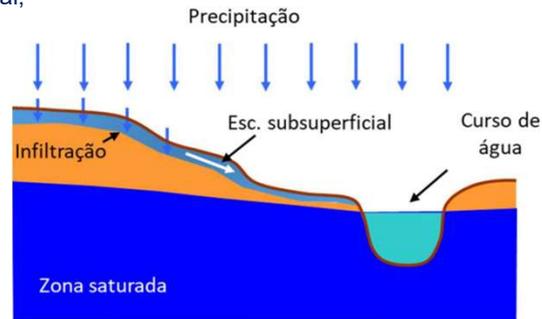


Figura 5 Formação do escoamento subsuperficial em solo anisotrópico

Este escoamento chega aos cursos de água apenas com um ligeiro atraso em relação ao escoamento direto e termina logo após a cessação deste.

Secção de Eng.ª Rural

- solo com estrato pouco permeável próximo da superfície, que dá origem à formação de uma toalha freática temporária e a escoamento saturado,

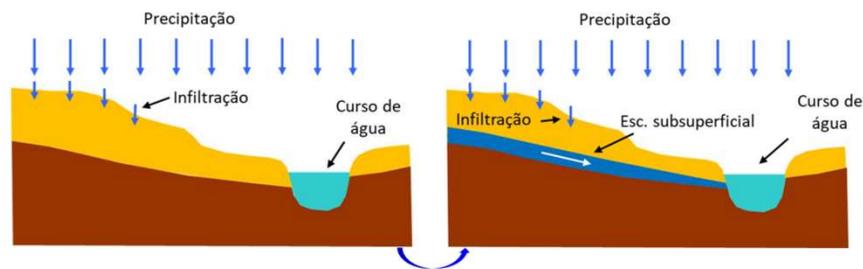


Figura 6 Formação do escoamento subsuperficial em solo com estrato pouco permeável à superfície

Secção de Eng.ª Rural

- solo com escoamento de superfície saturado (de Hewlett), em que a subida do aquífero freático conduz à exfiltração de escoamento não saturado;
- solo com uma fração elevada de macroporos (de origem vegetal ou animal), a que está associado uma elevada condutividade hidráulica. Consoante a orientação dos macroporos, a água que por eles circula pode constituir escoamento subsuperficial ou contribuir para uma rápida percolação. Note-se que em muitos destes a lei de Darcy deixa de ser válida

### 6.2.3 Escoamento subterrâneo

É originado pela água infiltrada que atingiu a zona de saturação. Também se designa por *escoamento de base*, resultante da infiltração profunda da precipitação e representa contribuição para o escoamento superficial das reservas hídricas subterrâneas acumuladas nas formações geológicas por onde passa o curso de água.

É uma componente com pouca importância nas alturas de elevadas precipitações, mas representa a quase totalidade do escoamento quando as outras componentes se esgotam.

### Destinos da água precipitada (Linsley et al., 1982) Componentes do escoamento

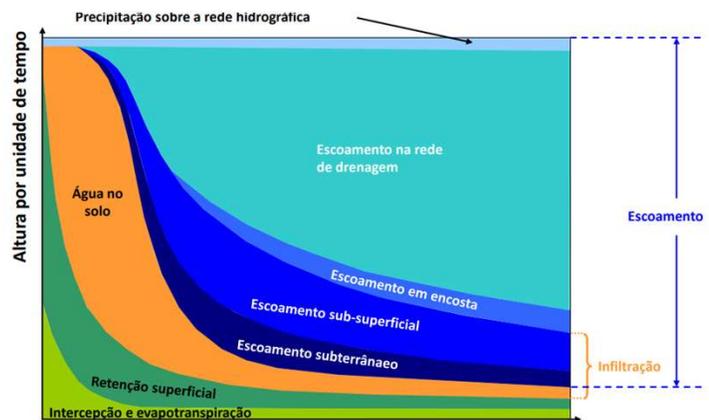
Quando é que cada um é mais importante?

- Superficial, em encosta ou direto;
- Sub-superficial;
- Subterrâneo ou de base;
- Resultante da precipitação sobre a rede hidrográfica.

Secção de Eng.ª Rural

- No período inicial da precipitação, o aumento do caudal no rio provém unicamente da água precipitada diretamente sobre a rede hidrográfica.  
A intensidade da interceção, muito forte no período inicial, decresce rapidamente até atingir um valor constante, correspondente à substituição da parcela da água intercetada que vai sendo removida por evaporação.
- A intensidade com que a água precipitada preenche o armazenamento nas depressões do solo reduz-se rapidamente, passando a ser constante e igual à evapotranspiração que ocorre durante a chuva.
- A intensidade da infiltração vai diminuindo progressivamente à medida que aumenta o teor da água do solo. A água infiltrada fica retida como humidade do solo ou vai participar nos escoamentos, hipodérmico e subterrâneo.

- A área a tracejado representa o escoamento que em consequência da precipitação passa na secção considerada do rio (uma parte, já depois de terminada a precipitação e que se compõe da água diretamente precipitada na rede hidrográfica e dos escoamentos superficial, hipodérmico e subterrâneo.



Secção de Eng.ª Rural

## 6.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O ESCOAMENTO

### 6.3.1 Fatores climáticos

**Relativos à precipitação:** forma, intensidade, duração e distribuição, no tempo e no espaço, da precipitação.

- Uma precipitação na forma líquida pode dar origem imediata ao escoamento no curso de água, enquanto, que a precipitação sob a forma de neve poderá produzi-lo com grande desfasamento no tempo;
- Conforme a intensidade da precipitação exceder ou não a capacidade de infiltração (depois de satisfeita a capacidade de interceção), haverá ou não escoamento superficial);
- O aumento da duração da precipitação tem como efeito diminuir gradualmente a capacidade de infiltração (pelo acréscimo do teor de água no solo) e consequentemente aumentar o escoamento;
- A distribuição da precipitação no tempo (época de ocorrência e intervalo entre fenómenos de precipitação) condiciona o teor de água do solo ao iniciar-se uma precipitação e a disponibilidade de água para a evaporação e transpiração.

Secção de Eng.ª Rural

### 6.3.2 Fatores fisiográficos

**Características Geométricas:** a área e forma da bacia têm grande influência na formação das cheias e, portanto, nos valores específicos (por unidade de área) do caudal de ponta de cheia e pequena influência no valor do escoamento anual, expresso em altura de água uniforme sobre a bacia

**Características do sistema de drenagem:** a densidade de drenagem exerce influência na forma das cheias e no escoamento anual, por dela depender o percurso superficial sobre o terreno e, portanto, a maior ou menor oportunidade para a infiltração e evapotranspiração.

**Características de relevo:** o relevo influencia a infiltração e, portanto, o escoamento superficial, o teor de água no solo e com este a evapotranspiração e a alimentação das reservas subterrâneas. Por outro lado, a orientação da bacia tem influência na exposição aos ventos e à radiação solar condicionando a evapotranspiração.

Secção de Eng.ª Rural

**Características físicas:** solo, vegetação e geologia.

Do tipo de solo, depende a capacidade de infiltração, que é função da dimensão e distribuição dos poros do solo e da sua estabilidade.

A vegetação tem como efeito intercetar parte da água precipitada, retardar o escoamento superficial, dando-lhe mais tempo para se infiltrar, e proteger o solo da erosão hídrica. As raízes tornam o solo permeável à infiltração da água. As condições geológicas influenciam a estrutura do solo, a possibilidade de infiltração de água no solo e a constituição das reservas subterrâneas que alimentam os cursos de água nos períodos sem precipitação.

Tem interesse examinar com mais pormenor a influência que o uso do solo exerce no ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica, traduzido pela ocupação por floresta, cultivo ou urbanização.

