



Hidrologia

7. Relações Precipitação - Escoamento

7. Relações Precipitação-Escoamento

- 7.1 Introdução
- 7.2 Modelação das relações Precipitação - Escoamento
- 7.3 Modelo de Thonhwaite –Mather
- 7.4 Tempos característicos das relações precipitação-Escoamento
- 7.5 Estimativa dos volumes de cheia, caudais de ponta de cheia e hidrogramas de cheia

Secção de Engª Rural

A relação entre a precipitação sobre uma bacia hidrográfica e o escoamento resultante hidrográfica reflete a interação entre os diferentes processos hidrológicos, os quais dependem de fatores climáticos e fisiográficos.

A. Os fatores climáticos podem dividir-se nos que dependem de:

• Precipitação

- **Forma:** uma precipitação na forma líquida pode dar origem imediata ao escoamento no curso de água, ao contrário de uma precipitação sob a forma de neve que produzirá escoamento com desfaseamento no tempo;
- **Intensidade:** só haverá escoamento superficial se a intensidade da precipitação exceder a capacidade de infiltração;
- **Duração:** o seu aumento faz com que diminua gradualmente a capacidade de infiltração, já que aumenta o teor de água no solo e, conseqüentemente, faz com que aumente o escoamento;
- **Distribuição temporal:** a época de ocorrência e o intervalo entre fenómenos de precipitação condicionam o teor de água do solo e a disponibilidade de água para a evaporação e transpiração.



Secção de Engª Rural

• Evapotranspiração

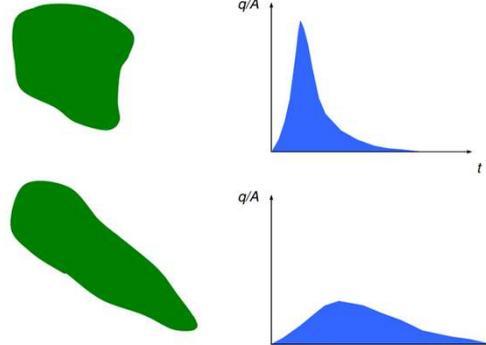
- A evapotranspiração é responsável pela perda de água para o escoamento e é condicionada pela temperatura, radiação solar, vento, humidade do ar, pressão atmosférica, natureza da superfície evaporante, teor de água no solo e espécie e distribuição da vegetação.

B. Os **factores fisiográficos** resultam das características da bacia hidrográfica:

• 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**, se expresso em altura de água uniforme sobre a bacia.

Uma BH estreita e longa (fator de forma baixo), está menos sujeita à ocorrência de cheias pois a contribuição dos afluentes atinge o curso de água principal em diferentes secções do mesmo



Secção de Eng.ª Rural

• Do sistema ou rede de drenagem

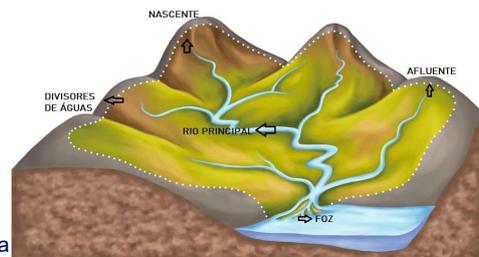
- A **densidade de drenagem** indica o desenvolvimento do sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica.

Este índice, D_d (km^{-1}) é expresso pela relação entre o comprimento total dos cursos de água (L_T) e a área da bacia (A):

$$D_d = \frac{L_T}{A}$$

- Bacias com drenagem pobre $\rightarrow D_d < 0,5 \text{ km/km}^2$
- Bacias com drenagem regular $\rightarrow 0,5 \leq D_d < 1,5 \text{ km/km}^2$
- Bacias com drenagem boa $\rightarrow 1,5 \leq D_d < 2,5 \text{ km/km}^2$
- Bacias com drenagem muito boa $\rightarrow 2,5 \leq D_d < 3,5 \text{ km/km}^2$
- Bacias excepcionalmente bem drenadas $\rightarrow D_d \geq 3,5 \text{ km/km}^2$

Rede de drenagem numa bacia hidrográfica



Se a bacia é bem drenada: $\Rightarrow D_d$ alta

o escoamento superficial é rapidamente canalizado para linhas de água bem definidas e surge mais rapidamente concentrado na secção de referência da bacia.

Se a bacia é mal drenada: $\Rightarrow D_d$ baixa \Rightarrow

A precipitação vai originar sobretudo um escoamento subsuperficial e um escoamento subterrâneo, que se processam com maior lentidão, não originando por isso pontas de cheia elevadas.

D_d a forma das cheias e o escoamento anual, pois dela depende o percurso superficial sobre o terreno e, portanto, a maior ou menor oportunidade para a infiltração e evapotranspiração.

Secção de Eng.ª Rural

• Do relevo

- Influencia o escoamento superficial, o teor de água no solo, que por sua vez influencia a evapotranspiração e a alimentação das reservas subterrâneas.

Quanto maior for o declive dos terrenos, maior será a velocidade com que se dá o escoamento superficial e menor será o tempo que a água leva a atingir o sistema de drenagem, facilitando o aparecimento de maiores pontas de cheia.

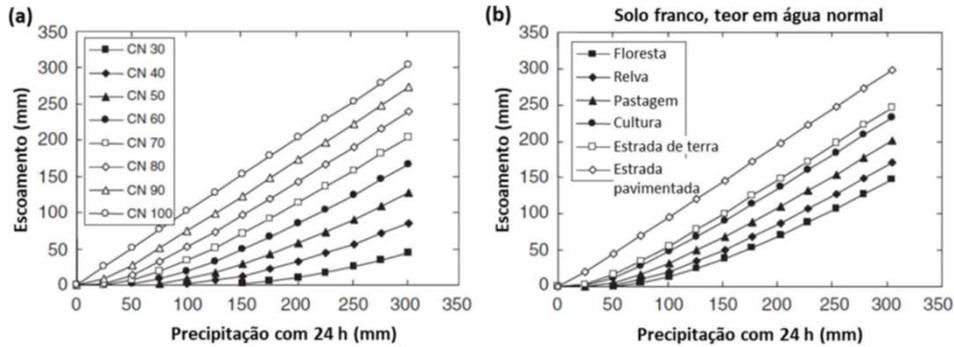
Por outro lado, a orientação da bacia tem influência na exposição aos ventos e à radiação solar condicionando a evapotranspiração.



