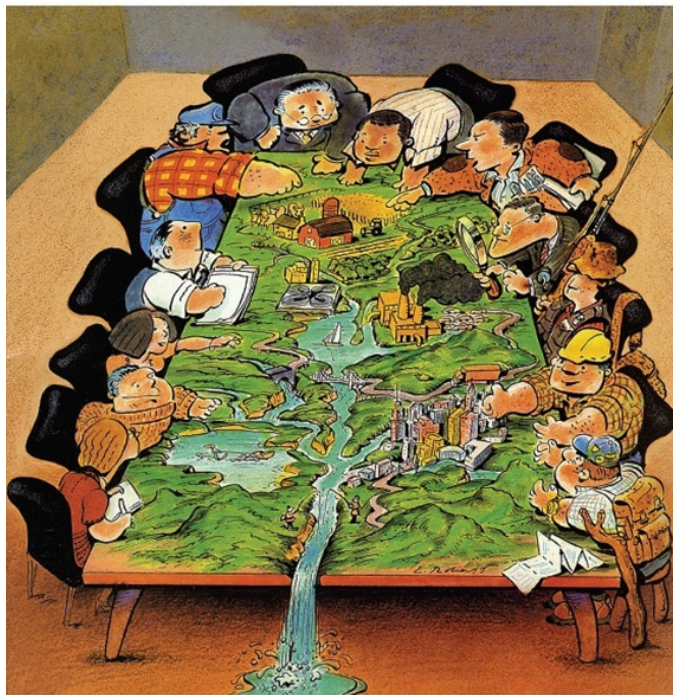




Modelação e planeamento de recursos hídricos (superficiais)

Surface water resources modelling and planning

(Part 2)

M.M.Portela (2019/2020) ---- 154

CONCEITOS GERAIS – HUD / GENERAL CONCEPTS – unit hydrograph model,

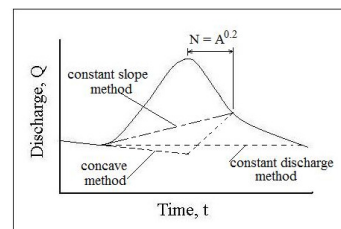
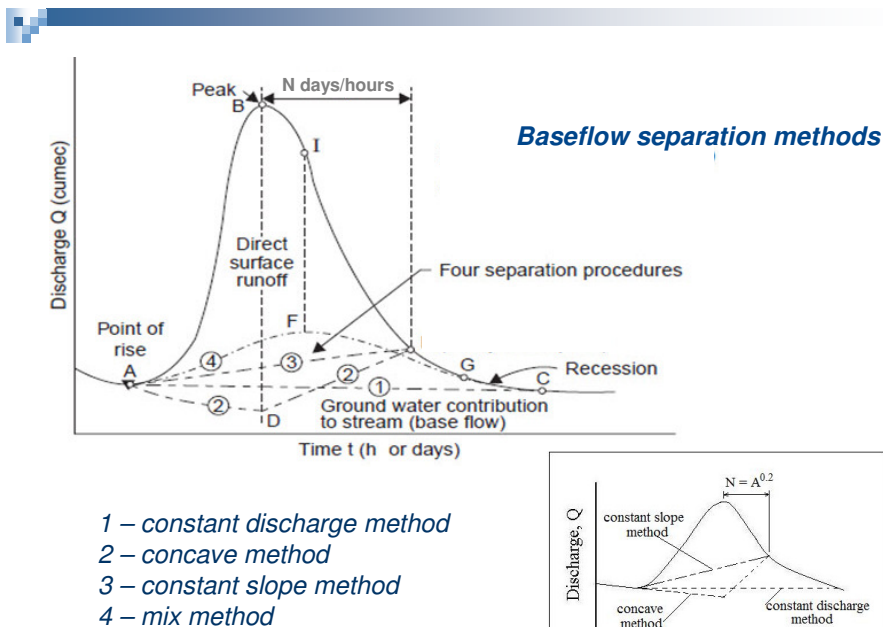
Unit hydrograph with duration D, UHD

ELEMENTARY CONCEPTS RELATED TO THE HUD (cont.)

A unit hydrograph (UH) is the hypothetical unit response of a watershed (in terms of peak discharge, runoff volume and timing) to a unit input of rainfall. It can be defined as the **direct runoff** hydrograph resulting from one unit (e.g., one mm or one inch) of **effective rainfall** occurring uniformly over that watershed at a uniform rate over a unit period of time, D. As a UH is applicable only to the direct runoff component of a hydrograph (i.e., surface runoff), a separate determination of the baseflow component is required.

Hidrograma do escoamento direto provocado numa secção de um curso de água por uma precipitação útil ou efetiva, considerada unitária, com intensidade constante no tempo e aproximadamente uniforme sobre toda a bacia hidrográfica e com duração D.

- 155



M.M.Portela (2019/2020) ---- 156

CONCEITOS GERAIS – HUD / GENERAL CONCEPTS – unit hydrograph model,

Unit hydrograph with duration D, UHD

ELEMENTARY CONCEPTS RELATED TO THE HUD (cont.)

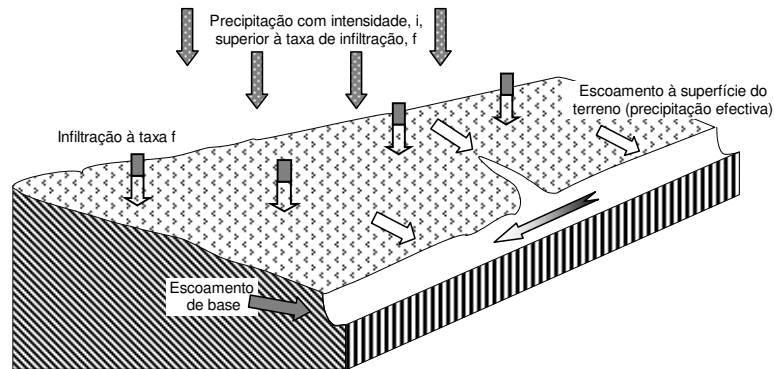
A unit hydrograph (UH) is the hypothetical unit response of a watershed (in terms of peak discharge, runoff volume and timing) to a unit input of rainfall. It can be defined as the **direct runoff** hydrograph resulting from one unit (e.g., one mm or one inch) of **effective rainfall** occurring uniformly over that watershed at a uniform rate over a unit period of time, D. As a UH is applicable only to the direct runoff component of a hydrograph (i.e., surface runoff), a separate determination of the baseflow component is required.

Hidrograma do escoamento direto provocado numa secção de um curso de água por uma precipitação útil ou efetiva, considerada unitária, com intensidade constante no tempo e aproximadamente uniforme sobre toda a bacia hidrográfica e com duração D.

- 157

EXCESS or EFFECTIVE or NET RAINFALL: part of the rainfall that contributes to the increase in the observed flow - ... which is NOT lost in terms of the observed flow

PRECIPITAÇÃO EFETIVA parcela da precipitação que contribui de facto para o escoamento ... que NÃO se perde para o escoamento

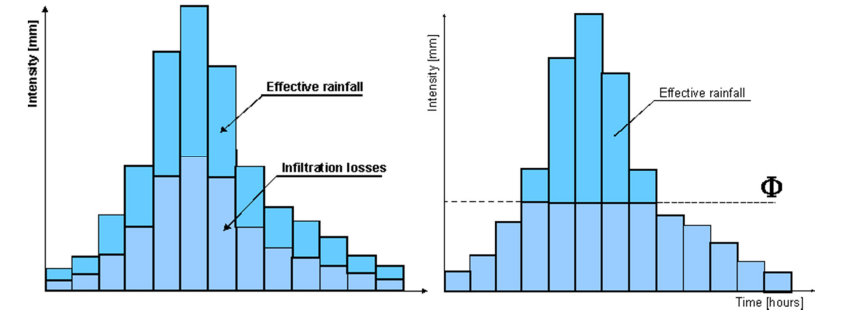


Effective, excess or net rainfall: rainfall that is neither retained on the land surface nor infiltrated into the soil = (observed rainfall - abstractions or rainfall losses).

VOLUME OF THE EXCESS RAINFALL = VOLUME DIRECT RUNOFF

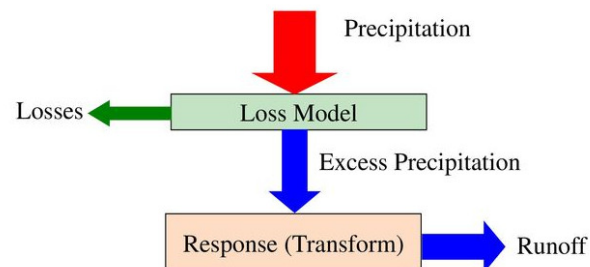
Precipitation abstractions or losses – difference between total rainfall or simply rainfall (most of the time the attribute total is omitted) and excess rainfall.

Perda de precipitação (para o escoamento): diferença entre a precipitação (total) associada a um dado acontecimento pluvioso e a correspondente precipitação.



Loss models

- A loss model represents all of the processes that abstract or remove water from the gross rainfall volume.

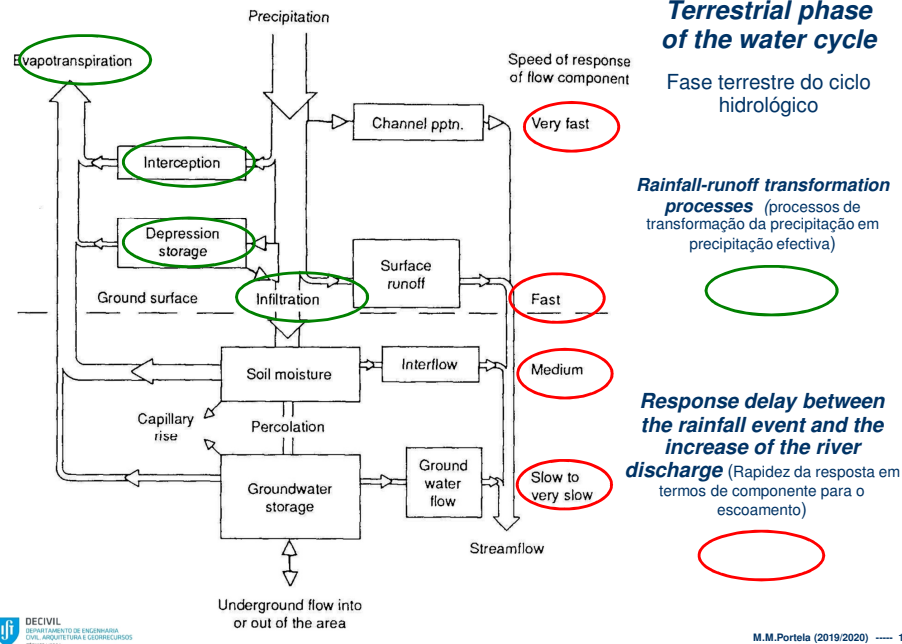


Processes responsible for the rainfall losses, i.e., for the transformation of the total rainfall into excess rainfall

- Interception** – during exceptional heavy precipitations, such as those that originate floods, these losses are minor and unimportant
- infiltration** – the foremost relevant process in terms precipitation losses
- Water storage** – in the surface depressions
- Evaporation and evapotranspiration** – under the climatic constraints of Portugal unimportant as for the flood events

Processos envolvidos na transformação da precipitação em precipitação efetiva

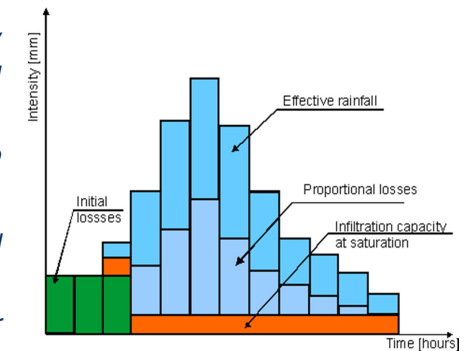
- Interceção** – as perdas por interceção durante precipitações intensas excecionais, como as que determinam a ocorrência de cheias, são praticamente desprezáveis.
- Infiltração** – de longe, o mais significativo processo de perda da precipitação.
- Armazenamento** em depressões do solo.
- Evaporação e a evapotranspiração** – no contexto do clima em Portugal, praticamente desprezáveis.



Based on a given a hyetograph, there are several models to identify the rainfall losses and the resulting excess rainfall hyetograph.

Most of those models consider two type of losses:

- ✓ the **initial ones** or initial abstractions and
- ✓ the **continuous ones** or continuous abstractions.



São vários os modelos para identificar num hietograma observado as perdas por precipitação e o consequente hietograma da precipitação efectiva

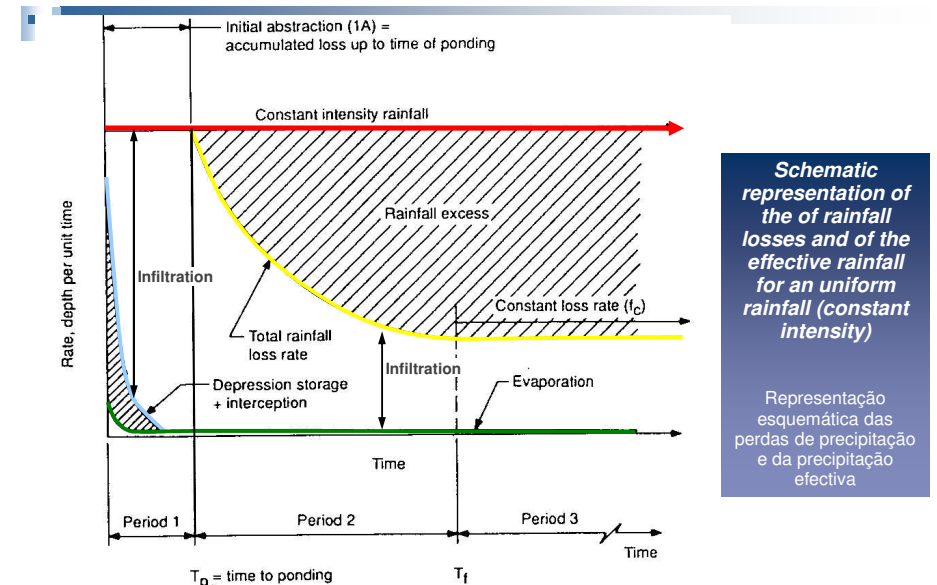
Frequentemente, tais modelos consideram dois tipos de perdas: uma perda inicial e uma perda contínua.

The initial abstractions may be relevant in the initial moments of the rainfall event, because the watershed may still have some capacity to intercept the water, to store the water in the depressions and to promote the infiltration.

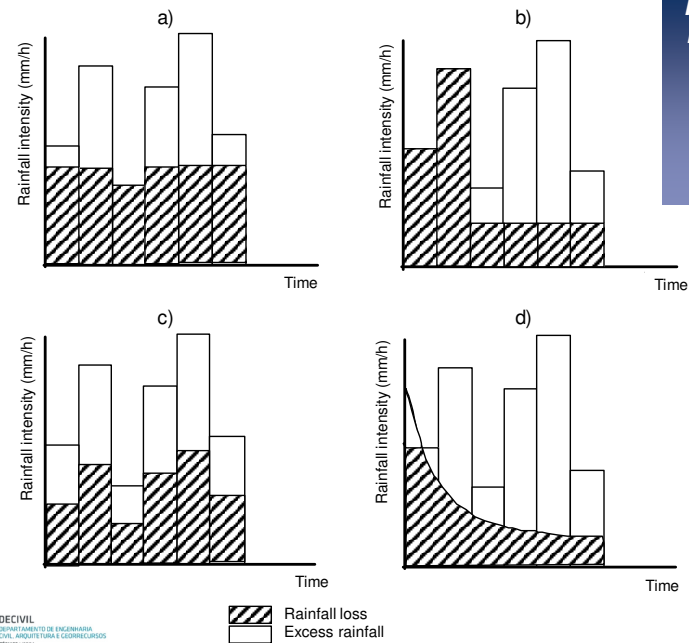
After a while, such initial capacity is satisfied and the more relevant losses are the continuous ones which will decrease along time due to the decrease of the infiltration rate.

A perda inicial pode assumir algum relevo nos primeiros instantes de ocorrência da precipitação em consequência da maior capacidade inicial da bacia hidrográfica para interceptar, para armazenar em depressões e para infiltrar a água da chuva.