O principal efeito das florestas traduz-se no destino que imprimem à água precipitada, assim, temos:

- num solo sob floresta, é maior a infiltração da água do que para outra forma de ocupação;
- em comparação com vegetação de menor porte, a floresta oferece maior área para a interceção;
- quando os solos são profundos, a floresta tem uma zona de evaporação mais espessa, na qual a água pode ser armazenada e devolvida à atmosfera por transpiração;
- nas zonas com precipitação abundante e bem distribuída, a evapotranspiração total anual é maior nas florestas e dentro destas é maior nas florestas de folha permanente do que nas de folha caduca. Nas zonas em que a precipitação é escassa e os solos delgados, tanto as florestas como as outras culturas levam o teor de água no solo até ao coeficiente de emurchecimento e portanto, não há diferença significativa na evapotranspiração total anual.

Por tudo isto, as florestas, tem um importante papel como regularizadoras do caudal nos rios, reduzindo por um lado as pontas de cheia e contribuindo, por outro lado, para a recarga dos aquíferos que irão manter o caudal nos rios nas épocas sem precipitação.

## 6.4 MEDIÇÃO DO ESCOAMENTO

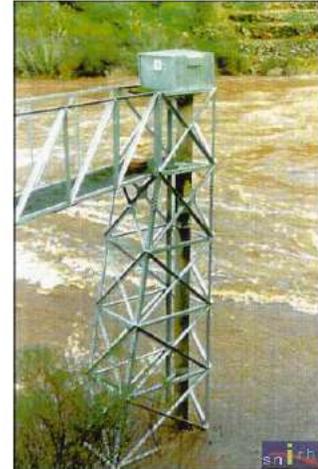
## 6.4.1 Esquema geral

A hidrometria estuda os instrumentos e técnicas de medição das várias grandezas que intervêm nos fenómenos hidráulicos e hidrológicos.

As principais variáveis que caracterizam o escoamento numa secção transversal são:

- a altura da superfície livre de água  $h$  (m),
- A quantidade de água que passa na secção transversal do curso de água por unidade de tempo – caudal  $q$  ( $m^3/s$ ).

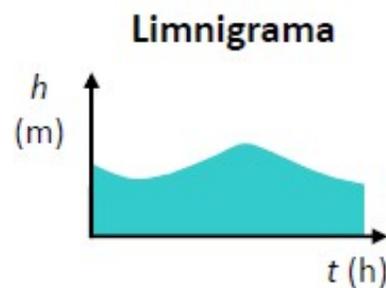
As secções transversais da rede fluvial onde são adquiridos dados para a determinação da altura da água e do caudal chamam-se **Estações Hidrométricas**



Secção de Eng.ª Rural

## 6.4.2 Medição de alturas

- As alturas de água são de mais fácil medição que os caudais;
- A sua evolução temporal  $h(t)$  designa-se de *limnigrama*.



Secção de Eng.ª Rural

Os aparelhos mais utilizados para a medição da altura de água na secção transversal de um curso de água são:

- escalas hidrométricas (ou limnimétricas) que recorrem ao limnímetro,
- limnógrafo de flutuador (mais comum),
- limnógrafo de pressão.



Figura 8 Escala limnimétrica

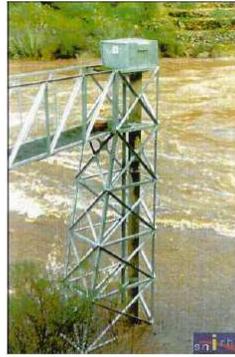


Figura 9 Estação hidrométrica com limnógrafo de flutuador

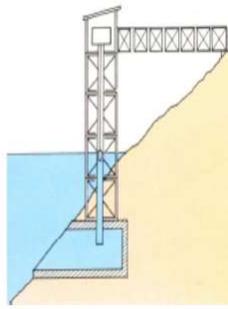
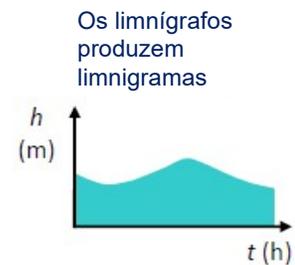
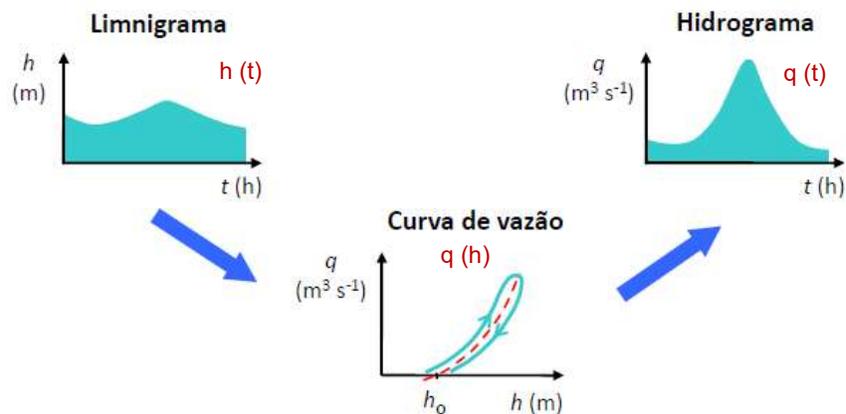


Figura 10 Esquema de estação hidrométrica com limnógrafo de flutuador



Secção de Eng.ª Rural

Para se obter o hidrograma  $q(t)$  é normalmente necessário recorrer a uma curva de vazão  $q(h)$



Secção de Eng.ª Rural

### 6.4.3 Medição de caudais

Existem diversos métodos para a medição de caudais, sendo os mais comuns:

- método da **medição volumétrica direta**
- método da **área da secção – velocidade média**
- método **estrutural**
- método **químico**

Uma análise detalhada destes métodos pode ser consultada em Mosley e McKerchar (1993), Boiten (2003) ou WMO (2008).

#### Método da medição volumétrica directa

- Consiste em receber toda a corrente num recipiente aferido, durante um certo tempo, e em obter o caudal médio dividindo por esse tempo o volume escoado (Mendonça, 1975).
- Método rigoroso, mas pouco prático para caudais elevados;
- Emprega-se sobretudo em laboratório, na **calibração** de outros instrumentos de medição de caudais, em especial orifícios e descarregadores;
- Em cursos de água naturais só tem interesse na medição de **caudais baixos**, inferiores a  $10 \text{ L s}^{-1}$ .

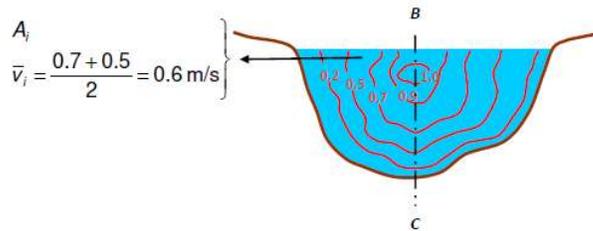
**Método da área da secção – velocidade média**

É o método mais utilizado na medição de caudais em cursos de água em Portugal: conhecida a **área da secção transversal** de um curso de água  $A$  (m) e a **velocidade média** através dessa secção  $\bar{v}$  (m/s), o valor do caudal é:

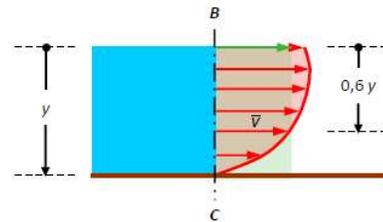
$$Q = \bar{v} A$$

De um modo geral, consegue-se maior rigor na medição dividindo a secção em  $i$  partes com área  $A_i$ , e velocidade média  $\bar{v}_i$ , calculando o caudal  $q_i$  em cada uma delas, e somando estes:

$$q = \sum q_i = \sum \bar{v}_i A_i$$

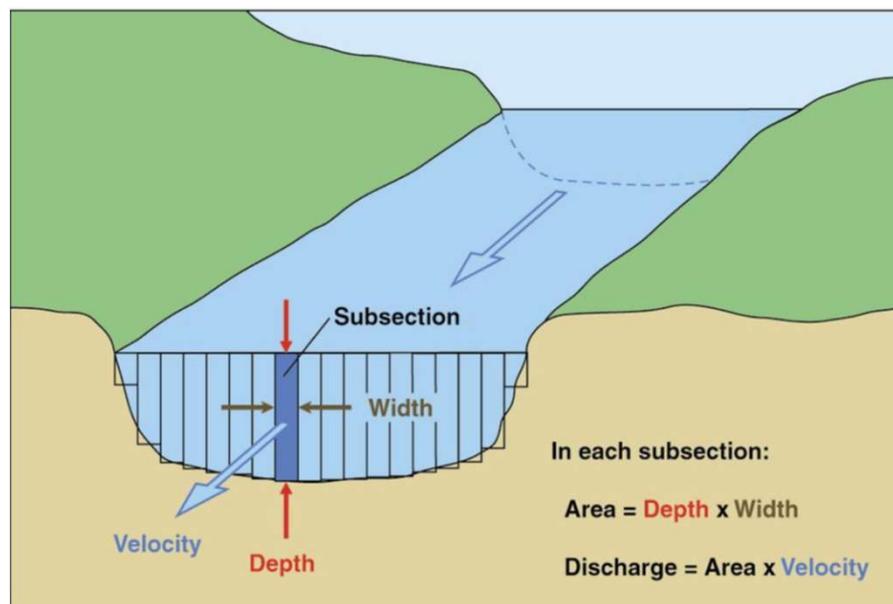


**Figura 11** Corte transversal de um curso de água e representação das isotáquias (m/s)



**Figura 12** Corte longitudinal de um curso de água e representação dos vectores velocidade do escoamento

Secção de Eng.ª Rural



Secção de Eng.ª Rural

### Medição da velocidade

Existem diversos métodos para a medição da velocidade da água, uns de utilização mais generalizada, outros de utilização mais restrita por serem dispendiosos ou por serem ainda de carácter experimental.

O método correntemente mais utilizado consiste na utilização de **molinetes**, constituídos por uma turbina de câmara livre, com um contador de rotações (Mendonça, 1975).

A correspondência entre a rotação do molinete e a **velocidade instantânea** da corrente tem de ser obtida laboratorialmente - calibração



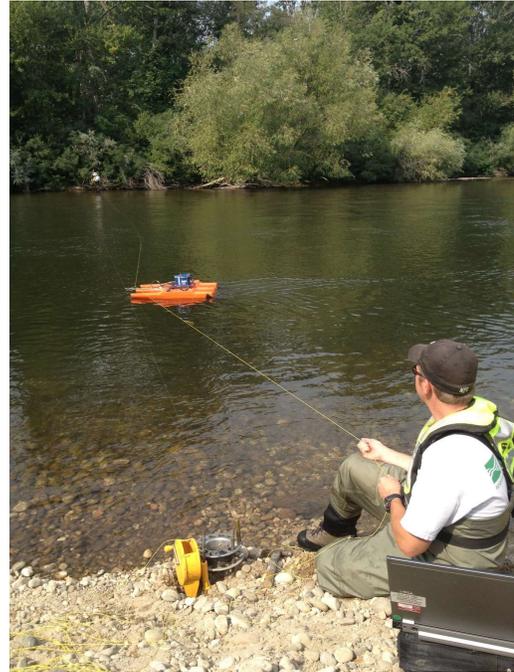
Secção de Eng.ª Rural

### Medição da altura e da velocidade do escoamento numa secção transversal de um curso de água



### Acoustic Doppler Current Profiler

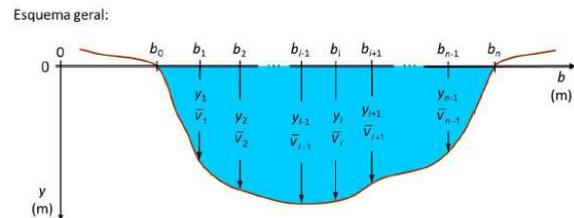
- O ADCP utiliza o efeito Doppler para determinar a velocidade da água; Envia uma onda sonora e mede a alteração da sua frequência que posteriormente é transformada em velocidade;
- Em alternativa, o ADCP pode medir o tempo que demora a onda demora a atingir o fundo e a voltar para cima e ser lida no aparelho.



Secção de Eng.ª Rural

### Aplicação do método

Numa dada vertical, a velocidade média pode ser estimada a partir de uma a seis medições a diferentes profundidades, consoante a profundidade do curso de água e a existência de vegetação aquática (WMO,2008).

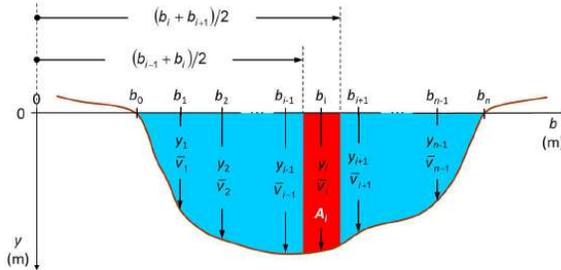


**Figura 14** Medições para aplicação do método área da secção-velocidade média

Secção de Eng.ª Rural

Os valores medidos podem ser utilizados de diferentes formas, sendo uma das mais utilizadas a designada de **método do meio da secção**:

➔ Considera cada área  $A_i$  centrada nas verticais onde se efectuaram as medições, tendo como largura um segmento medido entre os pontos médios dos segmentos contíguos:



Neste caso:

$$q = \sum_{i=1}^{n-1} \bar{v}_i y_i \underbrace{\left( \frac{b_{i+1} + b_i}{2} - \frac{b_i + b_{i-1}}{2} \right)}_{A_i}$$

$$= \sum_{i=1}^{n-1} \bar{v}_i y_i \underbrace{\left( \frac{b_{i+1} - b_{i-1}}{2} \right)}_{A_i}$$

Figura 15 Método do meio da secção

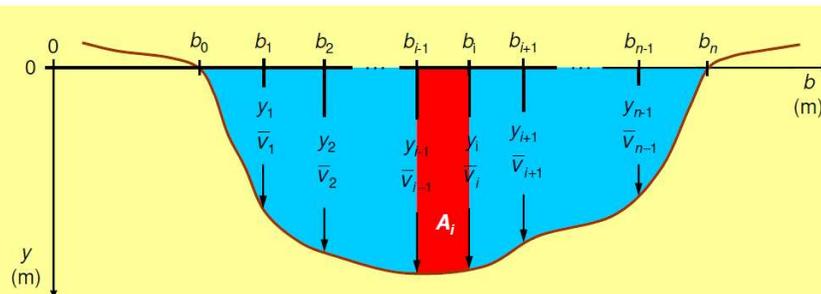
Como se despreza o escoamento próximo das margens é necessário que  $b_1$  e  $b_{n-1}$  estejam próximos destas.