• 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 (textura e estrutura).
- A *vegetação* tem como efeito interceptar parte da água precipitada, retardar o escoamento superficial, dando à água mais tempo para se infiltrar, e proteger o solo da erosão hídrica. As raízes tornam o solo mais 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.

relação entre alguns destes fatores e a precipitação

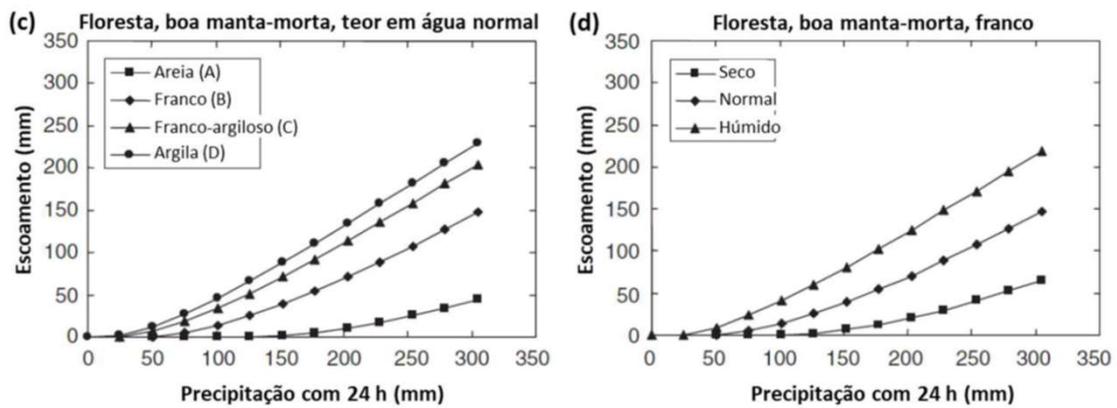


Relação entre escoamento e precipitação no método do SCS:

(a) Efeito do número de escoamento, entre 30 e 100;

(b) efeito da cobertura do solo, para um solo franco, com teor em água normal;

Secção de Eng.º Rural



Relação entre escoamento e precipitação no método do SCS:

(c) efeito da textura do solo, para uma floresta com boa manta-morta e teor em água normal;

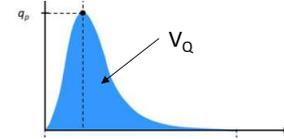
(d) efeito do teor em água inicial, numa floresta com boa manta-morta e solo franco (Fonte: Bonan, 2015)

Secção de Eng.º Rural

Influência do tipo e técnicas de manipulação da vegetação no escoamento

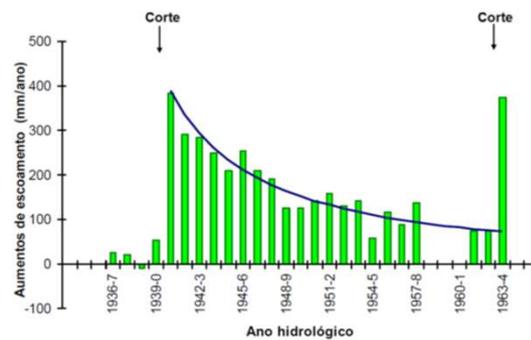
A. No volume total de escoamento, V_Q

Em geral, as florestas evapotranspiram mais do que a vegetação rasteira. Sendo assim, e pela equação do balanço de bacias, é de esperar que as bacias florestadas produzam menos escoamento (menor volume total anual de escoamento) do que quando ocupadas por vegetação rasteira.



$$\bar{Q} = \bar{P} - \bar{E}$$

Influência de um corte raso de uma floresta no escoamento, numa bacia da Carolina do Norte (Adaptado de Swift e Swank, 1981, em David, 2018).



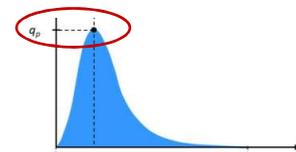
Secção de Engª Rural

Em relação ao *armazenamento de água do solo*, as florestas por um lado promovem maior infiltração (vector de entrada) mas por outro evapotranspiram mais (vector de saída)

Em geral, o aumento relativo da evapotranspiração é maior que o da infiltração. Desta forma, as florestas tendem a reduzir o armazenamento de água do solo e a recarga dos aquíferos, reduzindo as componentes lentas do escoamento (o que é diferente do inicialmente suposto).

B. nos valores extremos de escoamento (máximos e mínimos)

Quanto às *cheias*, tem-se verificado que as florestas tendem a reduzir os caudais de ponta de cheia. No entanto, este efeito só é significativo nas cheias de pequena-média magnitude. Nas grandes cheias, o volume de precipitação envolvido é tão elevado que o efeito das florestas é residual.



A redução dos caudais de ponta de cheia pelas florestas deve-se aos aumentos verificados nas:

- capacidade de infiltração do solo,
- evapotranspiração e
- rugosidade da superfície do solo.

explicar

Secção de Engª Rural

7.2. Modelação das Relações Precipitação - Escoamento

Ideal: Ter um modelo de base física, que

- simulasse todos os processos hidrológicos encontrados numa bacia hidrográfica,
- poderia ser utilizado quase como modelo único, para qualquer tipo de bacia.

Esta abordagem não é normalmente considerada porque:

- Um modelo desse tipo exige uma **enorme quantidade de dados e de parâmetros**, normalmente não disponível,
- em muitas situações, por exemplo num modelo de acontecimento, há processos hidrológicos cuja **modelação é desnecessária**, sendo preferível usar modelos mais simples.

Podem considerar-se diferentes estratégias de modelação, seleccionando diferentes modelos, considerando, por exemplo:

- o **intervalo de discretização temporal** a utilizar (ou disponível),
- a **dimensão da bacia hidrográfica** a modelar.

Secção de Engª Rural

7.2.1 Discretização Temporal

$\Delta t = \text{ano}$

A utilização do ano hidrológico pode eliminar a necessidade de modelar a evolução do armazenamento de água no solo.

Como vimos na aula referente ao Balanço Hidrológico, a equação referente a valores médios anuais é simplificada:

$$\bar{Q} = \bar{P} - \bar{E}$$

$$\bar{E} = \frac{\bar{p}}{\sqrt{0.9 + \frac{\bar{p}^2}{\bar{E}_p^2}}} \quad \text{para } \frac{\bar{p}^2}{\bar{E}_p^2} > 0.1$$

$$\bar{E} = \bar{p} \quad \text{para } \frac{\bar{p}^2}{\bar{E}_p^2} < 0.1$$

$$\bar{E}_p = 300 + 25\bar{T} + 0.05\bar{T}^3$$

Com:

\bar{E} = evapotranspiração média anual (mm)

\bar{p} = precipitação média anual (mm)

\bar{E}_p = evapotranspiração média potencial anual, correspondente temperatura média anual do ar (mm)

\bar{T} = temperatura média anual (°C)

A evapotranspiração anual média, pode ser estimada com a **fórmula empírica de Turc**, como apresentado na aula de "Evapotranspiração"

Secção de Engª Rural

Relações para Portugal Continental – Regionalização de Loureiro

Loureiro(1986) obteve um conjunto de relações lineares entre o escoamento anual, Q (mm), e a precipitação anual, P (mm):

$$Q = a + bP$$

repartidas por 11 regiões de Portugal Continental.

Dada a densidade de postos udométricos em Portugal, é fácil obter uma estimativa da precipitação média anual.