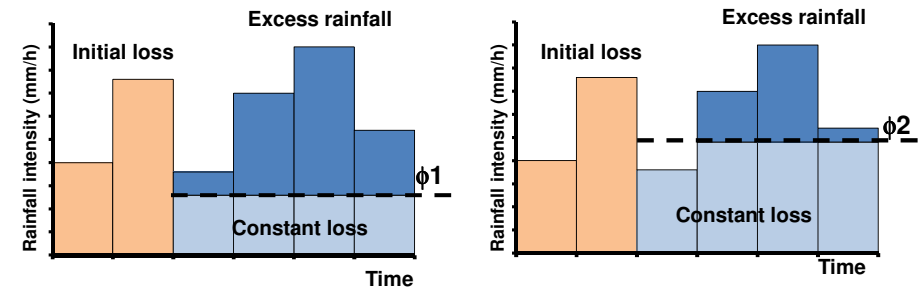
Uma vez satisfeita tal capacidade inicial, os modelos passam a considerar a perda contínua que, em rigor, deveria decrescer ao longo da duração da precipitação, por decréscimo da taxa de infiltração.



Time to ponding – when the land surface becomes saturated (from rain) and ponding of water occurs in the form of surface runoff moving towards the river network (tempo de encharcamento: instante de formação, à superfície do terreno, de uma película de água que se encaminha para a rede de drenagem)



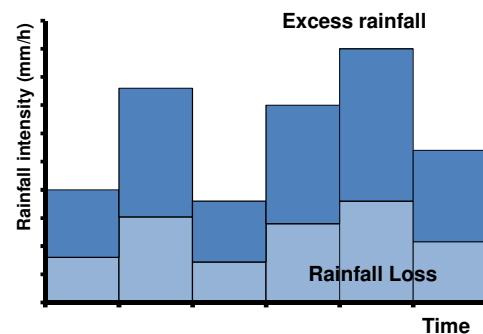
ϕ index model (Método do índice ϕ)



The **index ϕ** is defined as a **constant rate of abstraction** such that above it the surplus of the rainfall is considered as **excess/effective rainfall**. The index integrates all the losses that occur in the process of the runoff formation (interception, retention, evaporation and infiltration) and can be combined or not with initial abstractions. For very exceptional rainfall values with significant depths, interception and retention in depressions might be neglected

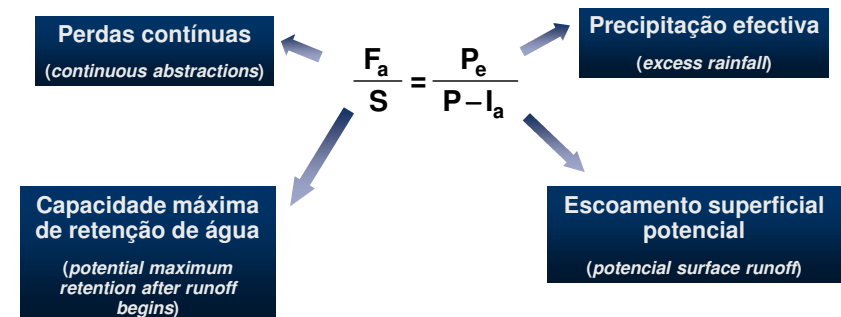
Method of W index (proportional distribution)

The proportional distribution consists in allocating the losses during the rainfall event proportionally to the quantities of rainfall fallen in each time interval. The increments of the effective rainfall are obtained by reducing the increments of the global rainfall by the W%.



Método do SCS (Soil Conservation Service)

Admite que, na sequência de um acontecimento pluvioso intenso, a **razão** entre a **altura de precipitação retida** na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial (ou seja, as **perdas contínuas**) e a **capacidade máxima de retenção de água** na bacia é igual à **razão** entre a **precipitação efectiva** e o **escoamento superficial potencial**.



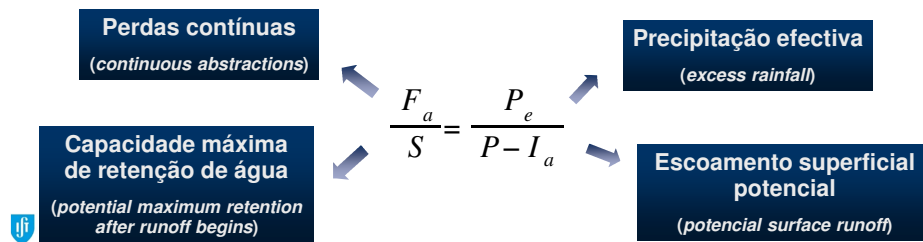
Método do SCS (Soil Conservation Service)

Altura de precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial: **Fa = perdas contínuas.**

Capacidade máxima de retenção de água na bacia: S = grandeza convencional, entendida como a capacidade máxima de armazenamento de água na bacia hidrográfica quando no solo, nas depressões do terreno e nos obstáculos que interceptam a chuva fosse atingido um estado de intensa saturação que se pudesse admitir corresponder a uma taxa de infiltração a tender para zero; nestas circunstâncias as intensidades da precipitação total e efectiva seriam iguais.

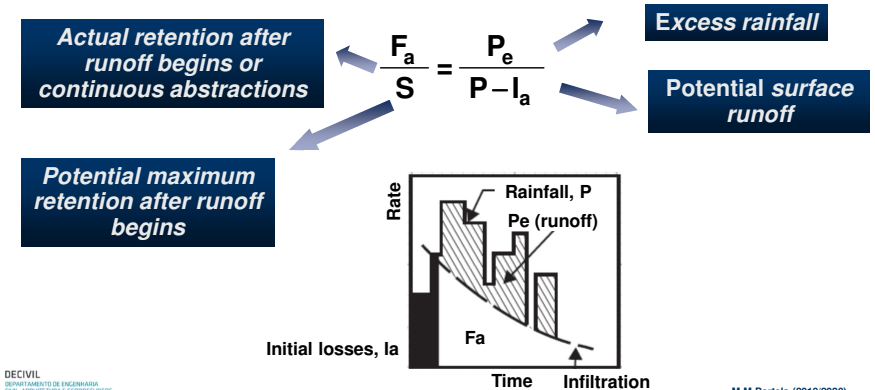
Precipitação efectiva: Pe

Escoamento superficial potencial: P-la = precipitação deduzida das perdas iniciais que ocorrem até ao encharcamento da superfície.



Soil Conservation Service Model for rainfall losses

Assumption: the ratio between the rainfall depth retained in the watershed after the beginning of the surface runoff (that is, the continuous losses) and a conceptual entity identified as the potential maximum retention is equal to the ratio between the excess rainfall and the potential surface runoff.



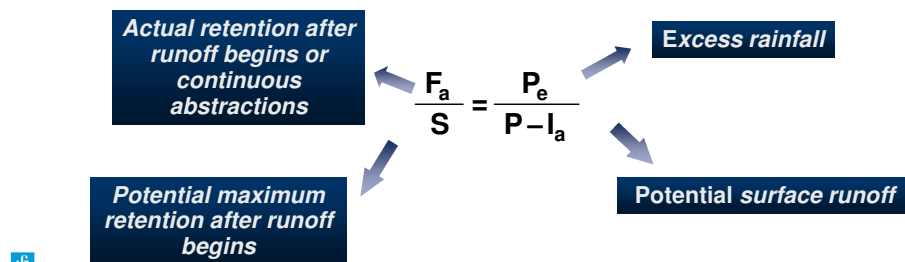
Soil Conservation Service Model for rainfall losses

rainfall depth retained in the watershed after the beginning of the surface runoff: Fa = continuous losses.

potential maximum retention: S = conventional entity that aims at representing the maximum water storage capacity in the watershed when the soil, the depressions of the terrain and the obstacles that intercept the rain were totally "saturated" resulting in an infiltration rate tending to zero; under these circumstances the intensities of the total and effective precipitation would be equal

Excess rainfall: Pe

Potential surface runoff: P-la = rainfall minus the initial losses.



United States
Department of
Agriculture
Natural
Resources
Conservation
Service

Part 630 Hydrology
National Engineering Handbook

Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall



National
engineering
handbook, 2004
section 4 capítulo
10

(210-VI-NEH, July 2004)



The **runoff curve number** (also called a **curve number** or simply **CN**) is an **empirical** parameter used in **hydrology** for predicting direct **runoff** or **infiltration** from **rainfall** excess.^[1] The curve number method was developed by the **USDA Natural Resources Conservation Service**, which was formerly called the **Soil Conservation Service** or **SCS** — the number is still popularly known as a "SCS runoff curve number" in the literature. The runoff curve number was developed from an **empirical analysis** of runoff from small catchments and hillslope plots monitored by the USDA. It is widely used and is an efficient method for determining the approximate amount of direct runoff from a **rainfall** event in a particular area.

The runoff curve number is based on the area's hydrologic soil group, **land use**, treatment and hydrologic condition. References, such as from USDA^[1] indicate the runoff curve numbers for characteristic land cover descriptions and a hydrologic soil group.

The runoff equation is

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

where

Q is **runoff** ([L]; in)

P is **rainfall** ([L]; in)

S is the potential maximum **soil moisture** retention after runoff begins ([L]; in)

I_a is the initial abstraction ([L]; in), or the amount of water before runoff, such as **infiltration**, or rainfall interception by vegetation; and it is generally assumed that $I_a = 0.2S$

The runoff curve number, CN , is then related

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

CN has a range from 30 to 100; lower numbers indicate low runoff potential while larger numbers are for increasing runoff potential. The lower the curve number, the more permeable the soil is.

-- 174

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

SCS model for rainfall losses (cont.)

$$P = P_e + I_a + F_a \Rightarrow F_a = P - P_e - I_a \quad (\text{mass equation})$$

$$\frac{P - P_e - I_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

$$P^2 - P P_e - P I_a - P I_a + P_e I_a + I_a^2 = S P_e$$

$$(P - I_a)^2 = P_e [(P - I_a) + S]$$

$$Q = P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{Runoff equation, } Q \text{ (excess rainfall, } P_e)$$

$$I_a = \psi S$$

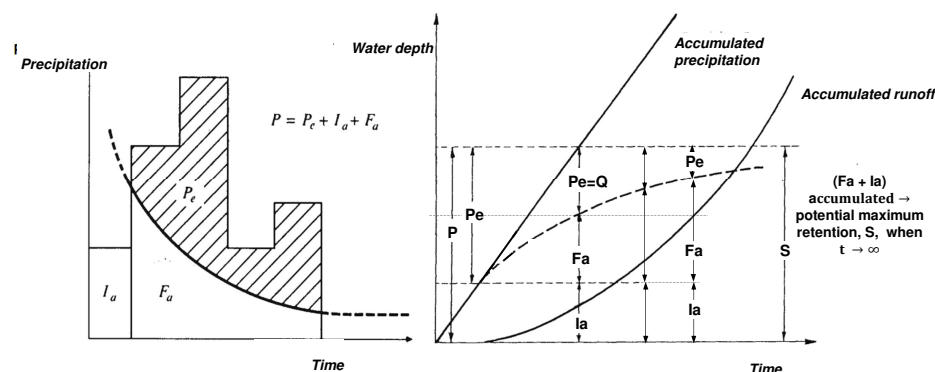
$$Q = P_e = \frac{(P - \psi S)^2}{P + (1 - \psi) S}$$

$$Q = P_e = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$$

$P < 0.2 S$ ou $P < \psi S$ (under design flood conditions $\psi = 0$ for Portugal)

-- 175

Soil Conservation Service Model for rainfall losses



Variables and relationship of the SCS model for precipitation losses

S , potential maximum retention: depends on the type of soil, its use and coverage by means of the curve number, CN .

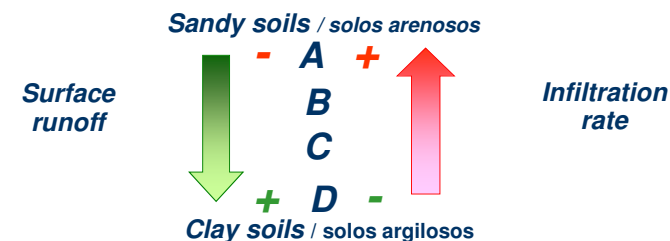
$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

(S in mm, top, or in inches, bottom)

CN depends on the type of soil, its use, coverage and antecedent moisture conditions.

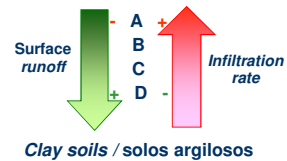
From an hydrologic point of view, the types of soils are A (low runoff potential and high infiltration rate – sand, ...), B, C e D (high runoff potential and very low infiltration rate – clay, ...).



Hydrologic Soil Group, HSG

- A** Sand, loamy sand, or sandy loam
B Silt loam or loam
C Sandy clay loam
D Clay loam, silty clay loam, sandy clay, silty clay, or clay

Sandy soils / solos arenosos



Group A: sand, loamy sand or sandy loam. Low runoff potential and high infiltration rates even when thoroughly wetted. They consist chiefly of deep, well to excessively drained sands or gravels and have a high rate of water transmission (> 0.30 in/hr)

Group B: silt loam or loam. Moderate infiltration rate when thoroughly wetted and consists chiefly or moderately deep to deep, moderately well to well drained soils with moderately fine to moderately coarse textures (rate of water transmission 0.15 – 0.30 in/hr)

Group C: sandy clay loam. Low infiltration rates when thoroughly wetted and consist chiefly of soils with a layer that impedes downward movement of water and soils with moderately fine to fine structure (rate of water transmission 0.05 – 0.15 in/hr)

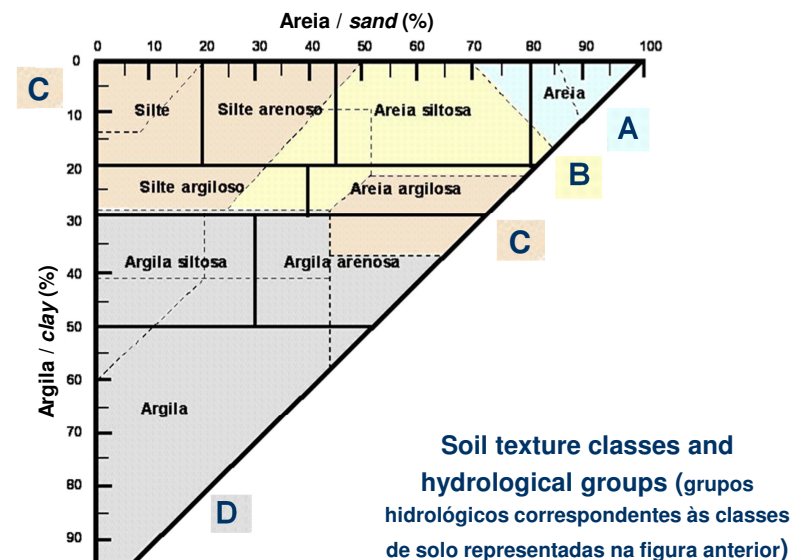
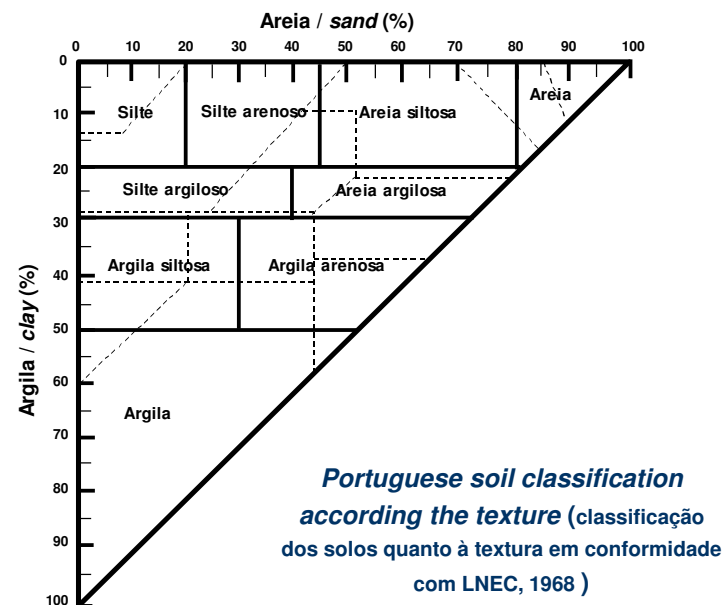
Group D: clay loam, silty clay loam, sandy clay, silty clay or clay. They have the highest runoff potential. Very low infiltration rates when thoroughly wetted and consist chiefly of clay soils with a high swelling potential, soils with a permanent high water table, soils with a claypan or clay layer at or near the surface and shallow soils over nearly impervious material (rate of water transmission 0.00 – 0.15 in/hr)

Hydrologic soil properties classified by soil texture

(adapted from Wanielista, M., Kersten, R., Eaglin, R., 1997, Hydrology: Water quantity and quality control, 2nd edition, John Wiley and Sons, Inc., USA, p. 149)