Secção de Eng.ª Rural

Outro método muito usado é o:

#### Método da secção média

Considera-se cada área  $A_i$  delimitada pelas verticais onde se efectuaram as medições, admitindo-se que a profundidade média e velocidade média de cada secção são bem estimadas pela média aritmética dos valores da fronteira:



Neste caso: 
$$q = \sum_{i=1}^n \underbrace{\left( \frac{\bar{v}_{i-1} + \bar{v}_i}{2} \right)}_{\bar{v}_{A_i}} \underbrace{\left( \frac{y_{i-1} + y_i}{2} \right)}_{\bar{y}_{A_i}} \underbrace{(b_i - b_{i-1})}_{A_i}$$

Secção de Eng.ª Rural

**Exercício 25.** Numa secção de um curso de água obtiveram-se os resultados apresentados nas colunas 1 a 4 do Quadro, durante a medição do respetivo caudal.

a) Represente a secção transversal;

b) Calcule o caudal que escoou na secção, usando o método do meio da secção.

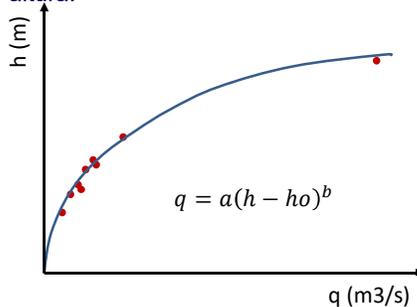
(20.6 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)

Vertical	Distância à Origem <i>b</i> (m)	Profundidade <i>y</i> (m)	Velocidade Média ?? (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
0	4	0.000	0.000
1	9	1.131	0.330
2	12	1.740	0.357
3	15	1.993	0.358
4	18	2.057	0.353
5	21	2.057	0.340
6	24	1.905	0.346
7	27	1.753	0.341
8	30	1.753	0.314
9	33	1.600	0.322
10	36	1.295	0.318
11	39	1.436	0.247
12	42	1.308	0.181
13	45	1.640	0.104
14	48	1.512	0.066
15	52	0.000	0.000

Secção de Eng.ª Rural

**Método da Curva de vazão** – relação biunívoca entre o caudal escoado numa secção e a correspondente altura de água

Com o método anterior obtém-se um valor de caudal  $q$  representativo de toda a secção transversal do curso de água. Com uma escala limnimétrica, ou um limnígrafo, colocados junto de uma das margens, obtém-se uma altura de água, isto é, obtém-se **um único ponto** da relação pretendida, apenas para um caudal e uma altura.



- A campanha de medições tem de ser repetida regularmente, de modo a se obterem mais pontos;
- As medições devem ser efetuadas no **estio e em cheia**, para que exista um amplitude de valores observados tão grande quanto possível.

onde  $q$  é o caudal,  $h$  a altura hidrométrica medida no limnígrafo junto à margem,  $h_0$  a altura do zero da escala hidrométrica em relação ao nível de água a que corresponde o caudal nulo, que em geral é a cota mais baixa da secção, isto é o fundo do leito ( $h_0$  é positiva se o zero da escala ficar acima do nível do caudal nulo e é negativa no caso contrário - geralmente, o zero da escala e a cota mais baixa da secção não coincidem, encontrando-se ora o zero da escala enterrada no leito, ora suspensa na margem, respetivamente, por fenómenos de sedimentação ou erosão),  $a$  e  $b$  são parâmetros característicos da secção, a determinar experimentalmente

Secção de Eng.ª Rural

Em cursos de água naturais, após uma cheia importante, o **processo erosivo** pode alterar suficientemente a forma da secção transversal do curso de água para que seja necessário recalcular uma nova curva de vazão

Secção de Eng.ª Rural

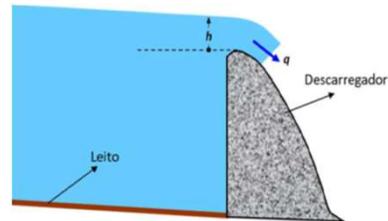
### **Método estrutural**

Consiste na utilização de estruturas hidráulicas fixas para a medição dos caudais, nomeadamente orifícios ou descarregadores, de soleira delgada ou espessa, cuja **curva de vazão é conhecida**.

Para os descarregadores, esta é dada por:

$$Q = \mu L \sqrt{2g} h^{3/2}$$

em que  $\mu$  é um coeficiente de vazão (tabelado),  $L$  é o comprimento do descarregador,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $h$  é a altura de água acima da soleira do descarregador.



Curso de água com descarregador (esq.) e com descarregador e estação hidrométrica (dir.)

Secção de Eng.ª Rural

**Exercício 26**

No quadro apresenta-se um conjunto de medições de caudal e de alturas de água na secção transversal da ribeira de Alenquer, em Ponte do Barnabé. Obtenha os parâmetros da curva de vazão com recurso ao “solver” do Excel com o objetivo da minimização do erro entre os valores de caudal estimados pela curva e os valores observados curva de vazão para aquela secção, considerando que aquela se pode representar analiticamente como:

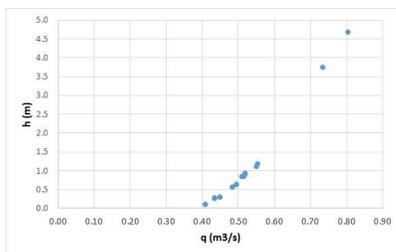
$$q = a (h - h_o)^b$$

Apresente os passos efetuados e o(s) gráfico(s) utilizado(s), e represente graficamente a curva obtida, assim como os pontos utilizados na calibração

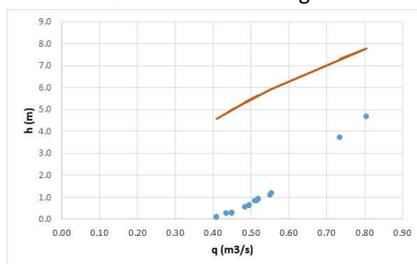
<i>h</i> (m)	<i>q</i> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
0.410	0.092
0.410	0.098
0.520	0.922
0.520	0.893
0.485	0.563
0.485	0.564
0.510	0.839
0.515	0.842
0.495	0.628
0.495	0.635
0.435	0.261
0.435	0.267
0.450	0.284
0.450	0.288
0.555	1.176
0.550	1.109
0.805	4.68
0.735	3.743

Secção de Engª Rural

Gráfico com os dados observados



Curva de vazão inicial com grande erro



Valores iniciais para os parâmetros da curva e resultado inicial

a	10.00
b	0.50
yo	0.20

<i>y</i> (m)	<i>q</i> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	q estimado (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	(qe-q) <sup>2</sup>
0.410	0.092	4.583	20.165
0.410	0.098	4.583	20.111
0.520	0.922	5.657	22.419
0.520	0.893	5.657	22.694
0.485	0.563	5.339	22.806
0.485	0.564	5.339	22.796
0.510	0.839	5.568	22.361
0.515	0.842	5.612	22.758
0.495	0.628	5.431	23.073
0.495	0.635	5.431	23.005
0.435	0.261	4.848	21.038
0.435	0.267	4.848	20.983
0.450	0.284	5.000	22.241
0.450	0.288	5.000	22.203
0.555	1.176	5.958	22.869
0.550	1.109	5.916	23.108
0.805	4.68	7.778	9.599
0.735	3.743	7.314	12.755
			<b>376.9831</b>

Vamos usar o solver para minimizar este valor

Secção de Engª Rural

a	10.00
b	0.50
yo	0.20

y (m)	q (m³/s)	q estimado (m³/s)	(qe-q)²
0.410	0.092	4.583	20.165
0.410	0.098	4.583	20.111
0.520	0.922	5.657	22.419
0.520	0.893	5.657	22.594
0.485	0.563	5.339	22.806
0.485	0.564	5.339	22.796
0.510	0.839	5.568	22.361
0.515	0.842	5.612	22.758
0.495	0.628	5.431	23.073
0.495	0.635	5.431	23.005
0.435	0.261	4.848	21.038
0.435	0.267	4.848	20.983
0.450	0.284	5.000	22.241
0.450	0.288	5.000	22.203
0.555	1.176	5.958	22.869
0.550	1.109	5.916	23.108
0.805	4.68	7.778	9.599
0.735	3.743	7.314	12.755
			376.9831