Quadro 1 Valores dos parâmetros a e b da fórmula regional de Loureiro para a estimativa do escoamento anual (mm) em Portugal Continental (Loureiro, 1986)

Região	a	b	r^2	Dimensão da amostra
Minho	- 454	0,89	0,90	72
Tâmega	- 239	0,69	0,92	130
Tua/Sabor	- 325	0,80	0,87	170
Coa	- 319	0,72	0,87	66
Paiva	- 413	0,83	0,89	47
Alto Mondego e Alto Tejo	- 152	0,70	0,88	136
Tejo Margem Esquerda	- 329	0,81	0,79	65
Vouga, Baixo Mondego, Baixo Tejo e Zona Oeste	- 291	0,73	0,70	61
Guadiana	- 360	0,88	0,84	41
Sado e Mira	- 304	0,75	0,76	94
Algarve	- 308	0,75	0,80	79

Por exemplo, em termos médios, uma precipitação anual de 1000 mm na região do Minho, dará origem a um escoamento anual de $-454 + 0.89 \times 1000 = 436$ mm

Secção de Eng.ª Rural

Relações para Portugal Continental – Regionalização de Quintela

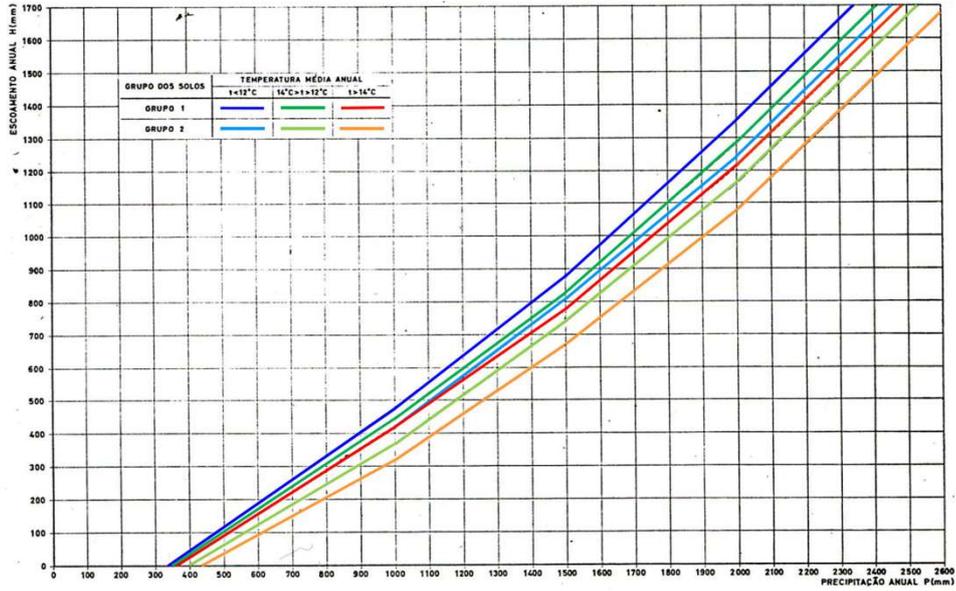
Quintela (1967) obteve um conjunto de relações lineares entre o escoamento anual e a precipitação anual, válidas em média em Portugal.

Estas relações foram obtidas para:

- três classes de temperatura média anual ($T > 14$ °C, 14 °C $> T > 12$ °C, $T < 12$ °C) e
- duas classes de solos, classificados de acordo quanto à sua capacidade de produzir escoamento anual, em igualdade dos restantes fatores de escoamento:
 - Grupo 1 – Solos dando origem a escoamento anual médio a elevado.
 - Grupo 2 – Solos dando origem a escoamento anual de médio a baixo

Esta classificação hidrológica para os solos de Portugal apresenta-se em Quintela (1967).

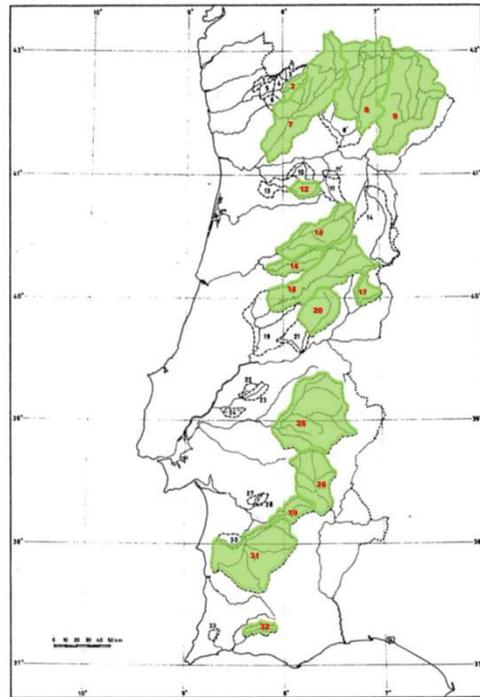
Secção de Eng.ª Rural



Relações médias em Portugal entre o escoamento anual e a precipitação anual (Fonte: Quintela, 1967)

Secção de Engª Rural

Bacias hidrográficas utilizadas por Quintela (1967) para caracterizar as relações entre o escoamento anual e a precipitação anual em Portugal Continental



Secção de Engª Rural

$\Delta t = \text{mês}$

A nível mensal existem diversos modelos simples:

- que usam como base a equação do balanço hidrológico;
- a bacia é representada de uma forma muito simplificada;
- uma forte base empírica, embora considerem a equação de conservação da massa;
- A variação do armazenamento não pode ser desprezada, logo, necessitam de uma forma simplificada de acompanhamento do teor em água no solo, o que permite calcular a evapotranspiração real, e
- forma simplificada de simular os escoamentos superficial e subterrâneo.

Os dois modelos mais utilizados em Portugal são:

- o modelo de **Thornthwaite-Mather**,
- o modelo de **Témez**.

Secção de Engª Rural

 $\Delta t = \text{dia}$

A nível diário há ainda alguns processos hidrológicos que não se conseguem modelar com base física, como é o caso da infiltração.

A esta escala, o método mais utilizado é o do **Soil Conservation Service**, já apresentado no contexto da modelação da infiltração, que tem de ser combinado como outros modelos para a redistribuição de água no solo, recarga do aquífero, etc., se quisermos fazer um modelação contínua, no tempo.

 $\Delta t < \text{dia}$

Para este intervalo de tempo já é possível modelar, como base física, a totalidade dos processos hidrológicos. Contudo, essa abordagem não é sempre aconselhável, como já indicado.

O tipo de modelo a utilizar, assim como os processos hidrológicos a considerar, vai depender do facto de se pretender usar o modelo em contínuo ou como um modelo de acontecimento, bem como da dimensão da bacia hidrográfica.

Secção de Engª Rural

Tempo de concentração de uma bacia, t_c

tempo correspondente ao trajeto da água desde o ponto mais remoto da bacia até à secção de jusante e designado de tempo de concentração.

Só ao fim do tempo de concentração, t_c , toda a bacia contribui com escoamento superficial para a secção de jusante.