Texture class		Effective water capacity (in/in)	Minimum infiltration rate (in/hr)	SCS hydrologic group, HSG
English	Portuguese*			
Sand	Solo arenoso	0.35	8.27	A
Loamy sand	Solo arenoso franco	0.31	2.41	A
Sandy loam	Solo franco arenoso	0.25	1.02	B
Loam	Solo franco	0.19	0.52	B
Silt loam	Solo franco siltoso	0.17	0.27	C
Sandy clay loam	Solo franco argiloso arenoso	0.14	0.17	C
Clay loam	Solo franco argiloso	0.14	0.09	D
Silty clay loam	Solo franco argiloso siltoso	0.11	0.06	D
Sandy clay	Solo argiloso arenoso	0.09	0.05	D
Silty clay	Solo argiloso siltoso	0.09	0.04	D
Clay	Solo argiloso	0.08	0.02	D

* A designação de silte pode ser substituída por limo e, consequentemente, a de siltoso, por limoso



UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO	TIPO DE SOLO			
	A	B	C	D
Zonas Cultivadas: Sem medidas de conservação do solo Com medidas de conservação do solo	72 62	81 71	88 78	91 81
Pastagens ou Baldios: Em más condições Em boas condições	68 39	79 61	86 74	89 80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou Zonas Florestais: Cobertura má, sem 'Mulch' Boa cobertura	45 25	66 55	77 70	83 77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios, etc. Boas condições: Relva cobrindo mais de 75% da área Condições razoáveis: Relva cobrindo de 50 a 75% da área	 39 49	 61 69	 74 79	 80 84
Zonas comerciais e de escritórios (85% de área impermeável)	89	92	94	95
Zonas industriais (72% de área impermeável)	81	88	91	93
Zonas Residuais: Áreas médias dos lotes Percentagem média impermeável				
< 500 m ² 65 %	77	85	90	92
1000 m ² 38 %	61	75	83	87
1300 m ² 30 %	57	72	81	86
2000 m ² 25 %	54	70	80	85
4000 m ² 20 %	51	68	79	84
Parques de Estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e Estradas: Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais Gravilha Terra	98 76 72	98 85 82	98 89 87	98 91 89

**Values of CN for
antecedent
moisture
conditions of type
II, AMC II (average)**

Tabelas de valores de CN
para condições
antecedentes de humidade
do tipo II (AMC II) (normais)

-- 182

UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO	TIPO DE SOLO			
	A	B	C	D
Zonas Cultivadas: Sem medidas de conservação do solo Com medidas de conservação do solo	72 62	81 71	88 78	91 81
Pastagens ou Baldios: Em más condições Em boas condições	68 39	79 61	86 74	89 80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou Zonas Florestais: Cobertura má, sem 'Mulch' Boa cobertura	45 25	66 55	77 70	83 77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios, etc. Boas condições: Relva cobrindo mais de 75% da área Condições razoáveis: Relva cobrindo de 50 a 75% da área	 39 49	 61 69	 74 79	 80 84
Zonas comerciais e de escritórios (85% de área impermeável)	89	92	94	95
Zonas industriais (72% de área impermeável)	81	88	91	93
Zonas Residuais: Áreas médias dos lotes Percentagem média impermeável				
< 500 m ² 65 %	77	85	90	92
1000 m ² 38 %	61	75	83	87
1300 m ² 30 %	57	72	81	86
2000 m ² 25 %	54	70	80	85
4000 m ² 20 %	51	68	79	84
Parques de Estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e Estradas: Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais Gravilha Terra	98 76 72	98 85 82	98 89 87	98 91 89

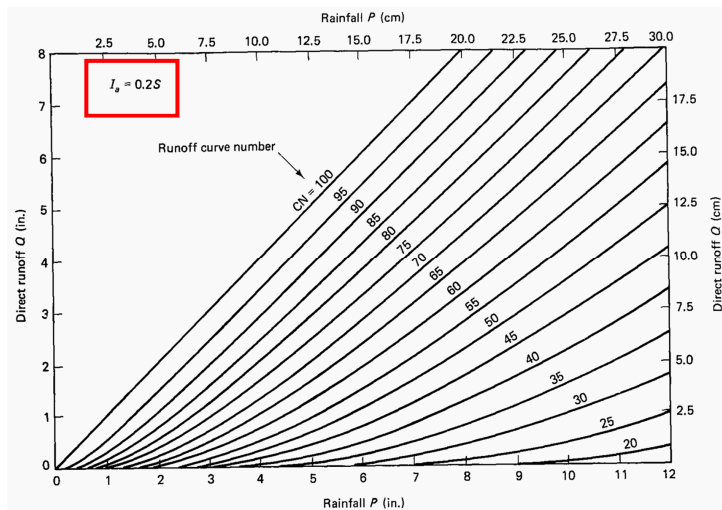
**Values of CN for
antecedent
moisture
conditions of type
II, AMC II (average)**

Tabelas de valores de CN
para condições
antecedentes de humidade
do tipo II (AMC II) (normais)

**AMC III – wet conditions
as those under flood
occurrences (condições
húmidas)**

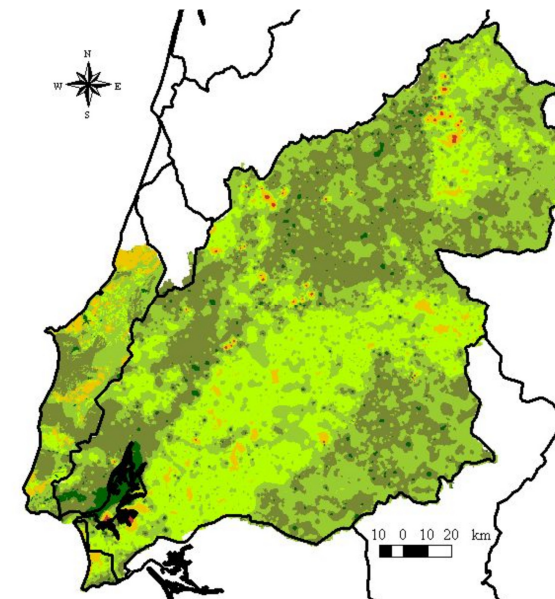
$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0.13 \cdot CN(II)}$$

-- 183



**Relationship among the curve number, the total precipitation and
the excess precipitation or direct runoff**

Curvas relacionando o número de escoamento, a precipitação total e a
precipitação efectiva



$$Q = P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

$$I_a = \Psi S$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0.13 \cdot CN(II)}$$

**Maps of CN for average
antecedent moisture
conditions , AMC II**

Under flood conditions, the SCS model over estimates the precipitation losses and, consequently, under estimates the excess rainfall, which is dangerous, in terms of safety criteria. However, this is an intrinsic characteristics of the continuous losses model and therefore little can be done. Despite its questionable application to a given watershed, it provides useful information when comparing the flood behavior of different watersheds

Originally – $\Psi = 0.2$

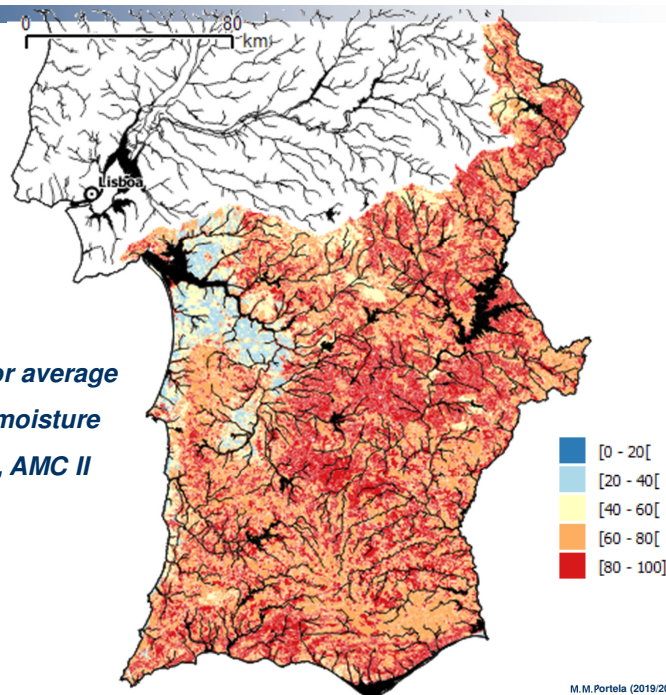
For Portugal – $\Psi = 0.0$

$$Q = P_e = \frac{(P - \Psi S)^2}{P + (1 - \Psi) S}$$

(O modelo de perdas do SCS aparenta sobrestimar as perdas de precipitação e, consequentemente, subestimar as correspondentes precipitações efectivas. Tal facto não decorre tanto das perdas iniciais de precipitação, que podem até ser eliminadas adoptando $\Psi=0$ na equação que define o modelo, mas fundamentalmente das perdas contínuas que o modelo introduz ao longo da chuvada.

.. admite-se que, em termos relativos, permita analisar comparativamente as perdas decorrentes de diferentes utilizações/ocupações do solo, como sejam as perdas decorrentes da intensificação da ocupação urbana da bacia)

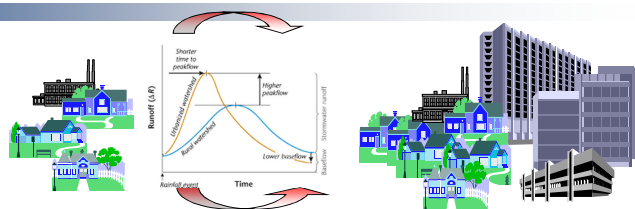
Maps of CN for average antecedent moisture conditions , AMC II



M.M.Portela (2019/2020) ---- 186

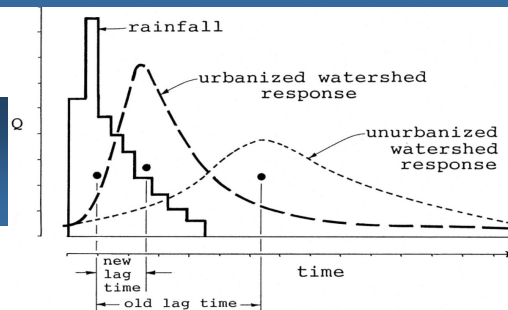
M.M.Portela (2019/2020) ---- 187

Effect of the increase in the urbanized areas on the floods



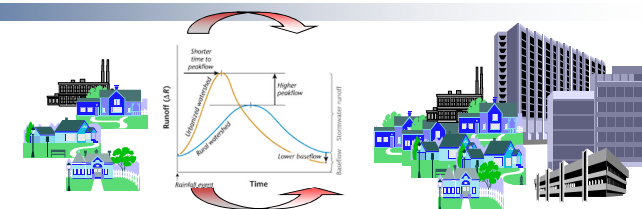
↑ impervious area ↓ infiltration ↓ rainfall losses ↑ excess rainfall
↓ surface roughness ↑ flow velocity ↓ time of concentration ↑ intensity of the design rainfall ↑ peak flood discharges

FASTER CONCENTRATION OF THE RIVER DISCHARGES WITH HIGHER PEAK DISCHARGES



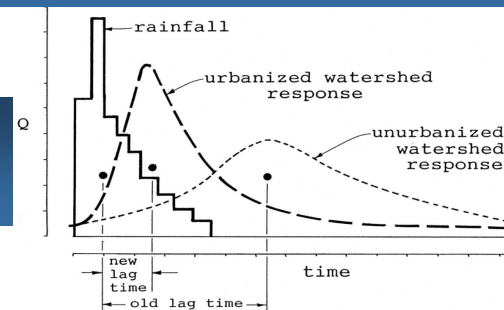
- 188

Effect of the increase in the urbanized areas on the floods



↑ impervious area ↓ infiltration ↓ rainfall losses ↑ excess rainfall
↓ surface roughness ↑ flow velocity ↓ time of concentration ↑ intensity of the design rainfall ↑ peak flood discharges

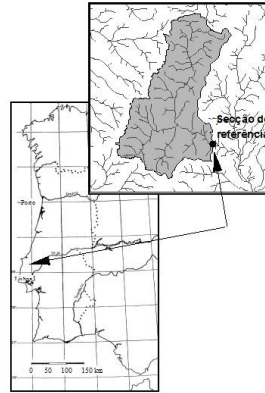
FASTER CONCENTRATION OF THE RIVER DISCHARGES WITH HIGHER PEAK DISCHARGES



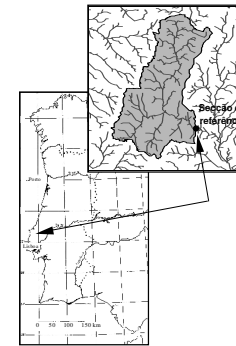
- 189

Effect of the increase of the urban areas in the peak flood discharge – a case study

		Situação actual	Cenário 1	Cenário 2
Ocupação urbana	Área (km ²)	2.5	6.9	13.8
	Percentagem da área (%)	7	20	40
Número de escoamento (-)		86	89	92
Tempo de concentração (h)		1.84	1.64	1.45
Período de retorno de T=100 anos	Precipitação de projecto (mm)	37.5	36.0	34.4
	Perdas de precipitação (mm)	19.7	16.8	13.4
	Precipitação efectiva (mm)	17.9	19.2	20.9
	Intensidade da precipitação efectiva (mm/h)	9.7	11.7	14.4
	Caudal de ponta de cheia (m ³ /s)	91	110	135
Período de retorno de T=500 anos	Precipitação de projecto (mm)	44.9	43.1	41.2
	Perdas de precipitação (mm)	21.5	18.2	14.4
	Precipitação efectiva (mm)	23.4	24.9	26.8
	Intensidade da precipitação efectiva (mm/h)	12.7	15.2	18.5
	Caudal de ponta de cheia (m ³ /s)	119	142	173



Effect of the increase of the urban areas in the peak flood discharge (efeito do aumento das áreas urbanizadas nos caudais de ponta de cheia)



$$t_c = \frac{100}{0.3048^{0.8}} \times \frac{L^{0.8} \times \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{1900 \times Sm^{0.5}}$$

tc time of concentration, min,

L length of the main river, m,

Sm average slope of the surface of the watershed, %,

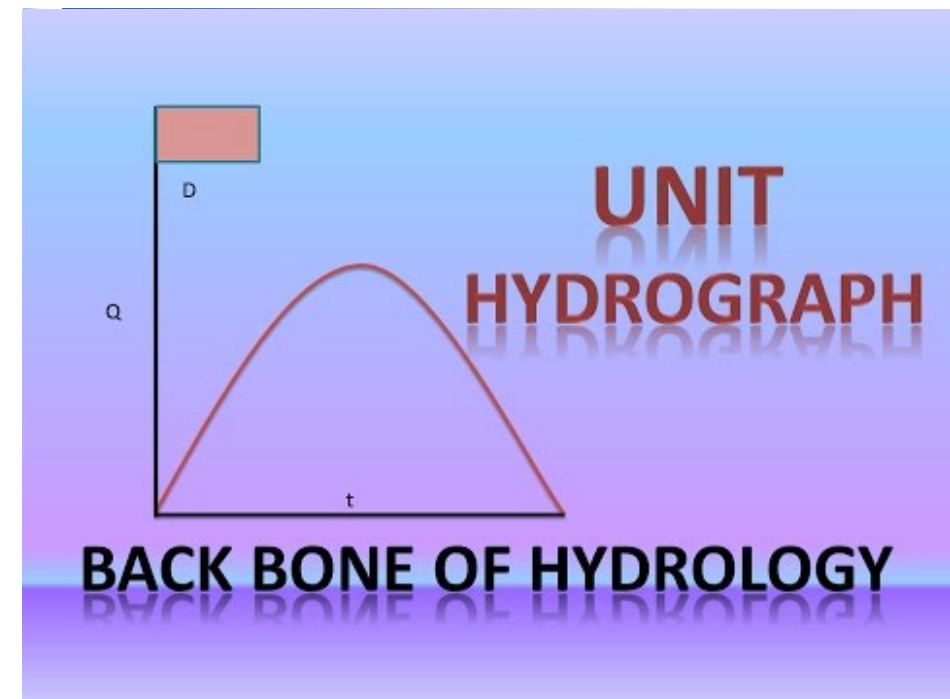
CN curve number – in Portuguese **NÚMERO DE ESCOAMENTO**.

The present regulatory and legal Portuguese framework provides the “ways” in terms of flood protection and land management and planning. Accordingly, they should be enough to prevent the occupation of the flood plains.