Secção de Eng<sup>a</sup> Rural

Parâmetros da curva de vazão calibrados

a	17.45
b	1.53
yo	0.38

y (m)	q (m³/s)	q estimado (m³/s)	(qe-q)²
0.410	0.092	0.089	0.000
0.410	0.098	0.089	0.000
0.520	0.922	0.882	0.002
0.520	0.893	0.882	0.000
0.485	0.563	0.572	0.000
0.485	0.564	0.572	0.000
0.510	0.839	0.789	0.003
0.515	0.842	0.835	0.000
0.495	0.628	0.656	0.001
0.495	0.635	0.656	0.000
0.435	0.261	0.217	0.002
0.435	0.267	0.217	0.002
0.450	0.284	0.311	0.001
0.450	0.288	0.311	0.001
0.555	1.176	1.236	0.004
0.550	1.109	1.183	0.006
0.805	4.68	4.754	0.005
0.735	3.743	3.616	0.016
			0.0422

Erro minimizado

Curva de vazão:  $q = 17.45 (h - 0.38)^{1.53}$

Secção de Eng<sup>a</sup> Rural

#### 6.4.4 Rede hidrométrica

**Estação hidrométrica:** uma secção de um curso de água onde se efetua um registo periódico de níveis, e onde se definiu uma curva de vazão para conversão dos respetivos valores em caudais.

As estações hidrométricas podem ser **limnímetricas**, quando providas unicamente de uma escala hidrométrica para leitura periódica de níveis, e **limnigráficas**, quando providas de um limnígrafo para registo contínuo de níveis.

A medição das alturas de de água faz-se, sobretudo, recorrendo a **limnigrafos** (registo analógico ou digital).



O hidrograma é obtido a partir da **curva de vazão**:

- conhecida quando se utilizam descarregadores;
- estimada quando a secção do curso de água é natural (através do método da área da secção – velocidade média).

O conjunto de estações hidrométricas de uma região ou país constitui a respetiva **rede hidrométrica**

Secção de Eng.ª Rural

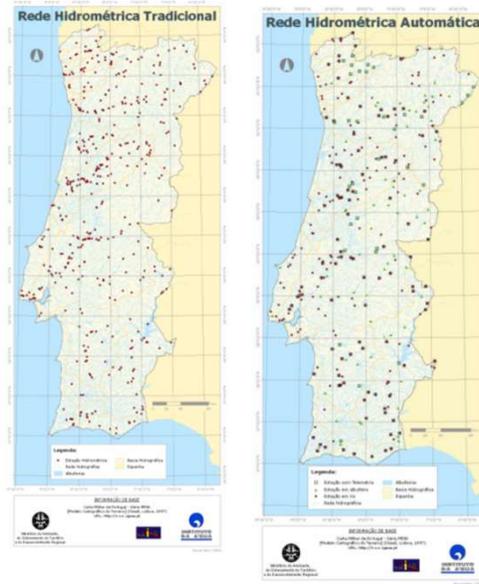
As finalidades gerais das observações efetuadas numa rede hidrométrica são:

- **Obtenção de dados para planeamento** e projeto de obras hidráulicas e modelização de uma bacia hidrográfica. Para este propósito é fundamental a existência de sucessões históricas de observações hidrométricas, isto é, de registos de medições efetuadas ao longo de um certo período de tempo. Uma sucessão de dados hidrométricos, para ser realmente boa, necessita de ter pelo menos 20 anos de observações, ou ainda mais, quando se tratar de bacias de regime muito irregular.
- **Obtenção de dados operacionais** (gestão em tempo real de um sistema fluvial). Estes dados destinam-se a permitir a tomada de decisões em períodos de tempo muito curtos, nomeadamente em situações de alarme ou emergência, pelo que é tao importante a rapidez na sua transmissão como a qualidade da sua medição. A obtenção destes dados encontra-se associada ao desenvolvimento dos modernos sistemas de telemetria, que compreendem, além das estações hidrométricas, um sistema de comunicações automático das informações nelas obtidas, via rádio ou telefone, para uma central de comando

Secção de Eng.ª Rural

### 6.4.5 Medição do escoamento em Portugal

O organismo responsável pelas medições e sua publicação é o **Instituto da Água (INAG)**, atualmente integrado na Agência Portuguesa do Ambiente (APA).



Secção de Engª Rural

<https://snirh.apambiente.pt/>

Menu - Dados de Base - Monitorização

Filtros Activos: Redes e Bacias Hidrográficas

Redes | Bacias Hidrográficas | Águas Subterrâneas | Personalizar | Pesquisa Avançada | Dados de Base

Redes de Monitorização seleccionadas (# estações)

■ Hidrométrica (177)

Estações da Rede Seleccionada

- PONTE MEMMOA (124/014)
- PONTE MIRAFLORES (218/064)
- PONTE NIJUE (196/034)
- PONTE NIJUECA (144/024)
- PONTE NOVA (177/024)
- PONTE OTA (190/044)
- PONTE PANASCO (171/014)

Seleccionar Estações

Estações Seleccionadas para Análise

- PONTE OTA (190/044)

Limpar Lista | Limpar Sel. | VALIDAR Lista

Ao alterar as estações seleccionadas click VALIDAR Lista para identificar as estações no mapa/listar parâmetros.

Parâmetros com Dados

- Caudal instantâneo máximo anual
- Caudal médio diário
- Escoamento mensal
- Nível hidrométrico Instantâneo
- Nível instantâneo máximo anual
- Nível médio diário

Período de Análise (dia/mês/ano)

De: 14/07/1994 | A: 27/06/2022

Ano Hidrológico | Semestre | Este Mês

Informação Disponível

Características das Estações | Parâmetros

Selecione estações e parâmetros até um máximo de 50 conjuntos. | Ver/Guardar Dados

Selecione um parâmetro e uma estação. | Relatório

Secção de Engª Rural

## 6.5 ANÁLISE DO ESCOAMENTO

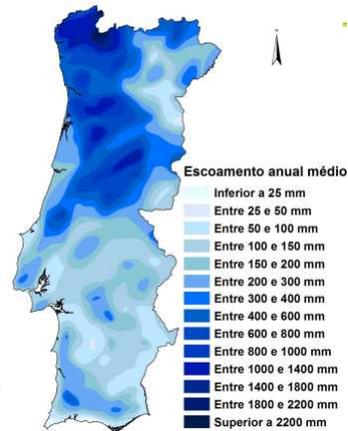
### 6.5.1 escoamento anual

A **distribuição espacial** pode ser caracterizada através de:

- classes de escoamento
- isolinhas de escoamento.

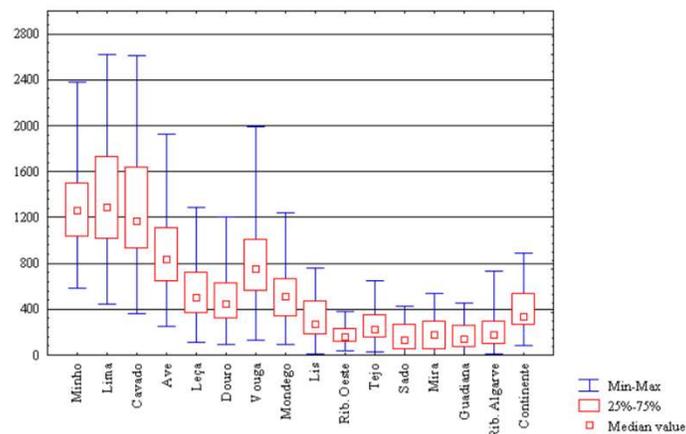
isolinhas do escoamento - lugares geométricos dos pontos que, por unidade de área em planta, contribuem para a rede hidrográfica com igual quantidade de água.