Para o cálculo do tempo de concentração pode utilizar-se uma das inúmeras fórmulas empíricas, do tipo:

$$t_c = 0.02 L_c^{0.77} S_c^{-0.385} + \left(\frac{2.2 n_M L_s}{\sqrt{S_b}} \right)^{0.467}$$

com:

t_c = tempo de concentração (min),

L_c = comprimento do curso de água principal (m),

S_c = declive do curso de água principal (-),

n_M = número de Manning para as encostas da bacia ($m^{-1/3} s$),

L_s = comprimento médio de escoamento superficial (m), com um limite máximo de 150 m,

S_b = declive médio da bacia (-)

ou o método recomendado pelo SCS: $t_c = t_l/0,6$, sendo o tempo de atraso calculado com:

$$t_l = \frac{(L_c + I)^{0.8} (2540 - 22.86 CN_{II})^{0.7}}{14104 CN_{II}^{0.7} \sqrt{S_b}}$$

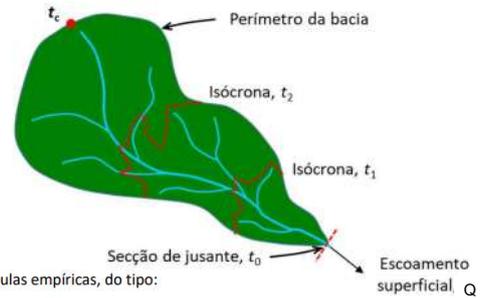
com:

t_l = tempo de atraso (h),

L_c = comprimento do curso de água principal (m),

I = comprimento desde a nascente do curso de água até à linha de cumeada (m),

S_b = declive médio da bacia (-)



Secção de Eng.º Rural

7.3. Modelo de Thornthwaite-Mather

Desenvolvido para **intervalos de tempo mensais**, embora também seja aplicado para intervalos de tempo menores (**decêndios**).

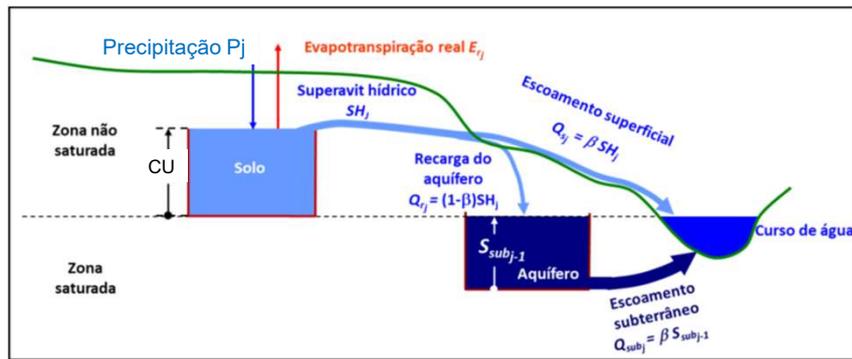
É aqui apresentado para ser aplicado como modelo contínuo no tempo, para a estimativa da evapotranspiração potencial e dos escoamentos superficial e subterrâneo.

O modelo de Thornthwaite-Mather pode ser utilizado para um ano médio ou sequencialmente e para diferentes fins (modelo de precipitação-escoamento, caracterização climática, rega, etc.)

Secção de Eng.º Rural

Considera que:

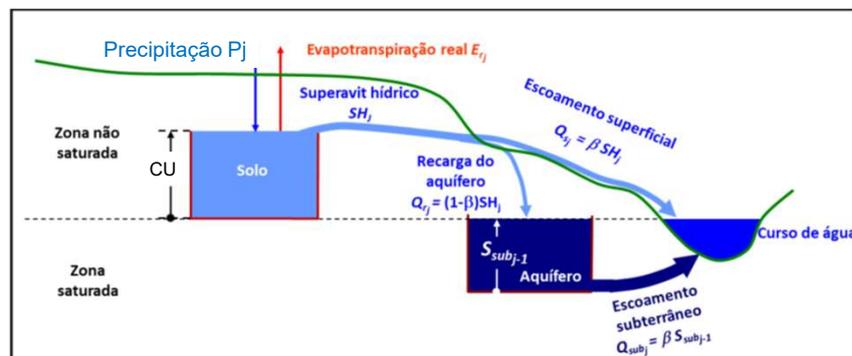
- o solo tem uma capacidade máxima de armazenamento igual à **capacidade utilizável CU** ;
- uma **fracção β do superavit hídrico** dá origem a **escoamento superficial Q_s** ;
- a restante **fracção $(1-\beta)$ do superavit hídrico** dá origem a **recarga do aquífero Q_r** ;



Representação simplificada do ciclo hidrológico, pelo método de Thorntwaite-Mather

Secção de Eng.ª Rural

- o aquífero liberta, com o desfasamento de um mês, uma fracção β da **água armazenada S_{sub}** , como **escoamento subterrâneo Q_{sub}** ;
- a soma dos escoamentos superficial e subterrâneo conduz ao **escoamento total Q_t** .



Representação simplificada do ciclo hidrológico, pelo método de Thorntwaite-Mather

Secção de Eng.ª Rural

Algoritmo de cálculo

1. Variáveis de entrada:

- Valores mensais de **precipitação P** e de **evapotranspiração potencial E_p** (calculada previamente com um dos métodos anteriormente apresentados);
- **escoamentos mensais Q_t** (caso não existam o modelo não pode ser calibrado).

2. Parâmetros a calibrar (caso existam escoamentos mensais):

- **Capacidade utilizável do solo CU** , (na ausência de dados, considerar $50 \text{ mm} \leq CU \leq 400 \text{ mm}$, com uma moda em 100 mm);
- e **parâmetro para fração da água que fica na bacia ($1-\beta$)** (na ausência de dados considerar valores próximos de 0,5).

Secção de Eng.º Rural

3. Incertezas na Inicialização no processo:

- Na aplicação sequencial do método há uma **incerteza** quanto ao **valor inicial do armazenamento de água no solo**.

Ao fim do período húmido pode considerar-se aproximadamente que o armazenamento de água no solo é igual à capacidade utilizável e ao fim do período seco que o armazenamento de água no solo é zero. O erro cometido esbate-se ao fim de alguns meses de cálculos.

- Há igualmente **incerteza** quanto ao **valor inicial do armazenamento de água no aquífero**.

Se tivermos uma estimativa do valor médio do escoamento subterrâneo ou se, no fim de um período sem superavit hídrico, só houver escoamento subterrâneo, então, por definição e conhecida a constante de exaurimento ou esgotamento do aquífero, α , pode considerar-se:

$$A_{\text{sub}} \text{ mês anterior} = Q_{\text{sub}} \text{ mês corrente} / \alpha$$

Caso não existam valores de escoamento ou da constante de exaurimento, um valor razoável para S_{sub} (mês anterior), mas com elevada incerteza, consiste em considerar que este é nulo ao fim de um período sem superavit hídrico.