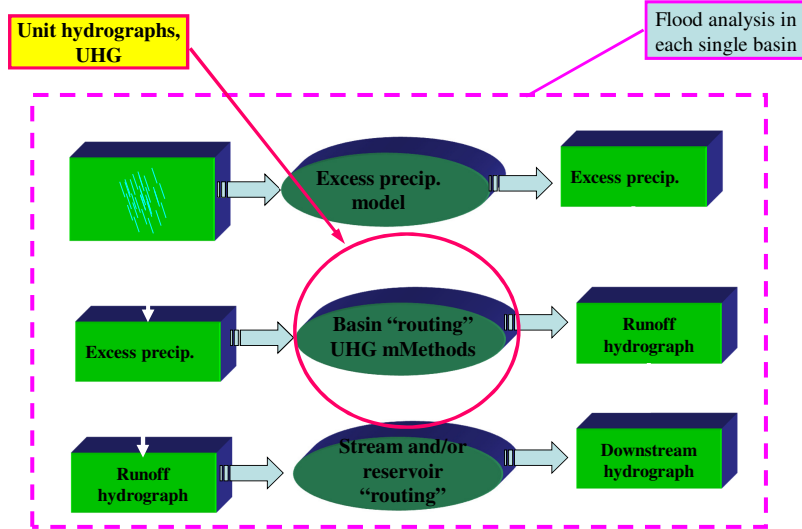
However, in order to pursue a sustainable development strategy, it is also essential to have the mechanisms required to implement the legal documents. Such mechanisms must be coordinate and their hierarchy and spatial scope well identified (a policy issue and a governmental willingness which often fail!).

Admite-se que as disposições regulamentares e as orientações delineadas pelos diferentes instrumentos legais permitem travar a ocupação frequentemente desmesurada e desorganizada do domínio hídrico, proporcionam os meios legais para a defesa eficaz contra cheias em rios e enquadram, tal defesa, no ordenamento do território.

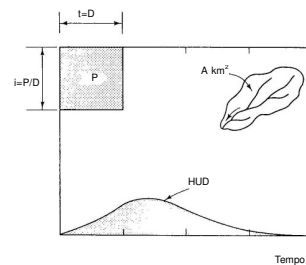
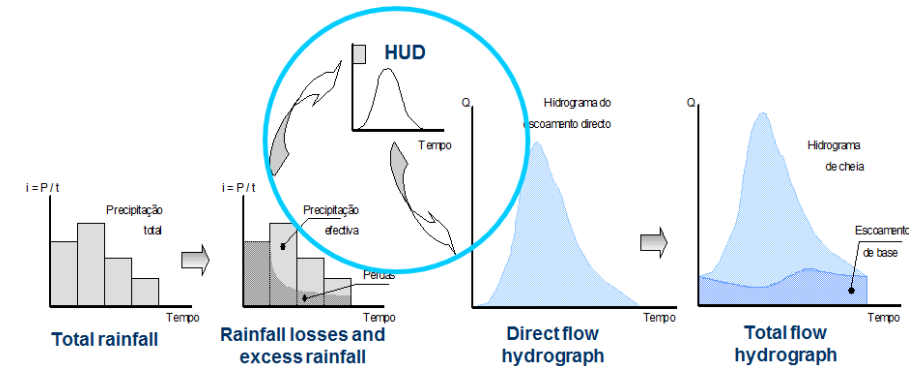
Contudo, para a prossecução de uma estratégia de desenvolvimento sustentável é essencial a existência de mecanismos de efetivação do conteúdo daqueles instrumentos. Destaca-se, também, a necessidade de coordenação mútua desses mecanismos, devendo estar bem clarificados os seus âmbitos territoriais e a sua hierarquização.



The unit hydrograph model – rainfall-runoff assessment based on the HUD

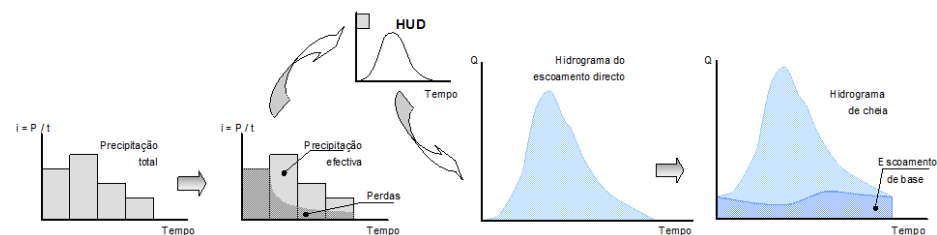


The unit hydrograph is nothing but a mathematical model (kernel) that transforms the net rainfall into **direct runoff** (Modelo de transformação da precipitação efectiva de projecto em hidrograma de cheia: modelo do hidrograma unitário)



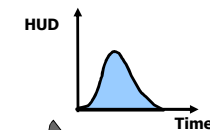
Unit hydrograph with duration D : the direct runoff hydrograph resulting from an unit depth of excess rainfall produced by a storm of uniform intensity and specified duration, D

(hidrograma unitário com a duração D , HUD: hidrograma do escoamento directo provocado numa secção de um curso de água por uma precipitação útil ou efetiva, considerada unitária, com intensidade constante no tempo e aproximadamente uniforme sobre a bacia hidrográfica e com duração D)

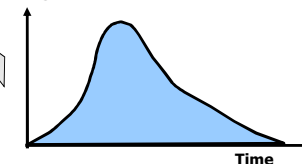


Unit rainfall "stimulus", P , with duration D ("estímulo" com valor unitário P ocorrendo durante D)

HUD = Transfer function
(função de transferência)



Discharge

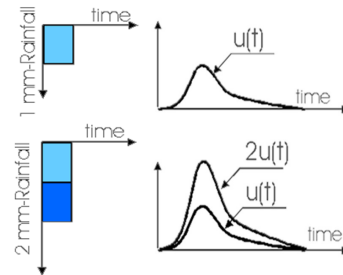


Watershed "answer" = direct runoff flood hydrograph ("resposta" da bacia hidrográfica - hidrograma de cheia correspondente ao escoamento directo)

The application of the unit hydrograph theory uses two principles (a aplicação da teoria do hidrograma unitário processa-se mediante a aplicação de dois princípios):

- ✓ **Princípio da proporcionalidade:** o hidrograma do escoamento direto provocado numa dada secção de um curso de água por uma precipitação efetiva de n unidades, de intensidade constante no tempo e uniforme sobre a bacia hidrográfica e com duração D , obtém-se multiplicando por n as ordenadas do respetivo HUD.

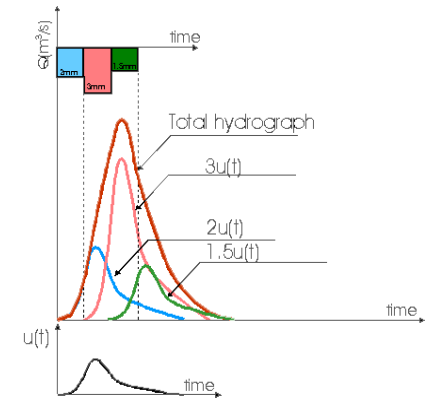
- ✓ **Principle of proportionality:** the direct runoff volumes produced by two different excess rainfall distributions are in the same proportion as the excess rainfall volume. This means that the ordinates of the UH are directly proportional to the storm intensity. If storm A produces a given hydrograph and Storm B is equal to storm A multiplied by a factor, then the hydrograph produced by storm B will be equal to the hydrograph produced by storm A multiplied by the same factor.



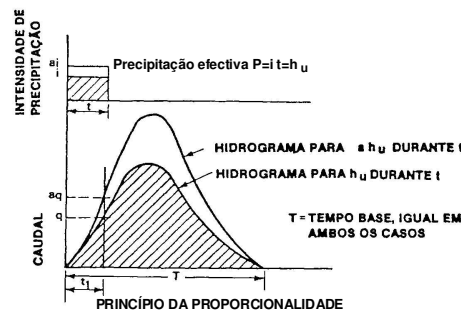
— 198

Princípio da sobreposição: o hidrograma do escoamento direto provocado numa secção de um curso de água pela sucessão de vários acontecimentos de precipitação efetiva, cada um com a mesma duração D e com intensidade constante e uniforme sobre a bacia hidrográfica, obtém-se pela sobreposição, com o devido desfasamento no tempo, dos hidrogramas que resultam, pelo princípio da proporcionalidade do HUD, daqueles sucessivos acontecimentos.

- ✓ **Principle of superposition:** the time distribution of the direct runoff is independent of the concurrent runoff from antecedent storm events. This implies that the direct runoff responses can be superposed. **If storm C is the result of adding storms A and B, the hydrograph produced by storm c will be equal to the sum of the hydrographs produced by storm A and B.**

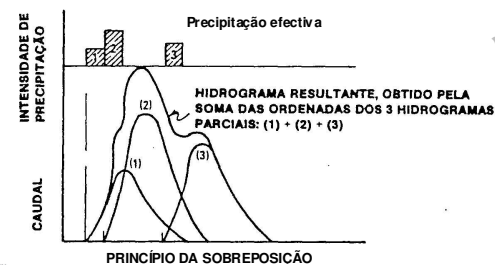


— 199



A aplicação da teoria do hidrograma unitário processa-se mediante a aplicação de dois princípios:

- ✓ **princípio da proporcionalidade (principle of proportionality);**



- ✓ **princípio da sobreposição (principle of superposition).**

... bacia hidrográfica como um sistema linear (watershed as a linear system)

- ✓ **The unit hydrograph theory has two fundamental assumptions that support the principles of proportionality and superposition: the watershed is a linear and a time invariant system.**

In a linear system a change in the input origins a change in the output in the same proportion.

A time-invariant system is a system whose output does not depend on time; accordingly, the same stimulus will originate the same response regardless its time of occurrence

- ✓ A teoria do hidrograma unitário admite como pressupostos fundamentais que a bacia hidrográfica se comporta como um sistema linear e invariante no tempo em termos do processo de formação de cheias.

Um sistema diz-se linear quando um acréscimo no estímulo a que à sujeito produz um acréscimo na resposta do sistema na mesma proporção do acréscimo do estímulo, podendo, assim, serem sobrepostas as respostas do sistema a sucessivos estímulos. A invariância temporal pressupõe que o mesmo estímulo causa sempre a mesma resposta.

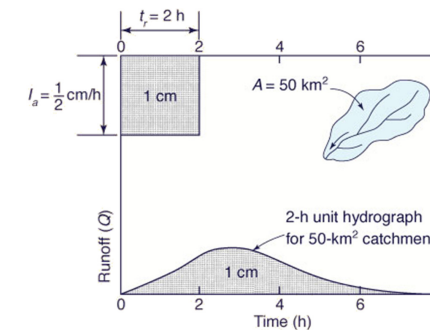
Likelihood of the assumptions of linearity and time invariance:
it is unlikely that the response of the watershed to an excess rainfall can be described as a linear function because the flow rate and thereby the flow velocity are nonlinear functions of the depth of the flow.

Also, the same excess rainfall occurring in different seasons of the year would cause different responses due, for instant, to different surfaces roughness.

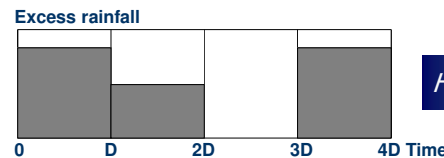
Aproximações inerentes aos pressupostos de linearidade e de invariância temporal... não é provável que a resposta da bacia hidrográfica a uma precipitação efetiva se apresente como uma função linear pois o caudal e, conseqüentemente, a velocidade do escoamento são funções não lineares da altura do escoamento.

... uma mesma precipitação efetiva ocorrendo em épocas do ano distintas pode ocasionar diagramas do escoamento direto distintos, devido, por exemplo, a diferentes desenvolvimentos do coberto vegetal da bacia hidrográfica ... resistências ao escoamento diferentes.

Despite the fact that the hydrologic systems vary along time and are usually deeply nonlinear, the unit hydrograph concept is commonly used because, although it assumes linearity and time invariance, it is a convenient tool to calculate hydrographs and it gives results within acceptable levels of accuracy.



Time interval	Excess rainfall (mm)
0 - D	P1
D - 2D	P2
2D - 3D	P3=0
3D - 4D	P4



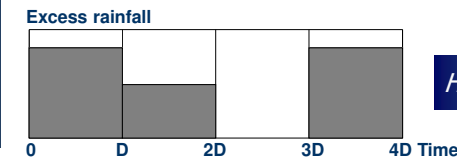
HUD for $P=1$ mm

Principle of proportionality

Principle of superposition

Time in D units	Unit hydrograph for 1 mm excess rainfall with duration D (m ³ /s/mm)	Direct runoff flood hydrograph				At the watershed outlet (m ³ /s)
		Flood hydrograph for each rainfall block				
		P1 (mm)	P2 (mm)	P3=0 (mm)	P4 (mm)	
0	0					
1	u1					
2	u2					
3	u3					
4	u4					
5	u5					
6	0					
7	0					
8	0					
9	0					

Time interval	Excess rainfall (mm)
0 - D	P1
D - 2D	P2
2D - 3D	P3=0
3D - 4D	P4

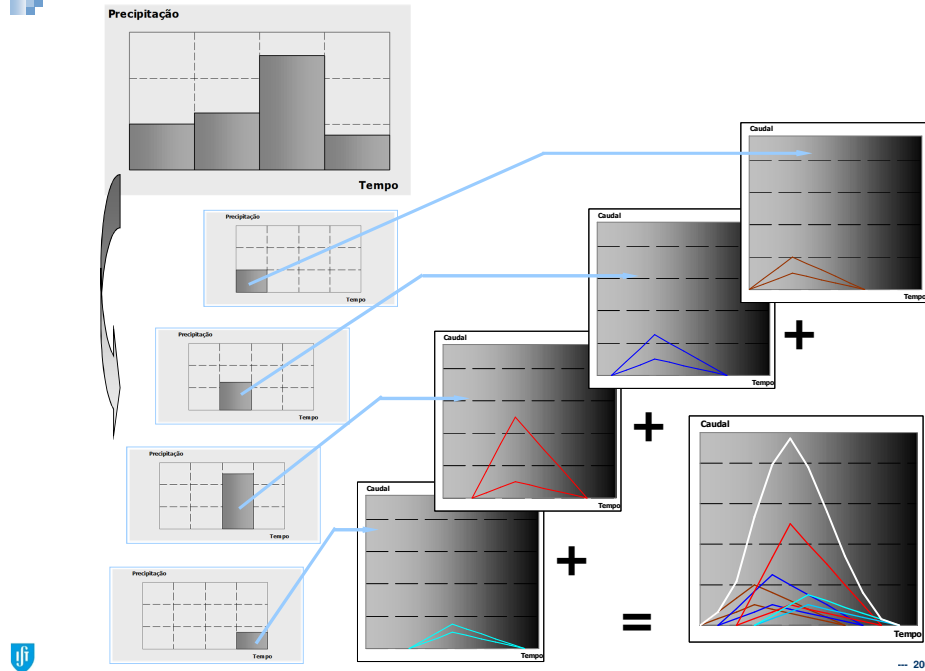


HUD for $P=1$ mm

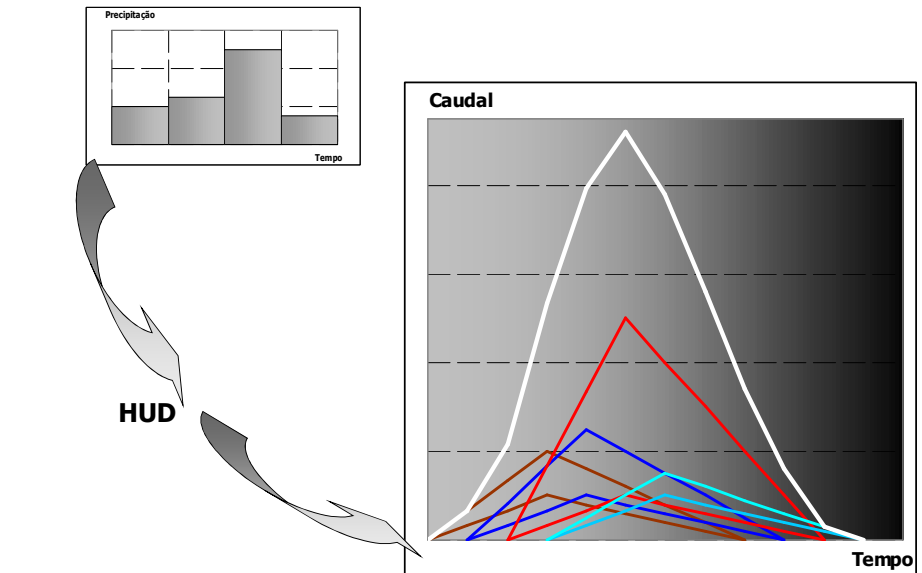
Principle of proportionality

Principle of superposition

Time in D units	Unit hydrograph for 1 mm excess rainfall with duration D (m ³ /s/mm)	Direct runoff flood hydrograph				
		Flood hydrograph for each rainfall block				At the watershed outlet (m ³ /s)
		P1 (mm)	P2 (mm)	P3=0 (mm)	P4 (mm)	
0	0	0	--	--	--	0
1	u1	P1 u1	0	--	--	P1 u1
2	u2	P1 u2	P2 u1	0	--	P1 u2+P2 u1
3	u3	P1 u3	P2 u2	0	0	P1 u3+P2 u2
4	u4	P1 u4	P2 u3	0	P4 u1	P1 u4+P2 u3+P4 u1
5	u5	P1 u5	P2 u4	0	P4 u2	P1 u5+P2 u4+P4 u2
6	0	0	P2 u5	0	P4 u3	P2 u5+P4 u3
7	0	0	0	0	P4 u4	P4 u4
8	0	0	0	0	P4 u5	P4 u5
9	0	0	0	0	0	0



--- 206



HUD

M.M.Portela (2019/2020) --- 207

➤ The model considers that the excess rainfall is uniform in space and time
➡ small watersheds. However, there is no precise definition on the upper limit of the watershed area compatible with such assumption and, accordingly, with the application of the theory of UH.