Esta quantidade de água pode atingir a rede hidrográfica por várias vias: escoamento superficial ou direto, hipodérmico ou subsuperficial, ou subterrâneo.

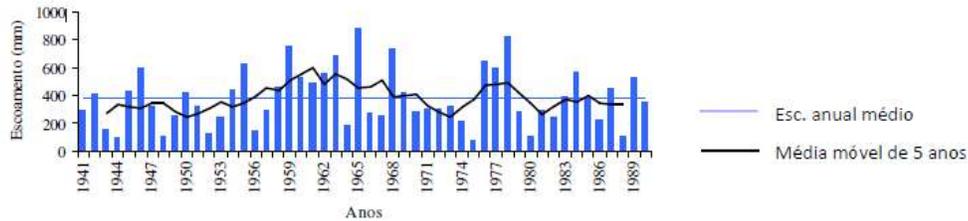


Secção de Eng.ª Rural

### Magnitude e variabilidade



Secção de Eng.ª Rural

**Distribuição temporal do escoamento anual**

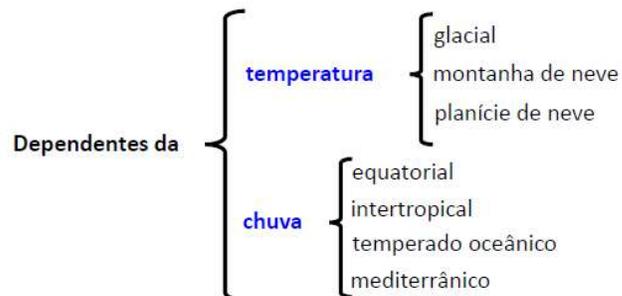
**Figura 21** Série de escoamento anual médio em Portugal Continental no período 1941/1942 a 1990/1991 (INAG, 2001)

Secção de Engª Rural

**6.5.2. Escoamento mensal**

Representa-se de forma idêntica à dos escoamentos anuais.

- permite a *caracterização geral do regime fluvial*,
- é útil, em ante-projecto, na estimativa da **capacidade útil de uma albufeira**.

**Regimes fluviais** (Shaw, 1983)

Secção de Engª Rural

### Dependentes da temperatura

Cursos de água em que a fonte dominante de abastecimento de água, inicialmente no estado **sólido** (neve ou gelo), produz um **único máximo e mínimo** no padrão de escoamentos mensais, de acordo com as temperaturas sazonais:

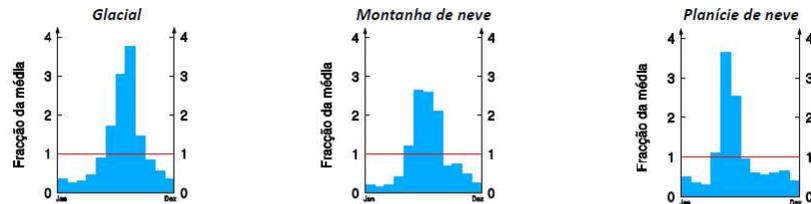


Figura 22 Hidrogramas de escoamentos médios mensais para regimes dependentes da temperatura (Shaw, 1983)

### Dependentes da precipitação

Cursos de água em que o escoamento é causado diretamente pela **variação sazonal da precipitação**. O efeito da temperatura está relacionado com as perdas por evapotranspiração.

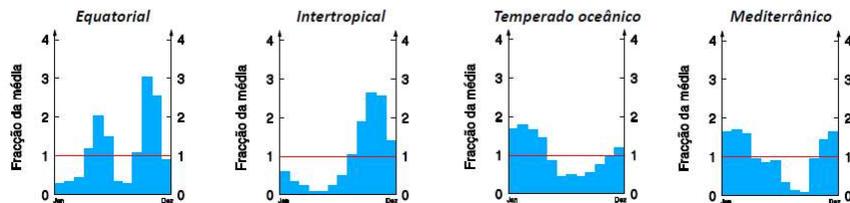


Figura 23 Hidrogramas de escoamentos médios mensais para regimes dependentes da precipitação (Shaw, 1983)

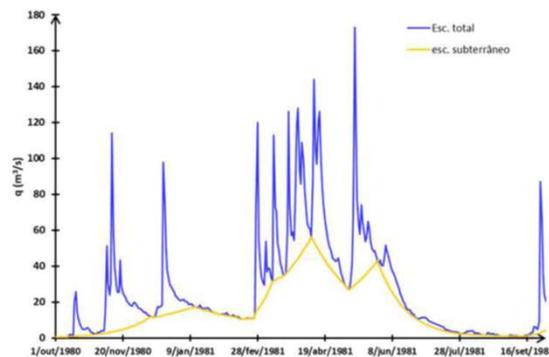
Secção de Eng.ª Rural

### 6.5.3 Escoamento diário

A análise do hidrograma de escoamento diário permite uma caracterização mais detalhada do **regime hidrológico de uma bacia**.

Hidrograma relativo ao rio Tâmega (bacia do Douro) típico de um curso de água **perene**, em que é visível uma flutuação gradual relativa ao escoamento **subterrâneo** e uma mais rápida, relativa ao escoamento **superficial**.

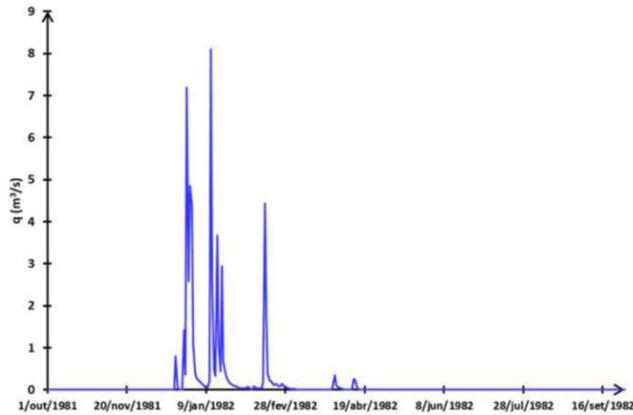
Hidrograma típico de bacia hidrográfica com infiltração significativa, dando origem a recarga que vai alimentar o(s) aquífero(s), situada em clima húmido.



Secção de Eng.ª Rural

Hidrograma relativo ao rio Terges (bacia do Guadiana), típico de um curso de água **efêmero**, constituído essencialmente por escoamento **superficial**.

Hidrograma típico de bacia hidrográfica com infiltração pouco significativa, situada em clima árido a semi-árido.