Secção de Eng.º Rural

Método de Thornthwaite-Matter: Aplicação sequencial da metodologia1 – Determinação do armazenamento inicial, A_s

$$A_{sj} = \begin{cases} \min(P_j - Ep_j + A_{s\ j-1}; CU) & \text{Se } P_j \geq Ep_j \\ A_{s\ j-1} \cdot e^{-\left(\frac{Ep_j - P_j}{CU}\right)} & \text{Se } P_j < Ep_j \end{cases}$$

2 – Determinação do superavit hídrico, SH

$$SH_j = \begin{cases} (P_j - Ep_j + A_{s\ j-1} - CU) & \text{Se } A_{sj} = CU \\ 0 & \text{Se } A_{sj} < CU \end{cases}$$

Secção de Eng.º Rural

3 – Determinação da evapotranspiração real, Er

$$Er_j = \begin{cases} Ep_j & \text{Se } P_j \geq Ep_j \\ P_j - (A_{s\ j} - A_{s\ j-1}) & \text{Se } P_j < Ep_j \end{cases}$$

4 – Determinação do deficit hídrico, DH

$$DH = Ep_j - Er_j$$

5 – Determinação do armazenamento no aquífero, A_{sub}

$$A_{sub\ j} = (1 - \beta)(SH_j + A_{sub\ j-1})$$

6 – Determinação do escoamento total, Q_t

$$Q_t = \beta (SH_j + A_{sub\ j-1})$$

7 – Determinação do escoamento superficial, Q_s

$$Q_{sj} = \beta \cdot SH_j$$

8 – Determinação do escoamento subterrâneo, Q_{sub}

$$Q_{sub\ j} = Q_{t\ j} - Q_{s\ j}$$

Secção de Eng.º Rural

Exercício 22

Considere os seguintes dados de precipitação, evapotranspiração potencial para uma bacia espanhola, com 385 km² de área

Ano hidrológico	Mês	P (mm)	E _p (mm)
1965/66	OUT	89.1	44.0
	NOV	102.6	18.0
	DEZ	64.3	12.0
	JAN	111.4	13.0
	FEV	126.4	26.0
	MAR	3.8	52.0
	ABR	124.3	77.0
	MAI	22.0	122.0
	JUN	43.1	156.0
	JUL	9.6	174.0
	AGO	2.2	152.0
	SET	38.7	83.0
1966/67	OUT	105.8	44.0
	NOV	95.9	18.0
	DEZ	7.1	12.0
	JAN	56.5	13.0
	FEV	92.3	26.0
	MAR	35.7	52.0
	ABR	36.9	77.0
	MAI	38.6	122.0
	JUN	32.1	156.0
	JUL	0.0	174.0
	AGO	0.0	152.0
	SET	1.5	83.0

a) Aplique manualmente a metodologia de Thornthwaite-Matter para o primeiro ano hidrológico e obtenha as séries de escoamento superficial e subterrâneo

b) Faça o mesmo para todo o período de dados (1965/66 a 1971/72) recorrendo ao ficheiro excel disponibilizado no FENIX)

c) Apresente o gráfico com as diferentes componentes do escoamento ao longo do tempo;

d) Apresente o gráfico com as componentes do balanço hidrológico ao longo do tempo;

Secção de Eng^a Rural**Classificação Climática**

Recorde-se que a aplicação do balanço hidrológico sequencial aos valores médios mensais da precipitação e da evapotranspiração numa região possibilita a determinação dos valores da evapotranspiração potencial, do défice hídrico e do superavit hídrico anuais médios, correspondentes à soma dos respetivos valores mensais ao longo do ano.

Com base nos valores médios anuais obtidos é possível obter os índices climáticos:

- Índice de aridez $I_a = 100 \frac{DH}{E_p}$ (para precipitação nula atinge o máximo de 100%)
- índice de humidade $I_h = 100 \frac{SH}{E_p}$ (pode ultrapassar os 100%)
- índice hídrico $I_H = I_h - 0.6I_a$

com base nos quais se identificam tipos climáticos relativos ao regime hídrico anual, ao regime térmico anual, ao regime hídrico sazonal e o regime térmico sazonal.

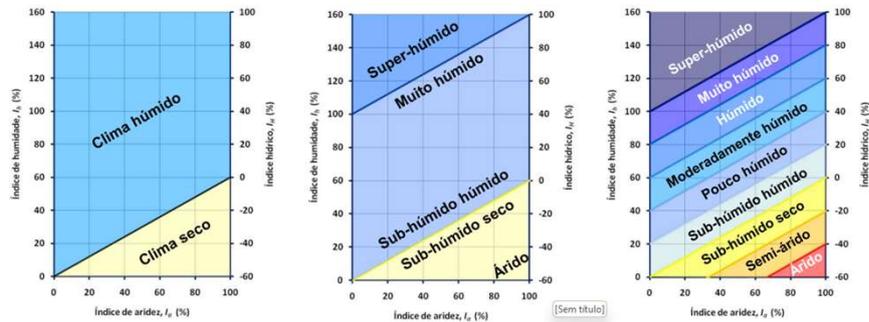
Secção de Eng^a Rural

28/48

Tipos climáticos com base no índice hídrico (I_H)

Tipo climático	Índice hídrico (%)
A - Super-húmido	$I_H \geq 100$
B - Húmido	
B ₄ - Muito húmido	$80 \leq I_H < 100$
B ₃ - Húmido	$60 \leq I_H < 80$
B ₂ - Moderadamente húmido	$40 \leq I_H < 60$
B ₁ - Pouco húmido	$20 \leq I_H < 40$
C - Sub-húmido	
C ₂ - Sub-húmido húmido	$0 \leq I_H < 20$
C ₁ - Sub-húmido seco	$-20 \leq I_H < 0$
D - Semi-árido	$-40 \leq I_H < -20$
E - Árido	$-60 \leq I_H < -40$

Tipos climáticos com base no regime hídrico anual



Regime hídrico sazonal (índices de humidade e de aridez)

Climas húmidos (A, B e C ₂)	Índice de aridez (%)
r - Pequena ou nula deficiência de água no ano	$0 < I_a \leq 16,7$
s - moderada deficiência de água no Verão	$16,7 < I_a \leq 33,3$
w - moderada deficiência de água no Inverno	$16,7 < I_a \leq 33,3$
s ₂ - elevada deficiência de água no Verão	$I_a > 33,3$
w ₂ - elevada deficiência de água no Inverno	$I_a > 33,3$
Climas secos (C ₁ , D e E)	Índice de humidade (%)
d - Pequeno ou nulo excesso de água no ano	$0 < I_h \leq 10$
s - moderado excesso de água no Verão	$10 < I_h \leq 20$
w - moderado excesso de água no Inverno	$10 < I_h \leq 20$
s ₂ - elevado excesso de água no Verão	$I_h > 20$
w ₂ - elevado excesso de água no Inverno	$I_h > 20$