➤ In fact, the theory was originally developed based on watersheds with areas ranging from 1300 e 8 000 km².

➤ Some authors mention that the UH model should not be applied to basins with areas greater than 5 000 km² in order to ensure that the spatial variability of rainfall is not so pronounced that it may compromise the results of the HUD.

➤ Precipitação uniforme no tempo e no espaço... não existe uma indicação precisa sobre o limite superior da área de uma bacia hidrográfica compatível com a aplicação da teoria do HUD.

➤ De facto, esta teoria foi originalmente desenvolvida com base em bacias hidrográficas com áreas variando entre 1300 e 8000 km²

➤ Autores referem que o hidrograma unitário não deve ser aplicado a bacias com áreas superiores a 5 000 km² por forma a assegurar que a variabilidade espacial da precipitação não é tão acentuada que comprometa os resultados da análise de cheias baseada no HUD

➤ A tendência actual é aplicar a teoria do hidrograma unitário a bacias hidrográficas com menores áreas, compreendidas entre 2.5 e 250 km², tendo ainda tal teoria demonstrado a sua aplicabilidade a bacias com reduzidas áreas, compreendidas entre 0.5 ha e 25 km².

➤ *The current trend is to apply the unit hydrograph model to watersheds with small areas, ranging from 2.5 to 250 km², although the model also proved its applicability to smaller watersheds (0.5 ha to 25 km²)*

M.M.Portela (2019/2020) --- 209

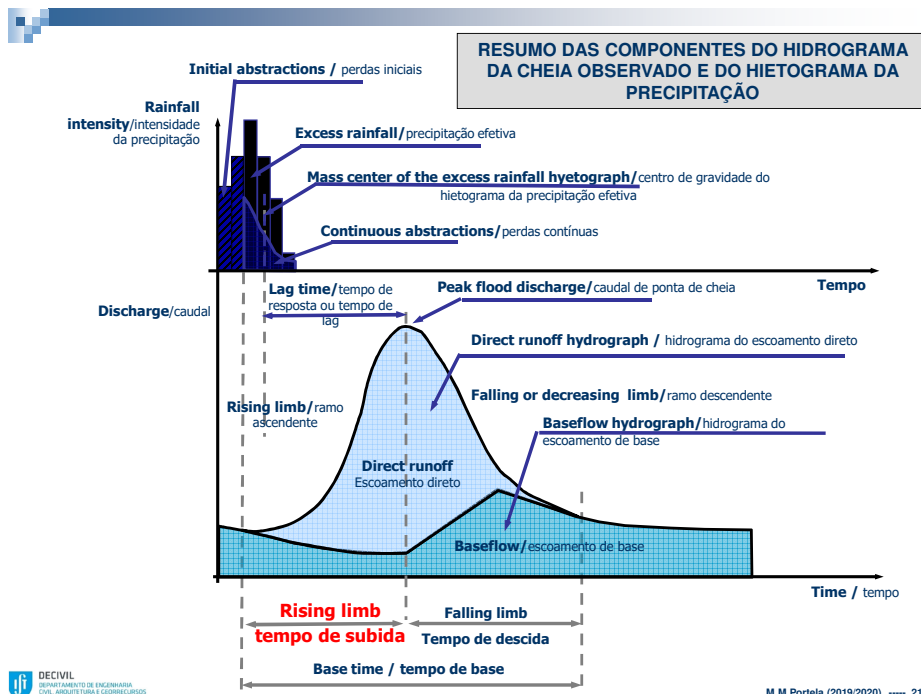
- *There isn't also a precise indication regarding the duration, D , of the excess rainfall that should be considered when defining the unit hydrograph.*
- *However, as the ordinates of the unit hydrograph, of the rainfall hyetograph and the resulting flood hydrograph must be defined based exactly on the same time step, D must be small enough to allow a detailed description of the temporal variability of the rainfall and of the river flood discharges.*

- Também não existe uma indicação precisa quanto à duração, D , da precipitação efetiva associada à definição do hidrograma unitário.
- Na medida em que as ordenadas do hidrograma unitário são discretizadas de D em D , tal duração deve ser suficientemente pequena de forma a permitir descrever com algum pormenor aquele hidrograma.

- ✓ *Although a small value of D enables a more accurate description of the rainfall hyetographs to which the unit hydrograph is going to be applied, as well as of the flood hydrographs thus obtained:*

1. D should not exceed a quarter of the duration of the rising limb.

- ✓ Uma duração D suficientemente pequena, possibilita também mais rigor na descrição temporal dos hietogramas a que o hidrograma unitário vai ser aplicada tendo em vista a obtenção de hidrogramas de cheia ().
1. D não deve exceder um quarto do tempo de subida do hidrograma unitário (PILGRIN e CORDERY, 1992)



2. D should not exceed a fifth to a quarter of the lag time of the watershed or a quarter to a third of the time of concentration of the watershed
3. ... a fifth to a third of the time of concentration.
4. ... a fifth of the duration of the rising limb.
5. D should be between 10 and 30% of the lag time given by the Snyder equation.

2. D não deve exceder um quinto a um quarto do tempo de atraso ou de lag da bacia hidrográfica, ou um quarto a um terço do tempo de concentração de tal bacia (QUINTELA, 1996).
3. D não deve exceder um quinto a um terço do tempo de concentração (RIBEIRO, 1987).
4. D deve ser aproximadamente um quinto do tempo de subida do correspondente hidrograma do escoamento directo (HIPÓLITO, 1987).
5. D deve situar-se entre 10 a 30% do tempo de atraso ou de lag da bacia hidrográfica, avaliado com base na equação desenvolvida por Snyder (VIESSMAN e LEWIS, 1996).

2. *D* should not exceed a fifth to a quarter of the lag time of the watershed or a quarter to a third of the time of concentration of the watershed
3. ... a fifth to a third of the time of concentration of the watershed
4. ... a fifth of the duration of the unit hydrograph
5. *D* should be between 1/5 and 1/3 of the time of concentration given by the Snyder equation

ALMOST EACH AUTHOR HAS ITS OWN VALUES

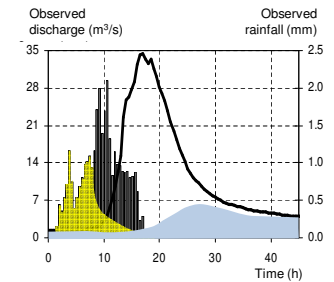
2. *D* não deve exceder ... um quinto a um quarto do tempo de lag da bacia hidrográfica ou um quarto a um terço do tempo de concentração de tal bacia (QUINTELA, 1987).
3. ... um quinto a um terço do tempo de concentração (RIBEIRO, 1987).
4. *D* deve ser ... um quinto da duração do tempo de subida do correspondente hidrograma do rio (POLITO, 1987).
5. *D* deve situar-se entre 20% e 30% do tempo de atraso ou de lag da bacia hidrográfica, avaliado com base na equação desenvolvida por Snyder (VIESSMAN e LEWIS, 1996).

For a given watershed the unit hydrograph can be obtained by:

➤ **Direct approaches**, based on observed flood hydrographs and rainfall hyetographs.

Only applicable if the river section where the unit hydrograph is required coincides with a stream gauging station, which seldom happens!

➤ **Indirect approaches**, based on synthetic unit hydrographs, without requiring discharge data, but, instead, physiographic characteristics of the watersheds where flood analysis will be carried out.



O hidrograma unitário para uma dada bacia hidrográfica pode ser estabelecido por métodos:

➤ Directos, a partir de hidrogramas observados e dos hietogramas da precipitação que os originaram.

Tais métodos só são, contudo, aplicáveis se existirem estações hidrométricas nas secções de referência das bacias hidrográficas para as quais se pretendem estabelecer os hidrogramas unitários.

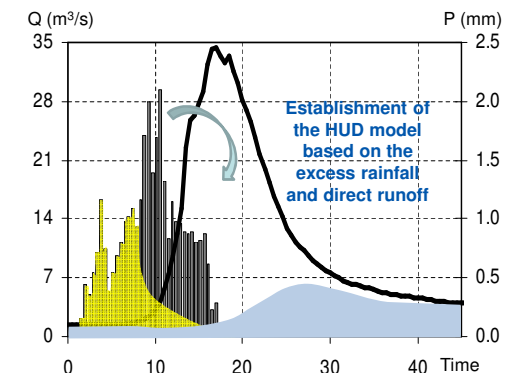
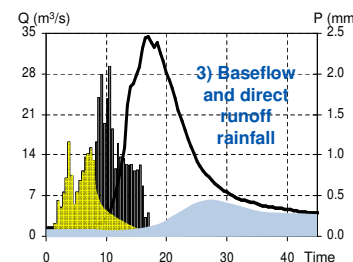
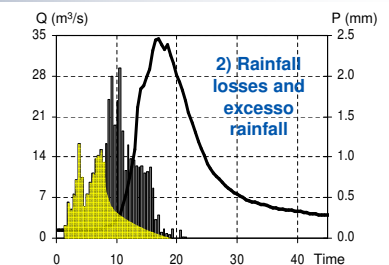
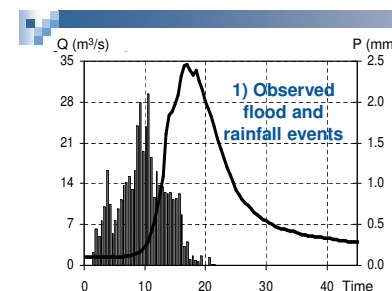
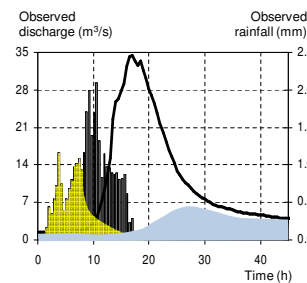
➤ Indirectos, a partir de hidrogramas unitários sintéticos, que não utilizam registos hidrométricos, apoiando-se, antes, em características fisográficas das bacias hidrográficas em que se pretende efectuar a análise de cheias.

Objetivo

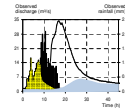
Determinar as ordenadas ui do hidrograma unitário para a duração *D*, HUD pelo **método direto**, ou seja, com base em observações de hidrogramas de cheias dos hietogramas que originaram tais hidrogramas

Objective

To compute the ordinates of the unit hydrograph for the duration *D*, HUD, by applying the direct approach, i.e., based on observed flood hydrograph and hyetograph.

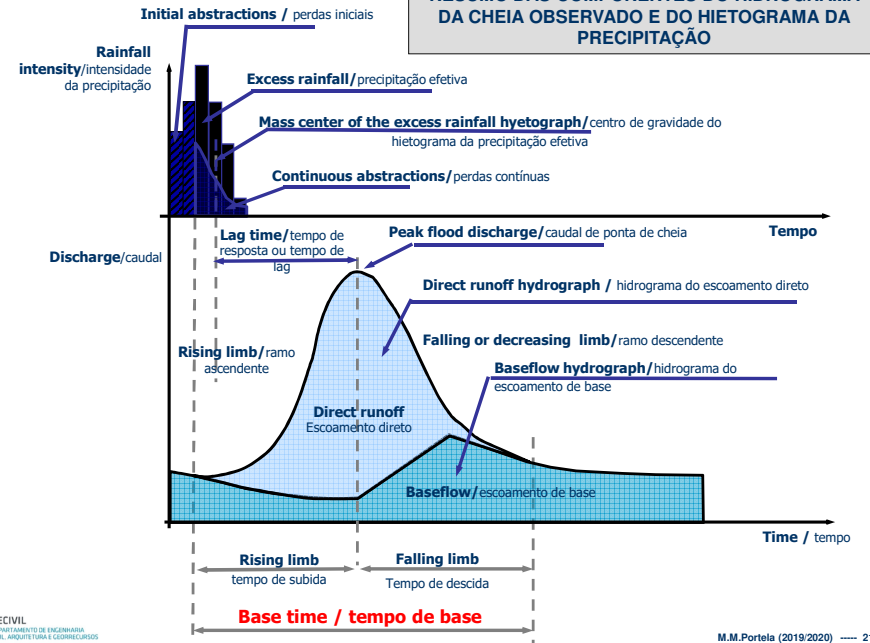


Objective: to compute HUD based on the direct approach (objetivo: calcular o HUD pelo método direto)

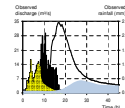


- ✓ **qi** nonzero discharges of the direct runoff hydrograph, for a time step of D – excluding the initial and final null discharges (caudais não nulos do hidrograma correspondente ao escoamento direto, discretizados de D em D e excluindo os caudais nulos inicial e final);
- ✓ **m** number of the previous qi discharges (número dos anteriores caudais qi);
- ✓ **m+1** base time of the direct runoff hydrograph expressed in D units (tempo de base do hidrograma correspondente ao escoamento direto em unidades de D);

RESUMO DAS COMPONENTES DO HIDROGRAMA DA CHEIA OBSERVADO E DO HIETOGRAMA DA PRECIPITAÇÃO

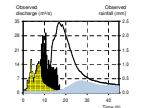


Objective: to compute HUD based on the direct approach (objetivo: calcular o HUD pelo método direto)