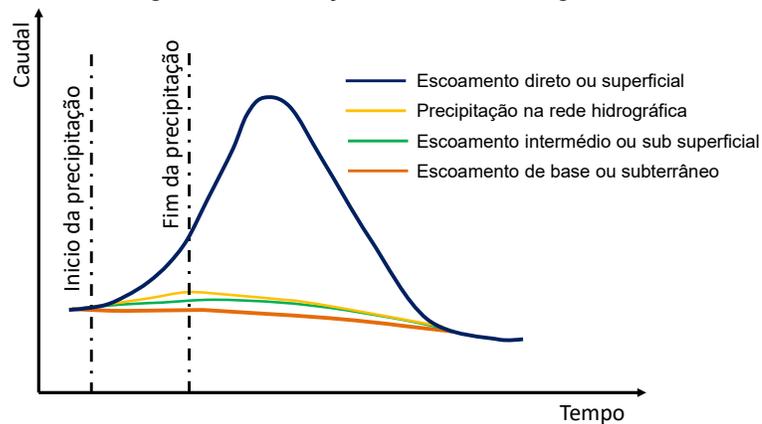


Secção de Eng.ª Rural

## 6.6 ESTUDO DO HIDROGRAMA

### 6.6.1 Componentes do hidrograma

Hidrograma numa secção de um curso de água



Secção de Eng.ª Rural

## 6.6.2 Forma do hidrograma

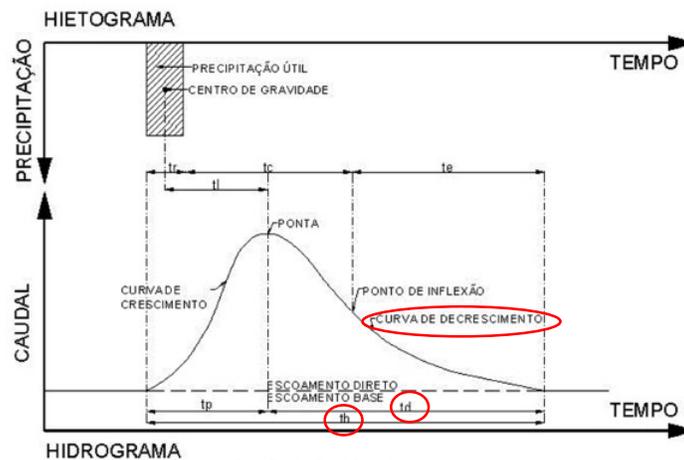
- a **curva de crescimento**, correspondente ao aumento de caudal motivada pelo incremento do escoamento, e que ocorre durante o **tempo de crescimento** ou **tempo para a ponta**,  $t_p$ ;
- a **ponta do hidrograma**, que é o respetivo valor máximo;



Secção de Eng.ª Rural

## continuação

- a **curva de decrescimento**, correspondente à diminuição progressiva do escoamento direto, e que ocorre durante o **tempo de decrescimento**,  $t_d$ . A soma dos tempos de crescimento e decrescimento, ou esgotamento, corresponde ao **tempo de base do hidrograma**,  $t_b$ ;
- a **curva de esgotamento**, já referida, correspondente ao decréscimo exponencial do escoamento de base, depois de terem cessado as contribuições das restantes componentes;

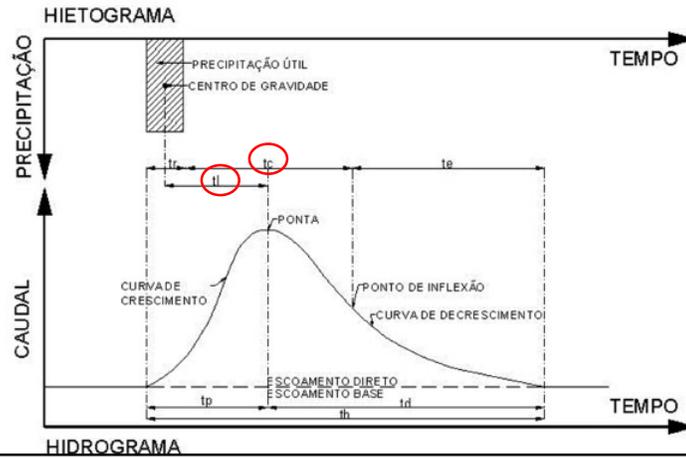


Secção de Eng.ª Rural

continuação

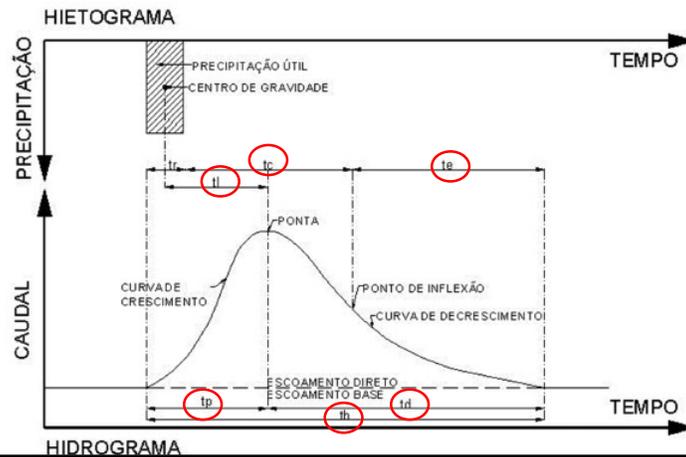
- **tempo de resposta da bacia**,  $t_l$ , o intervalo de tempo definido pelos instantes correspondentes ao centro de gravidade da precipitação útil e à ponta do hidrograma;
- **tempo de concentração** de uma bacia,  $t_c$ , é o tempo necessário para que toda a sua área contribua para o escoamento superficial na secção de saída;

Ou, é o tempo necessário para que uma gota de água caída no ponto hidráulicamente mais afastado da bacia chegue à secção de saída.



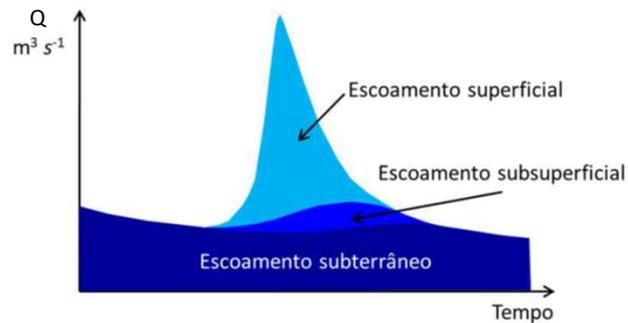
continuação

**tempo de esvaziamento** da rede hidrográfica,  $t_e$ , entre a ocorrência do ponto de inflexão na curva de decréscimo, e a cessação do escoamento direto; corresponde à passagem na secção do volume de água armazenado na rede durante a chuvada.



$$\begin{aligned} &\text{tempo de base do hidrograma, } t_b \\ &= \\ &\text{tempos de crescimento + tempo de decrescimento} \\ &= \\ &t_r + t_c + t_e \end{aligned}$$

Secção de Eng.ª Rural



Em *bacias experimentais*, é possível medir muitos destes componentes:

- efetuando medições distribuídas espacialmente pela bacia,
- recorrendo a uma caracterização detalhada do escoamento subterrâneo,
- recorrendo à análise de traçadores naturais ou de traçadores químicos

No entanto, em *termos operacionais* estes componentes não costumam ser medidos numa bacia hidrográfica, sendo apenas medido o **hidrograma relativo ao escoamento total** (a soma dos vários componentes) na secção de jusante desta.

Secção de Eng.ª Rural

### Temos então que separar as componentes

A separação das componentes de um hidrograma pode fazer-se:

- numa perspetiva de análise das **águas subterrâneas**, mais ligada à **análise da curva de exaurimento** e de **hidrogramas relativos a um ou mais anos hidrológicos**, ou
- numa perspetiva do estudo das relações **precipitação-escoamento**, em que se pode analisar um único acontecimento.