5.4 Tempos Característicos das Relações Precipitação - Escoamento

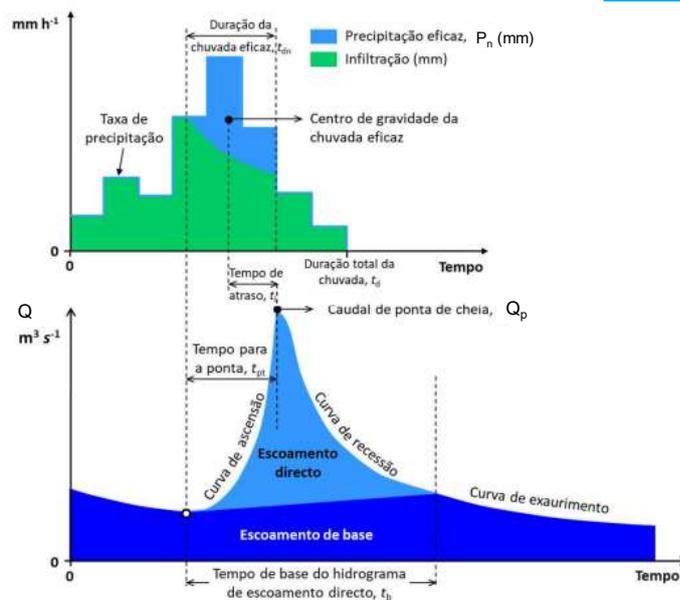
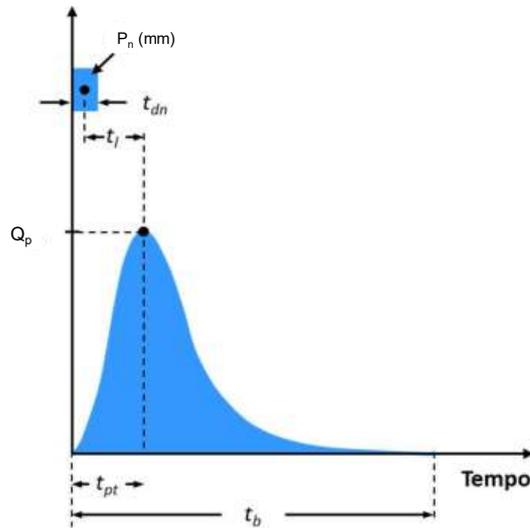


Figura 6 Tempos característicos das relações precipitação-escoamento



Secção de Eng.º Rural

7.5 Estimativa de Volumes de Cheia e Caudais de Ponta de Cheia

A adaptação do homem ao meio ambiente depende da sua capacidade de reação relativamente às variações ambientais. De modo a poder defender-se destas é importante que seja capaz de as prever.

Em hidrologia, como em outras ciências (meteorologia, economia, medicina ou política), a capacidade de **previsão** é uma necessidade.

Podem distinguir-se dois tipos de previsão, a **curto** e a **longo prazo**, a que correspondem dois problemas práticos de **operação** e de **planeamento**, e cuja solução assenta em duas metodologias distintas:

- Do ponto de vista operacional, podemos partir da situação presente para uma futura próxima, através duma aplicação **determinística** das leis naturais.
- Já para efeitos de planeamento, temos de nos satisfazer em exprimir o futuro em termos **probabilísticos** (Morel-Seytoux, 1987).

Secção de Eng.º Rural

Na perspetiva do planeamento surge a noção de **tempo de retorno** e da sua relação com as Probabilidades

Tempo de retorno (T) de um acontecimento indesejável corresponde à esperança matemática do tempo de recorrência desse acontecimento.

Significa que esse acontecimento ocorre, em média, de T em T anos, pelo que a **probabilidade de ocorrer em cada ano é de $1/T$** , isto é $P(\text{Acontecimento indesejável}) = 1/T$

Um dos objetivos do planeamento de recursos hídricos consiste em tentar resolver os problemas associados a **acontecimentos extremos** (indesejáveis), como problemas de **cheias** ou problemas de **abastecimento** em água, de uma região, por exemplo, para tempos de retorno específicos.

Secção de Eng.º Rural

Quadro 3 Tempos de retorno (cheias) aconselhados para diversas estruturas hidráulicas (Fonte: Chow, *et al.*, ...)

Tipo de Estrutura	Tempo de Retorno (anos)	Tipo de Estrutura	Tempo de Retorno (anos)
Aquedutos de autoestrada		Represas	
Pouco tráfego	5-10	Meio rural	2-50
Tráfego mediano	10-25	Meio urbano	50-200
Tráfego elevado	50-100	Barragens sem perigo provável para a vida humana	
Pontes de autoestradas		Pequenas	50-100
Sistema secundário	10-50	Médias	100+
Sistema primário	50-100	Grandes	50-100
Drenagem Rural		Barragens com perigo provável para a vida humana	
Aquedutos	5-50	Pequenas	50
Valas	5-50	Médias	50-100
Drenagem Urbana		Grandes	100
Esgotos de cidades pequenas	2-25	Barragens com elevada probabilidade de elevação para a vida humana	
Esgotos de cidades grandes	25-50	Pequenas	50-100
Aeroportos		Médias	100
Pouco Tráfego	5-10	Grandes	100
Tráfego mediano	10-25		
Tráfego elevado	50-100		

Secção de Eng.º Rural

Volume de escoamento de Projeto

Método do SCS

Como a duração da chuvada afeta a quantidade precipitada, o volume de escoamento tem de ser avaliado para cada projecto;

O tempo de concentração não é um bom critério para a determinação do volume de escoamento porque, embora uma duração curta origine uma elevada intensidade de precipitação que **pode produzir o maior caudal de cheia para uma dada bacia, não conduz necessariamente ao maior volume de escoamento.**

O SCS estabeleceu como limite mínimo para a duração da precipitação, t_d , a utilizar em estruturas de controlo do escoamento, as 6 horas.

Se o tempo de concentração, t_c , da bacia for superior a 6 h então deve considerar-se a duração da chuvada igual ao tempo de concentração, isto é:

- $t_d = 6h$ se $t_c \leq 6h$,
- $t_d = t_c$ se $t_c > 6h$

Então, o volume de escoamento de projeto é dado por:

$$V_{QP} = \frac{(P_T - 0.2S_d)^2}{(P_T + 0.8S_d)}$$

em que a capacidade de armazenamento da bacia, S_d , corresponde à situação AMCII e terá sido previamente estimada a partir do tipo e uso de solos da bacia.

Apresenta-se aqui apenas uma forma de estimar Q_{PT} , que corresponde à situação mais frequente, mas menos rigorosa, em que não se dispõe de registos de caudal na secção do curso de água, nem em cursos de água próximos:

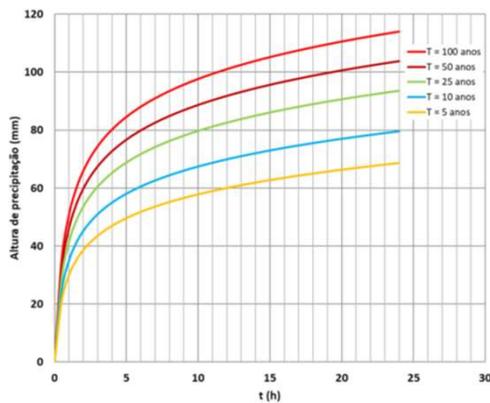
Neste caso, usa-se um modelo de precipitação-escoamento, de acontecimento, que permita transformar um **hietograma de projecto** a que esteja associado o **tempo de retorno T** , num **caudal de ponta de cheia, Q_{PT}** (ou num volume de cheia), que se admite ter o mesmo tempo de retorno que o hietograma.