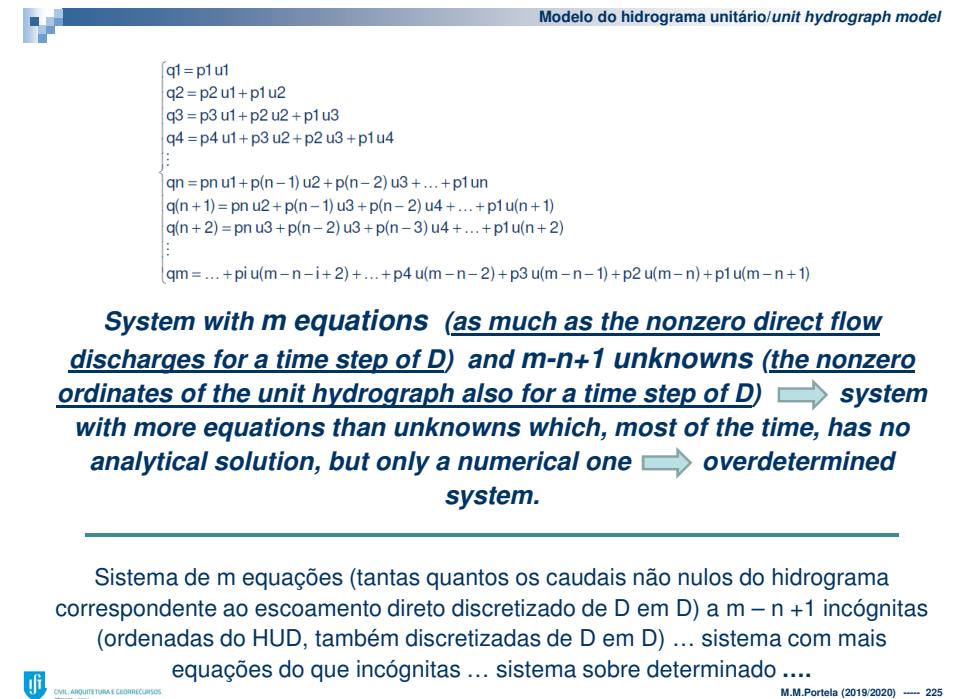
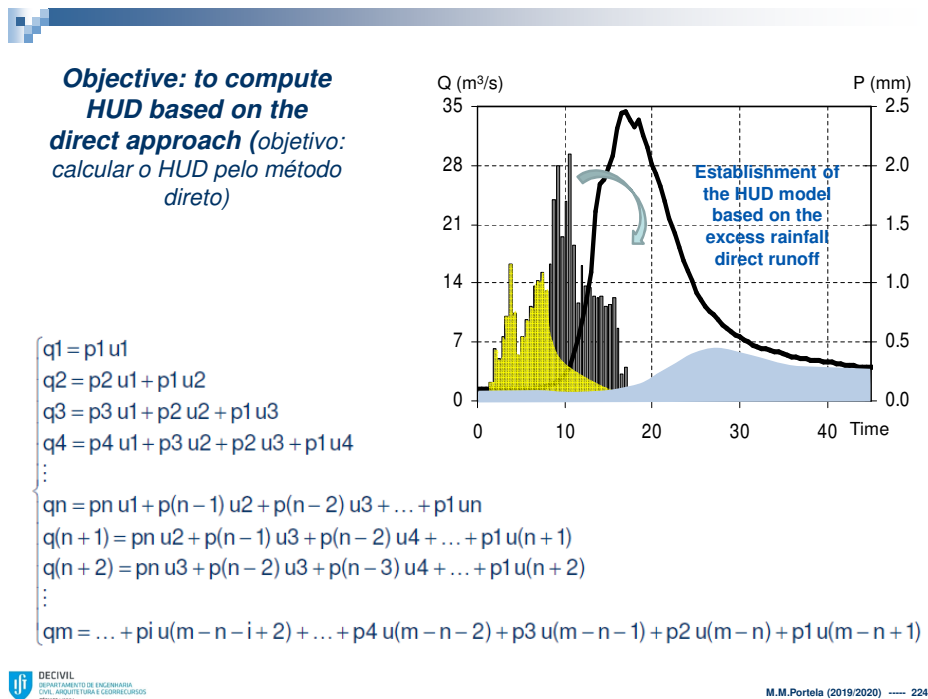
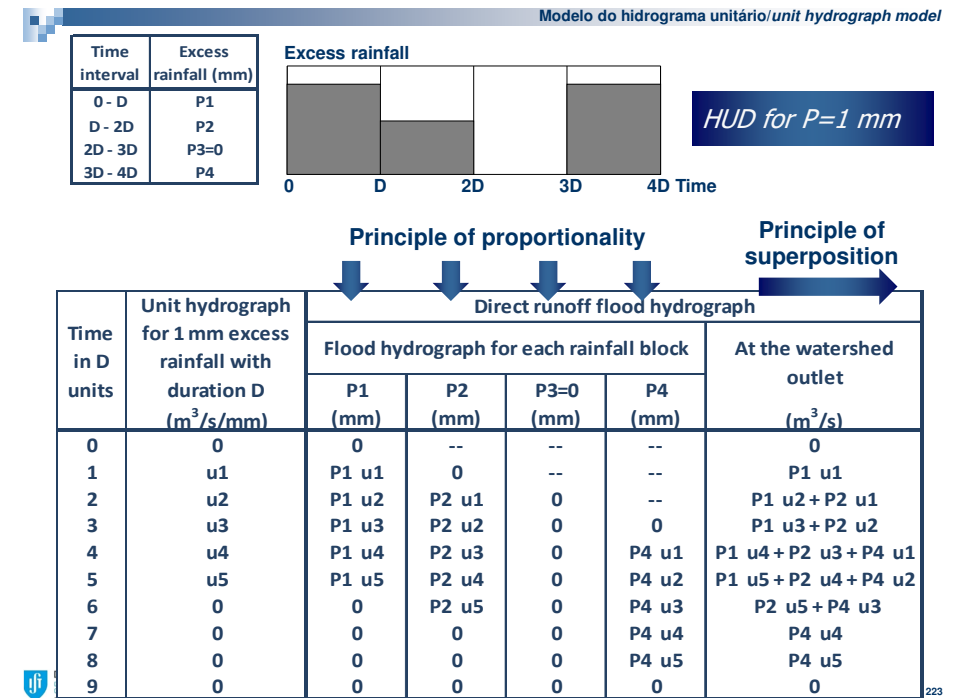
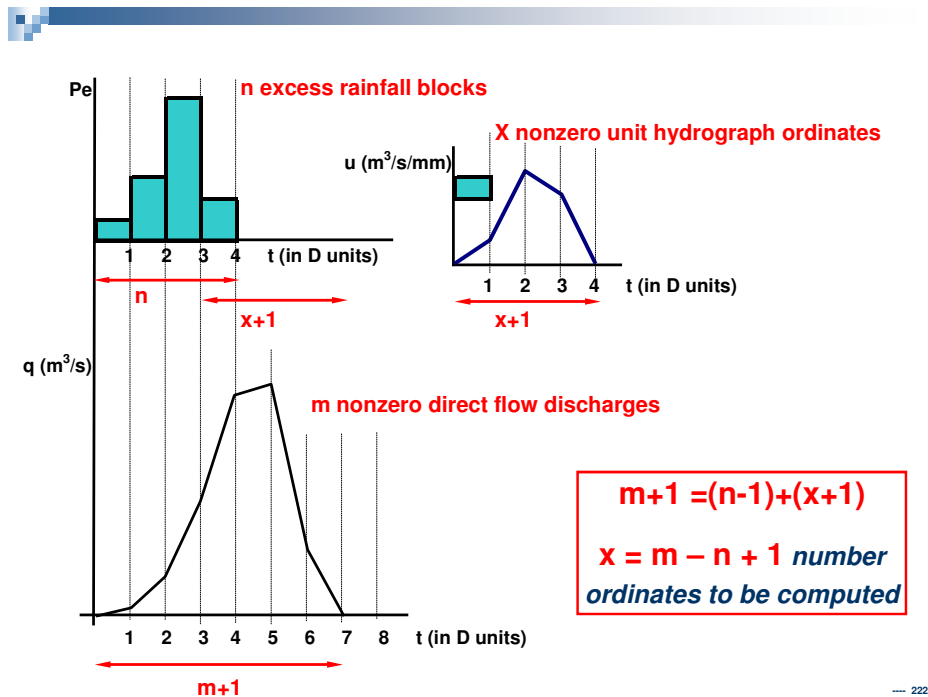
- ✓ **qi** nonzero discharges of the direct runoff hydrograph, for a time step of D (in D units) – excluding the initial and final null discharges (caudais não nulos do hidrograma correspondente ao escoamento direto, discretizados de D em D e excluindo os caudais nulos inicial e final);
- ✓ **m** number of the previous qi discharges (número dos anteriores caudais qi);
- ✓ **m+1** base time of the direct runoff hydrograph expressed in D units (tempo de base do hidrograma correspondente ao escoamento direto em unidades de D);
- ✓ **Pi** rainfalls blocks of the excess rainfall hyetograph, each block with duration D – some of those blocks can have null rainfall (precipitações referentes aos blocos do hietograma da precipitação efetiva (alguns eventualmente com precipitação nula);
- ✓ **n** total duration of the excess rainfall hyetograph expressed in units of D . i.e., number of blocks of the excess rainfall hyetograph (duração total do hietograma da precipitação efetiva em unidades de D , ou seja, número de blocos do hietograma da precipitação efetiva).

- ✓ **qi** nonzero direct runoff discharges;
- ✓ **m** number of qi ;
- ✓ **m+1** base time of the direct runoff hydrograph;
- ✓ **Pi** rainfalls of the excess rainfall hyetograph;
- ✓ **n** number of blocks of the excess rainfall hyetograph



If x denotes the number of nonzero ordinates of the HUD, the base time of the HUD will be $x+1$. This number plus the number of blocks of the excess rainfall minus 1, that is, $(x+1) + (n-1)$, should be equal to the base time of the direct runoff hydrograph, $(m+1)$. Accordingly, the number of ordinates of the HUD to compute will be $x = m - n + 1$.

Designando por x o número de ordenadas não nulas (discretizadas de D em D e excluindo os caudais nulos inicial e final) do hidrograma unitário a obter e atendendo a que o tempo de base de tal hidrograma, $x+1$, adicionado no número de blocos do hietograma da precipitação efectiva deduzido de um, $n-1$, iguala o tempo de base do hidrograma do escoamento directo, $m + 1$, obtém-se $(x + 1) + (n - 1) = m + 1$, ou seja, o HUD terá $x = m - n + 1$ ordenadas a estimar.



$$q_j = \sum_{i=1}^{j \leq n} p_i u(j-i+1)$$

$$\begin{cases} u_1 = \frac{q_1}{p_1} \\ u_2 = \frac{q_2 - p_2 u_1}{p_1} \\ u_3 = \frac{q_3 - p_3 u_1 - p_2 u_2}{p_1} \\ \dots \end{cases}$$

Sistema na forma de convolução

discreta: obtenção das ordenadas do HUD por eliminação de Gauss, mediante o isolamento sucessivo de cada uma das incógnitas das primeiras $m-n+1$ equações, seguido da determinação do valor dessa incógnita e da introdução de tal valor na equação subsequente, o que resultaria na utilização de apenas parte das equações disponíveis sendo que a solução identificada poderia não verificar as equações não utilizadas

É NECESSÁRIO RECORRER A UMA SOLUÇÃO NUMÉRICA

System (linear) to be solved

$$q_j = \sum_{i=1}^{j \leq n} p_i u(j-i+1)$$

$$\begin{cases} u_1 = \frac{q_1}{p_1} \\ u_2 = \frac{q_2 - p_2 u_1}{p_1} \\ u_3 = \frac{q_3 - p_3 u_1 - p_2 u_2}{p_1} \\ \dots \end{cases}$$

The computation of the ordinates of the HUD could be based on the Gauss elimination by progressively solving each one of the first $m-n+1$ equations of the system and by replacing the result achieved in each step in the next equation. However, because this approach only uses part of the available equations, most probably its solution will not verify the unused equations

A NUMERICAL SOLUTION IS REQUIRED

$$\begin{aligned} q_1 &= p_1 u_1 \\ q_2 &= p_2 u_1 + p_1 u_2 \\ q_3 &= p_3 u_1 + p_2 u_2 + p_1 u_3 \\ q_4 &= p_4 u_1 + p_3 u_2 + p_2 u_3 + p_1 u_4 \\ &\vdots \\ q_n &= p_n u_1 + p_{n-1} u_2 + p_{n-2} u_3 + \dots + p_1 u_n \\ q(n+1) &= p_n u_2 + p_{n-1} u_3 + p_{n-2} u_4 + \dots + p_1 u(n+1) \\ q(n+2) &= p_n u_3 + p_{n-1} u_4 + p_{n-2} u_5 + \dots + p_1 u(n+2) \\ &\vdots \\ q_m &= \dots + p_i u(m-n-i+2) + \dots + p_4 u(m-n-2) + p_3 u(m-n-1) + p_2 u(m-n) + p_1 u(m-n+1) \end{aligned}$$

$$[q] = [p] [u]$$

$$m \times 1 \quad m \times (m-n+1) \quad (m-n+1) \times 1$$

Solution by the least square method

$$[\hat{q}] = [p] [u]$$

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^m (q_j - \hat{q}_j)^2 = \text{Minimizar } \sum_{j=1}^m \left(q_j - \sum_{i=1}^{j \leq n} p_i u(j-i+1) \right)^2$$

$$[q] = [p] [u] \quad [\hat{q}] = [p] [u]$$

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^m (q_j - \hat{q}_j)^2 = \text{Minimizar } \sum_{j=1}^m \left(q_j - \sum_{i=1}^{j \leq n} p_i u(j-i+1) \right)^2$$

$$[p]^T [q] = [p]^T [p] [u]$$

$$[p]^T [p] \quad \text{square matrix that can be inverted (matriz quadrada, suscetível de ser invertida)}$$

$$[u] = ([p]^T [p])^{-1} [p]^T [q]$$

solution by the least square method ; T accounts for the transposed matrix and -1 for the inverse one (solução do método dos mínimos quadrados, representando T e -1 matrizes, respetivamente, transpostas e inversas)

$$m \times 1 \quad m \times (m - n + 1) \quad (m - n + 1) \times 1$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \dots \\ q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ p_2 & p_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ p_3 & p_2 & p_1 & 0 & \dots & 0 \\ p_4 & p_3 & p_2 & p_1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \dots \\ u_{m-n+1} \end{bmatrix}$$

Solution by the least square method:

$$[u] = ([p]^T [p])^{-1} [p]^T [q]$$

- ✓ **[q]** vector with the nonzero discharges of the direct runoff hydrograph, for a time step of D – excluding the initial and final null discharges (vetor contendo os caudais não nulos do hidrograma correspondente ao escoamento direto, discretizados de D em D e excluindo os caudais nulos inicial e final);
- ✓ **[p]** matrix with the excess rainfalls, according to the blocks of the rainfall hyetograph, each block with duration D – some of those blocks can have null rainfall (matriz contendo as precipitações referentes aos blocos do hietograma da precipitação efetiva (alguns eventualmente com precipitação nula);

The least square method gives an analytical solution that ensures the minimum errors between observed discharges and estimated discharges of the direct flow hydrograph.

However, the unit hydrograph thus achieved can present little or even none physical sense ... even with negative ordinates and a fuzzy shape.

The linear programming, which is a technique for the optimization of a linear objective function, subject to linear equality and linear inequality constraints, provides an alternative approach that, via the additional relationships expressing constraints, allows to preserve the physical concept of the unit hydrograph.

O método dos mínimos quadrados conduz a uma solução que, do ponto de vista analítico, assegura a minimização de erros entre caudais utilizados na estimação do HUD e obtidos por aplicação do modelo assim estimado.

Contudo, o hidrograma unitário a que conduz pode apresentar variações erráticas e mesmo ordenadas negativas.

A programação linear constitui um procedimento alternativo para estimação do HUD que assegura a minimização do valor absoluto dos anteriores erros e, mediante a introdução de restrições, valores não negativos de u_i ($u_i > 0$).

β_i and θ_i : in each instant i , differences between the observed discharge, q_i , and discharge given by the HUD, $\hat{q}_i$, respectively, if q_i is smaller or greater than $\hat{q}_i$

$$\beta_i = \hat{q}_i - q_i \quad \text{if} \quad q_i < \hat{q}_i$$

$$\theta_i = q_i - \hat{q}_i \quad \text{if} \quad q_i > \hat{q}_i$$

$$q_i = \hat{q}_i - \beta_i + \theta_i$$

Objective function

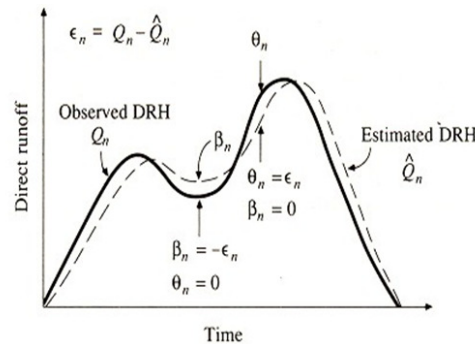
$$FO = \text{Minimize} \sum_i (\beta_i + \theta_i)$$

Constraints

$$[\hat{q}] + [\theta] - [\beta] = [q]$$

$$p_1 u_1 + p_{1-1} u_2 + p_{1-2} u_3 + p_{1-3} u_4 + \dots + \theta_i - \beta_i = q$$

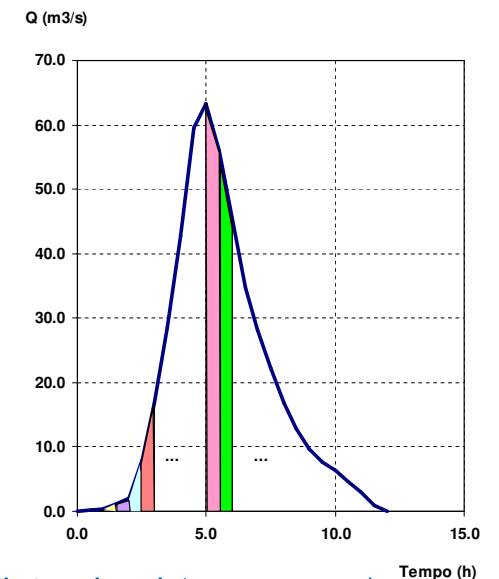
$$\sum_i u_i = \frac{A P}{D}$$



The variables u_i , β_i and θ_i are always greater than zero.

Volume of the direct runoff hydrograph

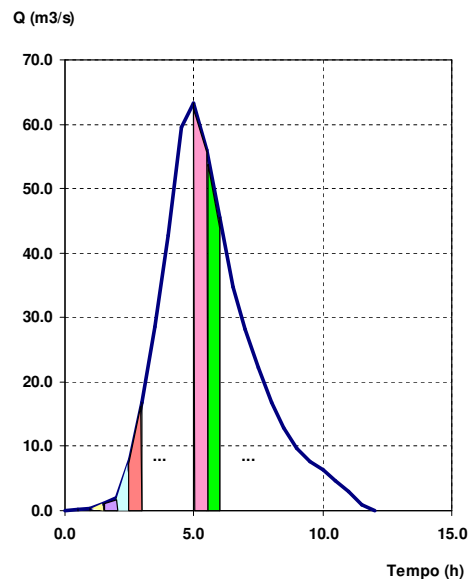
Tempo (h)	Q (m³/s)	V (m³)
0.0	0.0	0.0
0.5	0.1	90
1.0	0.3	360
1.5	1.1	1260
2.0	2.1	2880
2.5	8.0	9090
3.0	16.8	22320
3.5	28.5	40770
4.0	42.8	64170
4.5	59.5	92070
5.0	63.3	110520
5.5	56.0	107370
6.0	45.5	91350
6.5	34.7	72180
7.0	28.2	56610
7.5	22.3	45450
8.0	16.8	35190
8.5	12.8	26640
9.0	9.7	20250
9.5	7.7	15660
10.0	6.3	12600
10.5	4.6	9810
11.0	2.9	6750
11.5	1.0	3510
12.0	0.0	900
Volume total		847800



(... Direct application of the trapezium rule / regra dos trapézios ...)