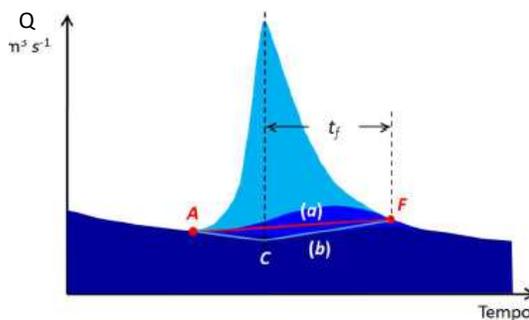
Em qualquer dos casos, recorre-se a métodos de **base física** ou a métodos **empíricos**

Em muitos casos, é-nos suficiente identificar a componente do escoamento com resposta rápida a uma chuvada (**escoamento direto**) e a componente mais lenta associada ao(s) escoamento(s) proveniente(s) de diferentes fontes de armazenamento ao longo da bacia (**escoamento de base**).

Esta é uma separação efetuada com algum pragmatismo, deixando os escoamentos de ter uma caracterização física detalhada. O **escoamento direto será fundamentalmente constituído por escoamento superficial e, eventualmente, pela fração mais rápida do escoamento subsuperficial**, e o **escoamento de base será fundamentalmente constituído por escoamento subterrâneo e, eventualmente, pela fração mais lenta do escoamento subsuperficial**.

Secção de Eng.ª Rural

### 6.6.3. Separação das componentes do hidrograma para um acontecimento



Há dois pontos do hidrograma de cheia que importa identificar:

- o **ponto A**, até ao qual todo o escoamento observado é exclusivamente subterrâneo e
- o **ponto B**, a partir do qual de novo todo o escoamento é exclusivamente subterrâneo

Secção de Eng.ª Rural

### Metodologia para a separação das componentes do hidrograma

- (1) Traçar o hidrograma
- (2) Identificar os pontos A e B;
  - **ponto A**, até ao qual todo o escoamento observado é apenas subterrâneo;
  - **ponto B**, a partir do qual de novo todo o escoamento é, de novo, apenas subterrâneo.
- (3) Ajustar uma reta à curva de esgotamento do escoamento de base (curva de exaurimento) ;
- (4) Determinar equação da reta:  

$$Y - y_1 = m (x - x_1) \text{ e } m = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1),$$
 com  $y = q_b$  e  $x = t$ ;
- (5) Calcular o caudal de base para o intervalo de tempo A a B com recurso à curva de exaurimento;
- (6) Subtrair as ordenadas do caudal de base das ordenadas do caudal total, obtendo assim o escoamento direto.
- (7) Incluir a série do qd no gráfico

Secção de Engª Rural

### Exercício 27

No Quadro abaixo apresentam-se os valores de precipitação total ocorrida sobre uma bacia hidrográfica com 8 km<sup>2</sup> de área e os caudais de escoamento total medidos na respetiva secção de jusante.

a) Efetue a decomposição do hidrograma de escoamento total, considerando que este é constituído por escoamento direto e de base (separação empírica);

b) calcule a intensidade de precipitação eficaz que deu origem a este escoamento.

t (h)	r <sub>t</sub> (mm h <sup>-1</sup> )	q <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
(1)	(2)	(3)
0	0	3.5
1	0	3.3
2	0	3.3
3	0	3.1
4	50	3.5
5	0	6.5
6	0	16.4
7	0	30.8
8	0	22.2
9	0	12.3
10	0	8.3
11	0	5.7
12	0	4.5
13	0	3.3
14	0	2.5
15	0	2.3
16	0	2.2
17	0	2.1

Secção de Engª Rural

### Resolução alínea a

- (1) Traçar o hidrograma ;
- (2) Identificar os pontos A e B;
  - **ponto A**, até ao qual todo o escoamento observado é apenas subterrâneo;
  - **ponto B**, a partir do qual de novo todo o escoamento é, de novo, apenas subterrâneo.

$$A = (3, 3.1)$$

$$B = (14, 2.5)$$

- (3) Ajustar uma reta à curva de esgotamento do escoamento de base (curva de exaurimento) ;

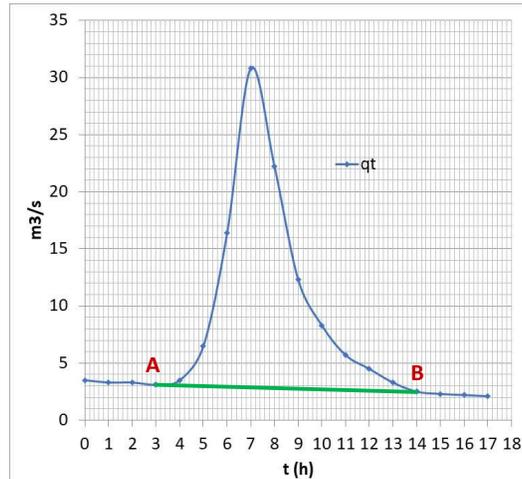
- (4) Determinar equação da reta:

$$Y - y_1 = m (x - x_1) \text{ e}$$

$$m = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1),$$

$$\text{com } y = q_0 \text{ e } x = t;$$

$$q_0 = 3.26 - 0.0545t$$



Secção

- (4) Calcular o caudal de base,  $q_0$ , para o intervalo de tempo A a B com recurso à curva de exaurimento;

t (h)	$r_t$ (mm h <sup>-1</sup> )	$q_t$ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	$q_b$ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	$q_d$ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (3) - (4)
0	0	3.5	3.5	0.0
1	0	3.3	3.3	0.0
2	0	3.3	3.3	0.0
3	0	3.1	3.1	0.0
4	50	3.5		
5	0	6.5		
6	0	16.4		
7	0	30.8		
8	0	22.2		
9	0	12.3		
10	0	8.3		
11	0	5.7		
12	0	4.5		
13	0	3.3		
14	0	2.5	2.5	0.0
15	0	2.3	2.3	0.0
16	0	2.2	2.2	0.0
17	0	2.1	2.1	0.0
			$\Sigma =$	85.5 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>

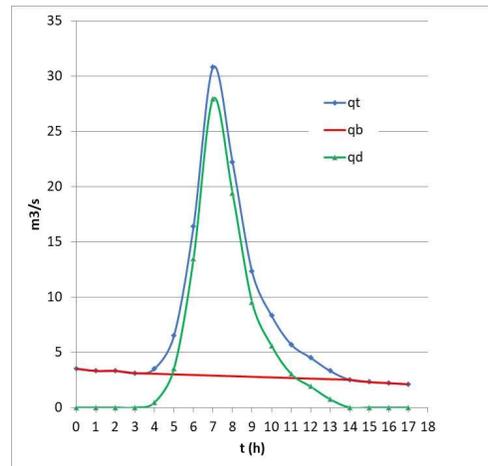
$$q_0 = 3.26 - 0.0545 \times 4$$

$$q_d = q_t - q_0 = 3.5 - 3.05 = 0.45$$

- (6) Subtrair as ordenadas do caudal de base das ordenadas do caudal total,  $q_t$ , obtendo assim o escoamento direto,  $q_d$

Secção de Eng.ª Rural

(7) Incluir a série do qd no gráfico



Secção de Engª Rural

### Resolução alínea b

Precipitação eficaz ou útil  $\Leftrightarrow Q_d$  (mm)

- Determinação de  $V_{Q_d}$  ( $m^3$ )

$$V_{Q_d} = \Delta t \cdot \sum q_{di} = 3600 \text{ s} \times 85.5 \frac{m^3}{s} = 307787.4 \text{ m}^3$$

- Determinação de  $Q_d$  (mm)

$$Q_d = \frac{V_{Q_d}}{A} = \frac{307787.4 \text{ m}^3}{8000000 \text{ m}^2} \times 1000 = 38.5 \text{ mm}$$

- Determinação da intensidade de precipitação eficaz,  $R_n$

$$R_n = \frac{Q_d}{\Delta t} = \frac{36.5 \text{ mm}}{1 \text{ h}} = 38.5 \text{ mm h}^{-1}$$

Secção de Engª Rural