De entre os diversos modelos existentes, apresentam-se três:

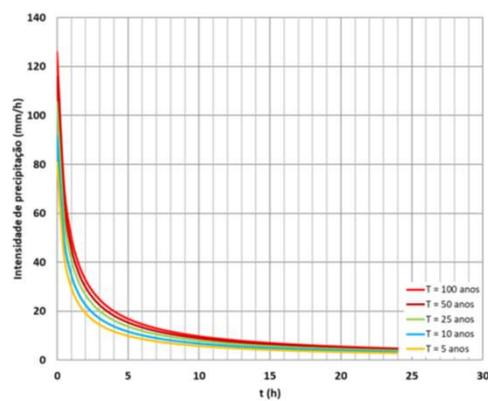
- **Fórmula Racional**, apropriada para pequenas bacias, de preferência com uma área inferior a 1 km²;
- **método do SCS**, apropriado para bacias de média dimensão, até cerca de 500 km²;
- **fórmula de Myer**, um modelo empírico mais grosseiro, mas parametrizado para Portugal Continental

A fórmula racional – para bacias de pequena dimensão

É necessário recorrer a curvas que já foram caracterizadas estatisticamente a partir dos dados observados num posto meteorológico da região, que relacionam a duração e a intensidade de uma chuvada com a sua maior ou menor frequência, ou seja, com o tempo de retorno, designadas de curvas de **intensidade – duração – frequência (IDF)** ou **altura-duração –frequência (ADF)**.



Curvas de altura – duração – frequência para Lisboa



Curvas de intensidade – duração – frequência para Lisboa

Secção de Eng.º Rural

- A fórmula racional é um método cinemático pois considera o movimento da água através da bacia hidrográfica, o que se traduz pelo tempo de concentração.
- A sua aplicação está restringida a bacias de pequena dimensão pois assume os seguintes pressupostos:
 - A precipitação ocorre uniformemente em toda a bacia;
 - A intensidade de precipitação é constante ao longo de todo o evento, que tem uma duração igual ao tempo de concentração.
- Aplica-se de preferência a bacias com área inferior a 1 km², sendo possível aplicá-la, com algumas modificações, em áreas até 1,3 a 2,5 km²
- É normalmente o método usado para dimensionar esgotos urbanos.

Secção de Eng.º Rural

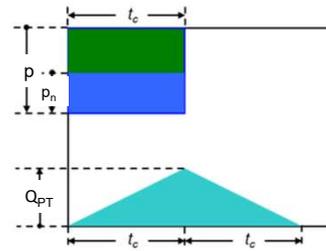
$$Q_{PT} = 0.278 C_T p_T A \quad \text{fórmula racional}$$

Q_{PT} ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) é o caudal de ponta para o período de retorno T
 C_T é o coeficiente de escoamento para T, função do tipo e uso do solo (Quadro),
 p_T (mm h^{-1}) é a intensidade de precipitação com o tempo de retorno T e duração igual ao tempo de concentração da bacia, t_c , obtida a partir da curva de intensidade-duração-frequência para a região,
 A (km^2) é a área da bacia.

- Em bacias com i manchas homogêneas com diferentes solos ou uso, com coeficientes de escoamento C_i , ocupando as áreas A_i , deve obter-se um coeficiente de escoamento médio ponderado pelas áreas.

$$\bar{C}_T = \frac{\sum_i C_{Ti} A_i}{A}$$

Possível hidrograma correspondente ao método da fórmula racional



Secção de Eng.ª Rural

Quadro 4 Coeficientes de escoamento C_T para utilização da Fórmula Racional (Fonte: Cidade de Austin, Texas, em Chow, *et al.*, 1988)

Características da Superfície	Tempo de Retorno (anos)						
	2	5	10	25	50	100	150
Zonas urbanas							
Asfalto	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Betão/Telhados	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Áreas relvadas (relvados, parques, etc.)							
<i>Más condições</i> (cobertura do solo inferior a 50% da área)							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Médio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Inclinado, acima de 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condições intermédias</i> (cobertura do solo entre 50% e 75% da área)							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Médio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Inclinado, acima de 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Boas condições</i> (cobertura do solo acima de 75% da área)							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Médio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Inclinado, acima de 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Zonas rurais							
Culturas							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Médio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Inclinado, acima de 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastagem/Matos							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Médio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Inclinado, acima de 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Floresta							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Médio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Inclinado, acima de 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Bacias de média dimensão – método do SCS

O hidrograma de escoamento direto pode ser aproximado por um hidrograma triangular, com o mesmo volume de escoamento, como representado ao lado.

Escolhida a duração da chuvada obtém-se a **altura de precipitação** correspondente, P_T , para o tempo de retorno pretendido, T , a partir da curva de altura-duração-frequência da região.

Relembrando da aula “Infiltração”, a precipitação eficaz, P_n , é dada por:

$$P_n = \frac{(P - I_a)^2}{(P + S_d - I_a)} \quad \text{para } P > 0,2 S_d$$

em que a capacidade de armazenamento da bacia, S_d , corresponde à situação *AMCII* e terá sido previamente estimada a partir do tipo e uso de solos da bacia.

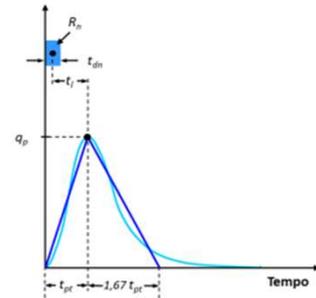


Figura 16 Relações entre uma intensidade de precipitação eficaz e o hidrograma de escoamento directo, e aproximação deste com um triângulo

Neste caso, a expressão para o caudal de ponta de cheia fica:

$$Q_p = \frac{0.208 P_n A}{t_{pt}} = \frac{0.208 P_n A}{0.5 t_{dn} + t_l}$$

t_{pt} é o tempo para a ponta, t_{dn} é a duração da precipitação eficaz, t_l é o tempo de atraso

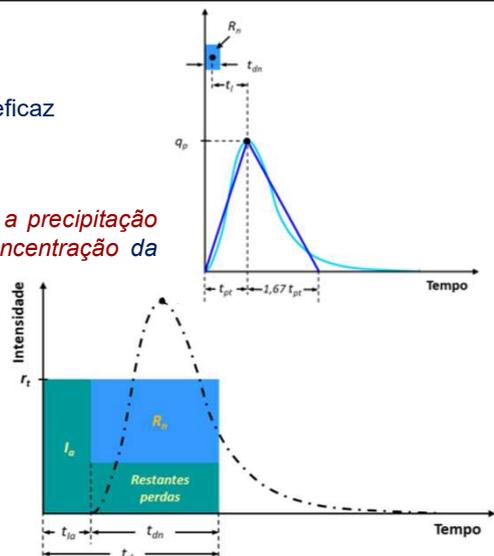
com P_n em mm, A em km^2 , os tempos em h e Q_p em $m^3 s^{-1}$.

Este método pode ser melhorado ao considerar que deve ser a precipitação eficaz a ter uma duração pelo menos igual ao tempo de concentração da bacia, e não a precipitação total.