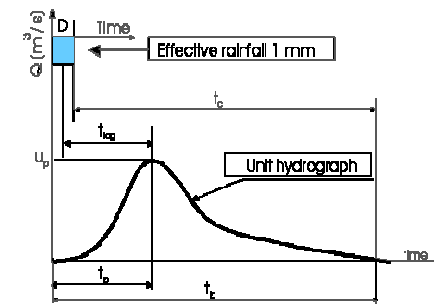
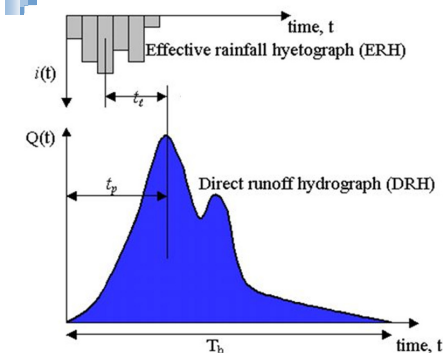
Tempo (h)	Q (m³/s)	V (m³)
0.0	0.0	
0.5	0.1	90
1.0	0.3	360
1.5	1.1	1260
2.0	2.1	2880
2.5	8.0	9090
3.0	16.8	22320
3.5	28.5	40770
4.0	42.8	64170
4.5	59.5	92070
5.0	63.3	110520
5.5	56.0	107370
6.0	45.5	91350
6.5	34.7	72180
7.0	28.2	56610
7.5	22.3	45450
8.0	16.8	35190
8.5	12.6	26640
9.0	9.7	20250
9.5	7.1	15660
10.0	6.3	12600
10.5	4.6	9810
11.0	2.9	6750
11.5	1.0	3510
12.0	0.0	900
Volume total		847800

Volume of the direct runoff hydrograph



$$(471 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.5 \text{ h} \times 3600 \text{ s} = 847\,800 \text{ m}^3)$$

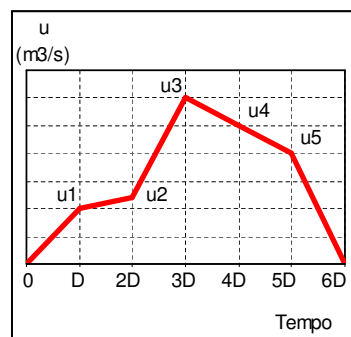
M.M.Portela (2019/2020) — 234



The volume of the excess rainfall, V_{PE} , is always equal to the volume of the direct runoff, V_{DR} , regardless of whether the paired (rainfall; runoff) relates to the unit hydrograph or to any specific flood event!!!

$$V_{PE} = V_{DR} \longleftrightarrow A \times P_E = \int Q_{DR} dt = \Delta t \sum Q_{DR}$$

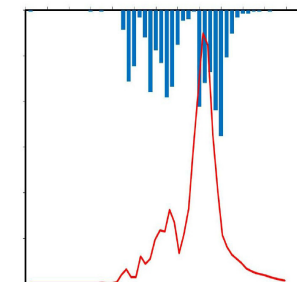
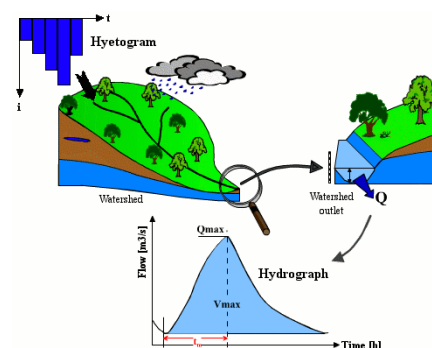
Modelo do hidrograma unitário/unit hydrograph model



$$\begin{cases} V_{ED} = \frac{u_1}{2} D + \frac{u_1+u_2}{2} D + \frac{u_2+u_3}{2} D + \frac{u_3+u_4}{2} D + \frac{u_4+u_5}{2} D + \frac{u_5}{2} D = D \sum_i u_i \\ V_{PE} = A P \end{cases}$$

$$\sum_i u_i = \frac{A P}{D}$$

Because we are dealing with lumped model (the opposite of distributed models), the excess rainfall is considered to be uniformly distributed over the whole watershed. As a result the direct runoff begins exactly at the beginning of the excess rainfall

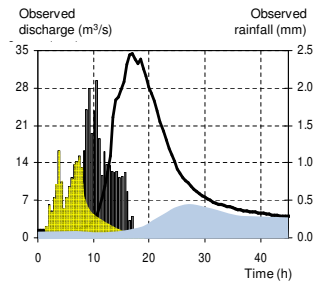


For a given watershed the unit hydrograph can be obtained by:

↪ **Direct approaches**, based on observed flood hydrographs and rainfall hyetographs.

Only applicable if the river section where the unit hydrograph is required coincides with a stream gauging station, which seldom happens!

↪ **Indirect approaches**, based on synthetic unit hydrographs, without requiring discharge data, but, instead, physiographic characteristics of the watersheds where flood analysis will be carried out.



O hidrograma unitário para uma dada bacia hidrográfica pode ser estabelecido por métodos:

↪ Directos, a partir de hidrogramas observados e dos hietogramas da precipitação que os originaram.

Tais métodos só são, contudo, aplicáveis se existirem estações hidrométricas nas secções de referência das bacias hidrográficas para as quais se pretendem estabelecer os hidrogramas unitários.

↪ Indirectos, a partir de hidrogramas unitários sintéticos, que não utilizam registos hidrométricos, apoiando-se, antes, em características fisiográficas das bacias hidrográficas em que se pretende efectuar a análise de cheias.

Different types of synthetic unit hydrographs

↪ **Empirical relationships**, relating physiographic characteristics of the watershed (usually, measurable based on topographic maps) with geometric properties of the unit hydrographs like the base time, the peak flood discharge or even the shape (Snyder Unit Hydrograph)

↪ **Dimensionless unit hydrographs** (Soil Conservation Service Unit Hydrograph)

↪ **Storage models** aiming at representing the water storage in the watershed (Clark Instantaneous Synthetic Unit Hydrograph)

Tipos de hidrogramas unitários sintéticos, HUS

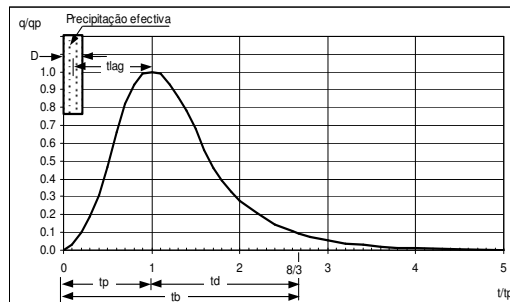
↪ **Fórmulas empíricas** que relacionam características fisiográficas da bacia hidrográfica, normalmente mensuráveis a partir de cartas topográficas, com propriedades geométricas dos hidrogramas unitários, como os respetivos tempos de base, os caudais de ponta de cheia ou as formas dos hidrogramas (HUS Snyder).

↪ **Hidrogramas unitários adimensionais**.

↪ **Modelos de armazenamento** de água nas bacias hidrográficas (HUS de Clark).

Soil Conservation Service Synthetic Unit Hydrograph

t/tp	q/qp	t/tp	q/qp
0.0	0.000	1.7	0.460
0.1	0.030	1.8	0.390
0.2	0.100	1.9	0.330
0.3	0.190	2.0	0.280
0.4	0.310	2.2	0.207
0.5	0.470	2.4	0.147
0.6	0.660	2.6	0.107
0.7	0.820	2.7	0.097
0.8	0.930	2.8	0.077
0.9	0.990	3.0	0.055
1.0	1.000	3.2	0.040
1.1	0.990	3.4	0.029
1.2	0.930	3.6	0.021
1.3	0.860	3.8	0.015
1.4	0.780	4.0	0.011
1.5	0.680	4.5	0.005
1.6	0.560	5.0	0.000

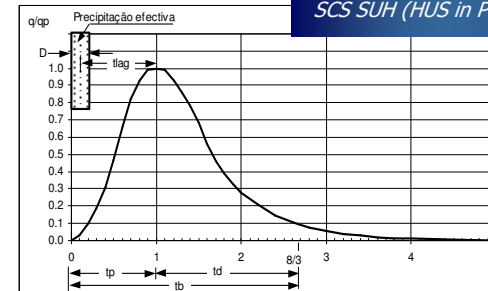


$$t_{lag} = 0,6 t_c \quad t_p = \frac{D}{2} + t_{lag}$$

For P=1 mm

$$q_p = \frac{0,2083 A}{t_p}$$

SCS SUH (HUS in Portuguese)



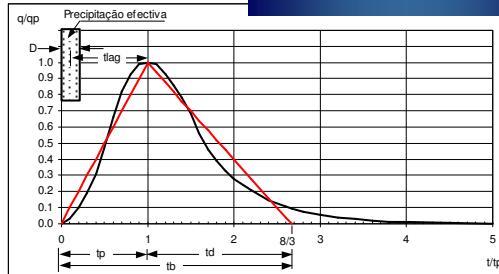
$$t_{lag} = 0,6 t_c$$

$$t_p = \frac{D}{2} + t_{lag}$$

✓ **tlag**: difference between the instant of the mass center of the excess rainfall hyetograph and the instant of the peak flow discharge (tempo de lag ou tempo de resposta: diferença entre o centro de gravidade do hietograma da precipitação efetiva e o instante de ocorrência do caudal de ponta do hidrograma de cheia)

✓ **tc**: time of concentration: time needed for the water to flow from the most remote point (from a kinematic point of view) in a watershed to its outlet (tempo de concentração: tempo que a gota de água precipitada no ponto cinematicamente mais afastado da bacia hidrográfica demora a atingir a secção terminal)

SCS SUH (HUS in Portuguese)



$$t_{lag} = 0,6 t_c$$

$$t_p = \frac{D}{2} + t_{lag}$$

Data to obtain the SCS Synthetic Unit Hydrograph:
watershed area, A ; time of concentration, t_c ; duration of the unit hydrograph

$$t_{lag} = 0,6 t_c$$

$$t_p = \frac{D}{2} + t_{lag}$$

Para $P=1$ mm (based on the triangular HUD): $q_p \text{ (m}^3/\text{s)} = \frac{0,2083 A \text{ (m}^2\text{)}}{t_p \text{ (h)}}$

Based on the previous knowledge of the watershed area, A , and of its time of concentration, t_c , and after making a decision about the duration of the foreseen SCS HUD, D (for instance, taking into account the time step of the available rainfall records)

$t_{lag} = 0,6 t_c$	$t_p = \frac{D}{2} + t_{lag}$	Para $P=1$ mm	$q_p = \frac{0,2083 A}{t_p}$
$\begin{cases} D \approx 0.20 t_p \\ D < 0.25 t_p \end{cases}$	$\Leftrightarrow \begin{cases} D \approx 0.122 t_{lag} \\ D < 0.286 t_{lag} \end{cases}$	$\Leftrightarrow$	$\begin{cases} D \approx 0.133 t_c \\ D < 0.171 t_c \end{cases}$

When applying the SCS unit hydrograph is based on HEC-HMS program, the duration D is fixed internally and automatically by the program, regardless the time step adopted by the user to define the design hyetographs. In fact, the program always assumes that D is equal to the time step of the results ... attention should be paid when defining this time step

Quando a aplicação do modelo do hidrograma unitário do SCS é efetuada com base no programa HEC-HMS, a duração da precipitação efetiva associada ao HUS é fixada interna e automaticamente pelo programa, independentemente da discretização temporal adotada pelo utilizador na definição dos hietogramas de projeto. Para o efeito, o programa atribui à duração em causa o intervalo de tempo indicado pelo utilizador para a apresentação das sucessivas ordenadas dos hidrogramas de cheia a calcular

Clark Instantaneous Unit Hydrograph (1945): it explicitly accounts for the following two components of the movement of the excess rainfall until the watershed outlet

1. **Translation component** or translation hydrograph that represents the water movement over the watershed surface from every point to the outlet section and that is described by the time-area diagram.
2. **Routing component** which describes the capability of the watershed to store the excess rainfall water (surface runoff) along its movement towards the outlet section. This component is modelled based on a linear reservoir: a reservoir is said to be linear when, in any instant, the outflow, $O(t)$ is proportional to the storage, $S(t)$ $\Rightarrow S(t) = k O(t)$

Clark Instantaneous Unit Hydrograph (1945): it explicitly accounts for the following two components of the movement of the excess rainfall until the watershed outlet

1. **Translation component** or translation hydrograph that represents the water movement over the watershed surface from every point to the outlet section and that is described by the time-area diagram.
2. **Routing component** which describes the capability of the watershed to store the excess rainfall water (surface runoff) along its movement towards the outlet section. This component is modelled based on a linear reservoir: a reservoir is said to be linear when, in any instant, the outflow, $O(t)$ is proportional to the storage, $S(t)$ $\Rightarrow S(t) = k O(t)$

O hidrograma unitário instantâneo de Clark (1945) tem em conta, de modo explícito, as seguintes duas componentes do movimento da água precipitada na hidrográfica até à respectiva secção de referência

1. **Componente de translação**, respeitante ao movimento da água precipitada sobre a bacia hidrográfica desde cada ponto de origem até à secção de referência, não entrando em consideração com qualquer atenuação (diagrama tempo-área para o tempo de concentração).
2. **Componente de amortecimento**, referente ao armazenamento que a água precipitada sofre, em maior ou menor grau, ao escoar-se até a secção terminal da bacia hidrográfica (modelo de reservatório linear - um reservatório diz-se linear quando, em cada instante t , o caudal efluente do reservatório, $O(t)$ é proporcional ao volume armazenado no mesmo, $S(t) \Rightarrow S(t) = k O(t)$)

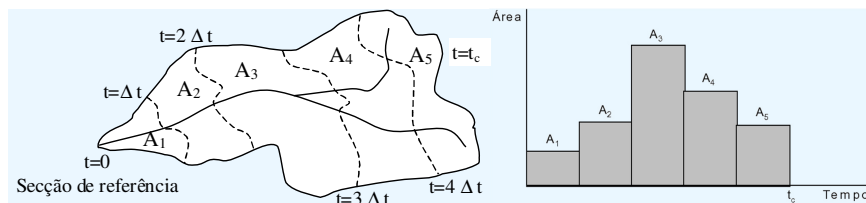
Translation component or translation hydrograph: It accounts for the time needed by the surface runoff to reach the watershed outlet. To model the fact that, as a result of the translational motion, the water does not reach simultaneously the outlet section, a time area-diagram for the concentration time is computed. For that purpose, the basin is subdivided into time-area increments by estimating the travel time of the runoff to the outlet from different locations of the watershed and by constructing isochrones, that is, the lines of equal travel time to the outlet

Componente de translação (atende ao tempo necessário para que o escoamento atinja a secção de referência)

Para traduzir o facto de, no movimento de translação, a água precipitada não atingir simultaneamente aquela secção, apresentando antes algum diferimento no tempo, que é tanto mais significativo quanto mais distante da secção de referência se localiza a área que virá a contribuir para o escoamento na mesma, Clark recorre a um diagrama tempo-área para o tempo de concentração.

Para obter tal diagrama traçam-se as linhas de igual tempo de percurso ou isócronas, cada uma destas linhas representando o lugar geométrico dos pontos da bacia hidrográfica a que corresponde igual tempo de percurso até à secção terminal.

Translation component / componente de translação (cont.)



The time-area diagram is obtained based on the outlining of the isochrones: each isochrone represent the set of the points of the watershed with a same travel time of the runoff to outlet section.

Obtenção do diagrama tempo-área baseada no traçado das linhas de igual tempo de percurso ou isócronas: linhas representativas do lugar geométrico dos pontos da bacia hidrográfica a que corresponde igual tempo de percurso até à secção terminal (... procedimento de traçado ... tempos de concentração em sub bacias ... tempos de percurso em trechos ...).