Escolha da duração de precipitação total, t_d , com intensidade p , que conduz a um tempo t_{la} para satisfação das perdas iniciais I_a , e uma duração da precipitação eficaz igual ao tempo de concentração da bacia, $t_{dn} = t_c$.

$$t_d = t_{la} + t_c \iff t_d = \frac{I_a}{p} + t_c$$

logó $t_d = \frac{I_a}{P/t_d} + t_c$



A equação não tem resolução analítica, resolvendo-se por iterações, com início em t_c

Nota: para a estimativa do QP com o método do SCS, Correia aconselha a calcular a Sd com AMC III

$$CN_{II} = \frac{CN_{III}}{0.43 + 0.0057 CN_{III}}$$

$$t_c = 0.02L_c^{0.77} S_c^{-0.385} + \left(\frac{2.2n_M L_s}{\sqrt{S_b}} \right)^{0.467}$$

com:

t_c = tempo de concentração (min),

L_c = comprimento do curso de água principal (m),

S_c = declive do curso de água principal (-),

n_M = número de Manning para as encostas da bacia ($m^{-1/3}$ s),

L_s = comprimento médio de escoamento superficial (m), com um limite máximo de 150 m,

S_b = declive médio da bacia (-)

ou o método recomendado pelo SCS: $t_c = \frac{t_l}{0,6}$, sendo o tempo de atraso calculado com:

$$t_l = \frac{(L_c + l)^{0.8} (2540 - 22.86CN_{II})^{0.7}}{14104CN_{II}^{0.7} \sqrt{S_b}}$$

com:

t_l = tempo de atraso (h),

L_c = comprimento do curso de água principal (m),

l = comprimento desde a nascente do curso de água até à linha de cumeada (m),

S_b = declive médio da bacia (-)

Fórmula de Myer

Dentro das várias fórmulas empíricas existentes, apresenta-se a fórmula de Myer, por ter sido parametrizada para Portugal Continental e, simultaneamente, por ser útil na transposição para uma bacia de características análogas, da avaliação do caudal de cheia com um dado tempo de retorno, obtida noutra bacia, mediante um método de maior confiança (Quintela, 1996):

$$Q_{PT} = C_T A^\alpha$$

em que o parâmetro regional C depende das características da bacia e do tempo de retorno e o parâmetro regional α , em geral igual a 0,5, varia entre 0,4 e 0,8 (Quintela, 1996).

Loureiro e Costa (1980), Loureiro e Pinto (1980) e Loureiro e Macedo (1984) (em Quintela, 1996) determinaram os valores dos parâmetros C e α para regiões que cobrem a totalidade de Portugal Continental. Dentro de cada região o expoente α é constante e o coeficiente C é função do tempo de retorno.

Deve usar-se apenas quando não for possível recorrer ao modelo SCS

Quadro 5 Definição de zonas para aplicação da fórmula de Myer (Loureiro, *et al.*, 1980 e 1984, em Quintela, 1996).

Localização geral	Definição de zonas
A Norte da bacia do Tejo	N1 – Bacias superiores do Cávado, Tâmega e Tua. N2 – Bacias do Lima, bacia intermédia do Cávado, bacia superior do Ave, bacias inferiores do Tâmega e do Tua e bacia superior do Sabor. N3 – Bacias inferiores do Cávado, Ave, Douro, Vouga e Mondego. N4 – Bacia inferior do Sabor, margem esquerda da bacia do Douro a montante da confluência do Paiva, bacias superiores do Vouga e Mondego.
Bacia do Tejo	T1 – Bacias superiores do Zêzere e bacias do Ponsul, Ocreza, Aravil e Erges (válidos somente onde $\bar{R} < 1400$ mm). T2 – Bacias inferiores do Zêzere e bacias do Nabão, Alviela, Maior, Alenquer, Grande da Pipa, Trancão; bacias inferiores do Sorraia e bacia da ribeira de Muge. Na área compreendida entre a serra de Candeeiros, serra de Montejunto e o litoral e na bacia do rio Lis, os valores deverão ser tomados com reserva. T3 – Bacia superior do Sorraia, bacias da ribeira de Nisa e dos rios Sever e Caia.
A Sul da bacia do Tejo	S1 – Baixo Sado. S2 – Alto Sado, bacias superiores do Xarrama, Degebe e Baixo Mira. S3 – Bacia do Guadiana, entre as zonas S2 e S4. S4 – Ribeiras do Algarve, Baixo Guadiana e Alto Mira (válidos somente onde $500 \text{ mm} < \bar{R} < 1000$ mm).

Legenda: \bar{R} = Precipitação média anual.

Secção de Eng.º Rural

Quadro 6 Parâmetros C_T e α da fórmula de Myer: $q_T = C_T A^\alpha$, com q_T em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e A em km^2 , válida para $A > 50 \text{ km}^2$, para Portugal Continental (Loureiro, *et al.*, 1980 e 1984, em Quintela, 1996).

Zona	α	C						
		Tempo de retorno, T (anos)						
		5	10	25	50	100	500	1000
N1	0,807	2,85	3,72	4,53	5,27	6,10	7,6	8,57
N2	0,694	5,44	6,97	8,58	9,67	10,98	13,9	15,63
N3	0,510	24,93	30,50	39,14	43,49	49,50	57,1	64,83
N4	0,489	11,68	16,78	19,19	22,31	26,20	33,1	38,52
T1	0,375	31,29	40,07	50,24	58,06	66,90	80,50	94,40
T2	0,466	19,17	26,3	34,70	42,20	48,30	66,20	72,30
T3	0,761	3,66	4,49	5,58	6,02	8,45	9,60	11,00
S1	0,816	1,66	2,09	2,58	2,98	3,37	4,27	4,75
S2	0,738	3,39	4,28	5,54	6,44	7,40	9,50	10,68
S3	0,745	2,38	3,06	3,68	4,12	4,94	6,23	7,27
S4	0,784	3,45	4,40	5,40	6,24	7,09	8,97	9,88

Secção de Eng.º Rural

Exercício 23. A bacia do rio Terva, afluente do Douro, tem uma área de 101,08 km². O caudal de ponta de cheia obtido com a análise de frequência foi de 200 m³ s⁻¹. A curva de altura-duração, para o tempo de retorno de 100 anos, foi estimada como:

$$P_t = 14,139 t_d^{0,317} \quad (P_t \text{ em mm e } t \text{ em min}).$$

- a) Com base nas características fisiográficas (quadro abaixo), no tipo e no uso do solo, estime o tempo de concentração da bacia;
- b) Calcule o volume de escoamento para T=100 anos pelo método do SCS, em mm e em m³ (23.4, 2365272)
- c) Estime o caudal de ponta de cheia para T = 100, com a fórmula racional. Comente o resultado. (284.8 m³ s⁻¹)
- d) Estime o caudal de ponta de cheia para T = 100, com recurso à fórmula de Meyer. (252.98 m³ s⁻¹)
- e) Sabendo que o número de escoamento é CN_{II} = 66,67, estime o caudal de ponta de cheia para T = 100 anos, com o método do SCS, considerando que se verificam as AMC_{III}, tal como aconselhado em Correia (1994). (190.07 m³ s⁻¹)

Dados :

$L_c = 17.31$ km
 $S_c = 1.17$ %
 $I = 1504.5$ m
 $L_s = 0.35$ km
 $S_b = 18.4$ %
 $CN_{II} = 66.67$

Quadro 1 Elementos para aplicação da fórmula racional

Uso do solo	Área (km ²)	n_m (s m ^{-1/3})	$C_{T=100 \text{ anos}}$
Área c/ ocupação agrícola	44,72	0,20	0,54
Florestas e meios semi-naturais	56,04	0,70	0,52
Territórios artificializados	0,32	0,01	0,95