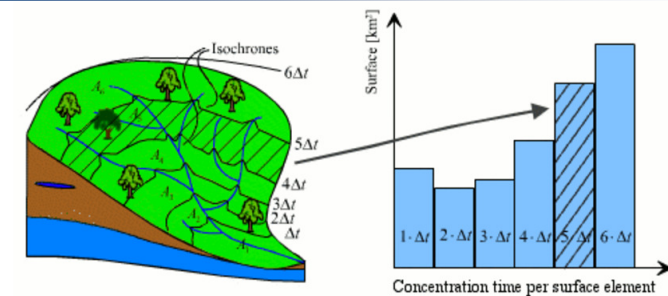


Figure 2.10. Representation of isochrones from a watershed [Musy, 2001]

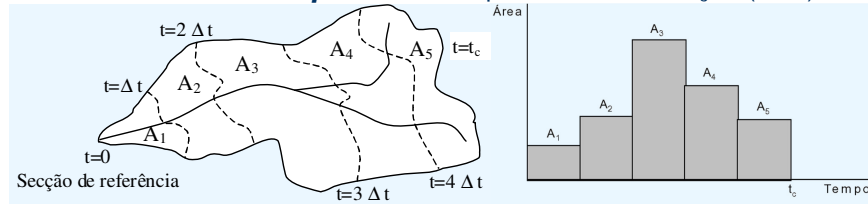
These curves allow, for different hypotheses, the determination of the hydrograph resulting from rainfall over the watershed.

Bibliography

Dingman, S. L. 1994. Physical Hydrology. Pearson Education Ltd., London, United Kingdom.

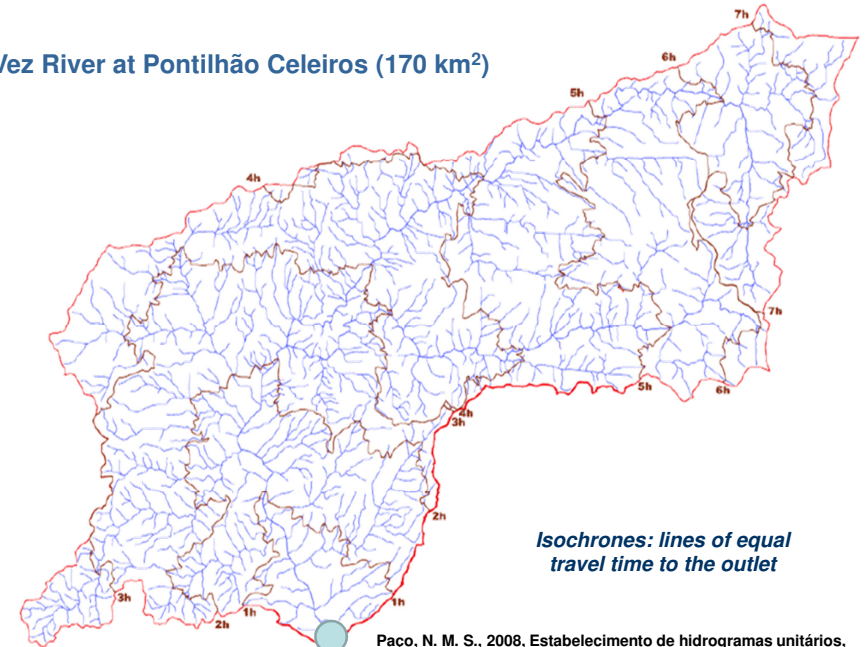
Musy, A. 1998. Hydrologie appliquée, Cours photocopié d'hydrologie générale, Lausanne, Suisse.

Musy, A. 2001. e-drologie. Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Suisse.

Translation component / componente de translação (cont.)

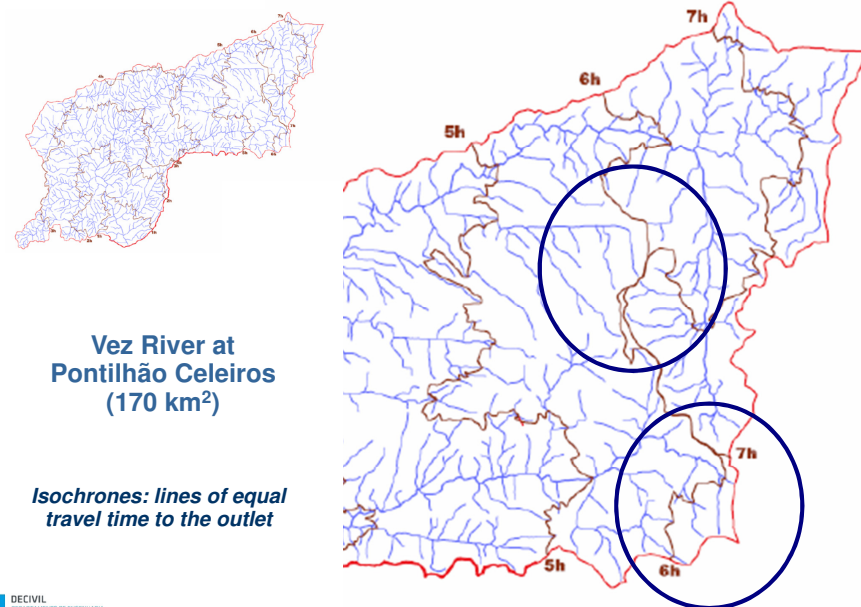
The time-area diagram intends to represent the direct hydrograph resulting from an instantaneous unit effective rainfall in the absence of any kind of storage capacity in the watershed (under this assumption, the increase of the river discharge at the outlet section would follow exactly the increase of the areas of the watershed which progressively contributes to the river discharge, according to the different travel times).

O diagrama tempo-área representa, de modo aproximado, o hidrograma do escoamento directo a uma precipitação efectiva unitária instantânea na ausência de qualquer armazenamento na bacia

Vez River at Pontilhão Celeiros (170 km²)

Isochrones: lines of equal travel time to the outlet

Paço, N. M. S., 2008, Estabelecimento de hidrogramas unitários, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

**Vez River at Pontilhão Celeiros (170 km²)**

Isochrones: lines of equal travel time to the outlet

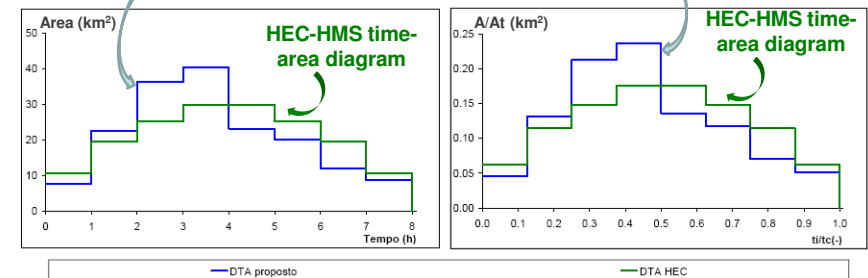
Vez River at Pontilhão Celeiros (170 km²)

Figura 3.5-Rio Vez em Pontilhão de Celeiros. Diagramas tempo-área com escala absoluta (à esquerda) e escala adimensional (à direita).

time-area diagram implemented in the HEC-HMS

(Diagrama tempo-área implementado no programa HEC-HMS)

$$\frac{A}{A_t} \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & t > \frac{t_c}{2} \end{cases}$$

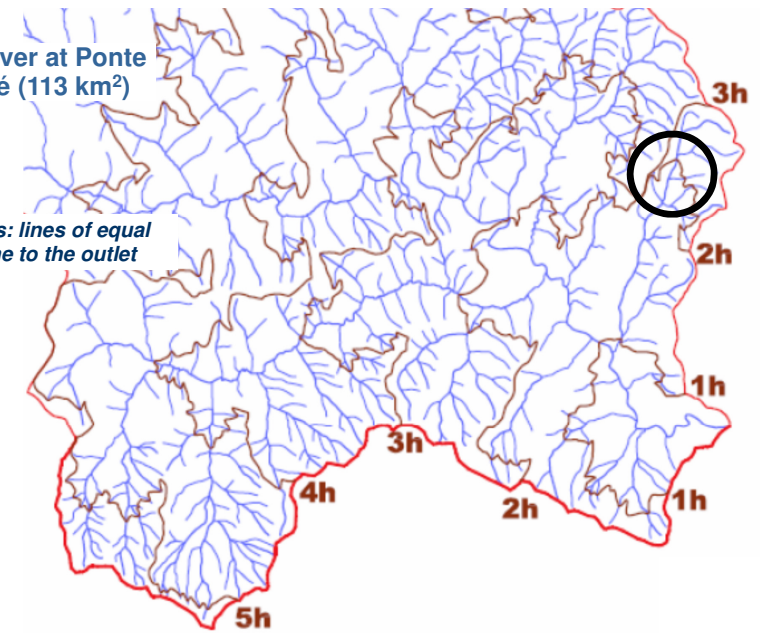
Alenquer River at Ponte de Barnabé (113 km²)

Isochrones: lines of equal travel time to the outlet



Alenquer River at Ponte de Barnabé (113 km²)

Isochrones: lines of equal travel time to the outlet



Alenquer River at Ponte de Barnabé (113 km²)

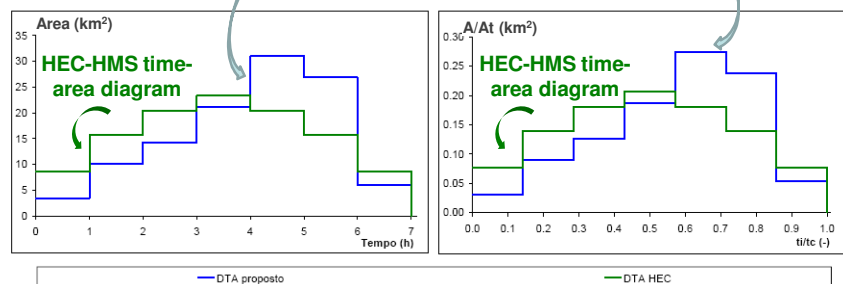


Figura 3.6-Rio Alenquer em Ponte Barnabé. Diagramas tempo-área com escala absoluta (à esquerda) e escala adimensional (à direita).

time-area diagram implemented in the
HEC-HMS

(Diagrama tempo-área implementado no programa
HEC-HMS)

$$\frac{A}{A_t} \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & t > \frac{t_c}{2} \end{cases}$$

Modelo do hidrograma unitário/unit hydrograph model

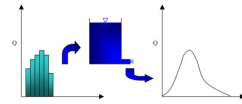
Routing component / componente de amortecimento

$$\frac{dS}{dt} = I - O \Leftrightarrow dS = I dt - O dt$$

- ✓ The routing component uses the mass equation expressed in volume, where I and O vary along time, $I = I(t)$ e $O = O(t)$.
- ✓ Even when the inflows are known, the equation $dS = I dt - O dt$ can not be solved directly because S and O are unknown and mutually dependent.
- ✓ Because of that, a second relationship is required relating S , I and O → linear reservoir equation – a reservoir is said to be linear when, in any instant, the outflow, $O(t)$ is proportional to the storage, $S(t)$, i.e., $S(t) = \kappa O(t)$.

Equação da continuidade expressa em termos de variação do volume armazenado ou equação de armazenamento

Na situação mais geral, os caudais variam ao longo do tempo, ou seja, $I = I(t)$ e $O = O(t)$. Mesmo que ao longo do tempo sejam conhecidos os caudais afluentes, a anterior equação não pode ser resolvida diretamente pois S e O são desconhecidos e reciprocamente dependentes. Assim, a utilização de tal equação tem de ser completada por uma relação adicional, função do volume armazenado, que relacione as grandezas S , I e O → no caso do modelo de Clark, equação que define o reservatório linear.

Routing component / componente de amortecimento (cont)

$$\begin{aligned} \text{Linear reservoir equation} & \left\{ \begin{aligned} S &= \kappa O \\ \frac{dS}{dt} &= I - O \end{aligned} \right. \Rightarrow \kappa \frac{dO}{dt} = I - O \\ \text{Mass equation} & \end{aligned}$$

... By applying finite differences ...

$$\begin{aligned} \kappa \frac{\Delta O}{\Delta t} &= \bar{I}_{\Delta t} - \bar{O}_{\Delta t} \\ \bar{I}_{\Delta t} &= \bar{I} = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad \bar{O}_{\Delta t} = \bar{O} = \frac{O_1 + O_2}{2} \end{aligned}$$

Routing component / componente de amortecimento (cont)

$$O_2 = \frac{2 \Delta t}{2 \kappa + \Delta t} \bar{I} + \frac{2 \kappa - \Delta t}{2 \kappa + \Delta t} O_1$$

$$O_2 = c_0 \bar{I} + c_1 O_1$$

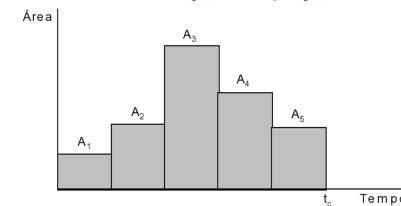
$$\text{With } \begin{cases} c_0 = \frac{2 \Delta t}{2 \kappa + \Delta t} \\ c_1 = \frac{2 \kappa - \Delta t}{2 \kappa + \Delta t} \end{cases}$$

To obtain the **Clark instantaneous unit hydrograph**, the time-area diagram (that intends to represent the outflow from an instantaneous excess rainfall at the watershed outlet if no storage capacity would exist) is “passed/routed” through a linear reservoir, thus simulating the “**dampening/decrease**” of the discharges as they propagate towards the outlet section. Such “operation” is described by the following equations where k is the **linear reservoir routing coefficient** (if no other reference is provided, approximately 0.75 times the time of concentration)

$$O_2 = c_0 \bar{I} + c_1 O_1 \quad \text{with } \begin{cases} c_0 = \frac{2 \Delta t}{2 \kappa + \Delta t} \\ c_1 = \frac{2 \kappa - \Delta t}{2 \kappa + \Delta t} \end{cases}$$

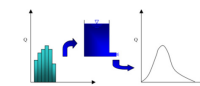
O hidrograma unitário instantâneo de Clark resulta da “passagem” do diagrama tempo-área (que fornece os caudais efluentes ao sistema uma vez que se despreze o amortecimento) através do reservatório linear (que conduz aos caudais efluentes amortecidos pelo sistema). Tal “passagem” é expressa pela equações anteriores na qual k é a constante de armazenamento ou constante do reservatório, expressa em unidades de tempo, que, segundo alguns autores pode ser aproximada por 0.75 do tempo de concentração

Translation (if no storage capacity was available)/translação



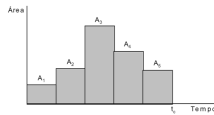
Routing / (amortecimento)

$$O_2 = c_0 \bar{I} + c_1 O_1$$



By applying the linear reservoir concept (which conceptually is located in the outlet section) the Clark instantaneous unit hydrograph intends to represent the effect of water storage in the basin in a lumped or aggregated approach

No modelo do hidrograma unitário instantâneo de Clark a consideração de um reservatório linear pretende representar, de forma agregada, o efeito do armazenamento de água na bacia hidrográfica pelo que, conceptualmente, se pode admitir que tal reservatório se localiza na secção de referência da bacia hidrográfica



$$O_2 = c_0 \bar{I} + c_1 O_1$$

The model considers an instantaneous rainfall which allowed its development without the need to specify the rainfall duration.

However to apply the model a duration D is required (generally define taking into account the time step of the available records)

The Clark instantaneous unit hydrograph is solely a function of the watershed physiographic characteristics

... Transformation of the Clark IUH into a UD for the excess rainfall duration of D

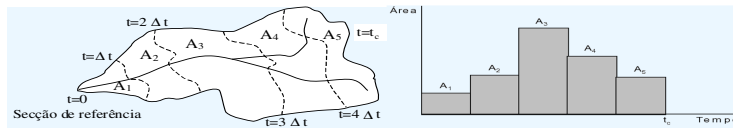
$$HUD_t \cong \frac{1}{2} (HUI_t + HUI_{t-D})$$

Although the time-area diagram is specific of each watershed, studies of the Hydrologic Engineering Center showed that the following time-area diagram was suitable for the establishment of Clark's instantaneous hydrograph in most of the analyzed watersheds (relationship implemented in the HEC-HMS program)

Não obstante o diagrama tempo-área ser característico de cada bacia hidrográfica, estudos do Hydrologic Engineering Center (HEC, 2002, p. 62) revelaram que o seguinte diagrama tempo-área típico se adequava ao estabelecimento do hidrograma unitário instantâneo de Clark para a maior parte das bacias hidrográficas então analisadas:

$$\frac{A}{A_t} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{para } t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{para } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases}$$

Translation component / Componente de translação



In the HEC-HMS program

$$\frac{A}{A_t} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{para } t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{para } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases}$$

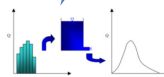


$$S = \kappa O$$

Routing component / Componente de amortecimento

$$O_2 = c_0 \bar{I} + c_1 O_1$$

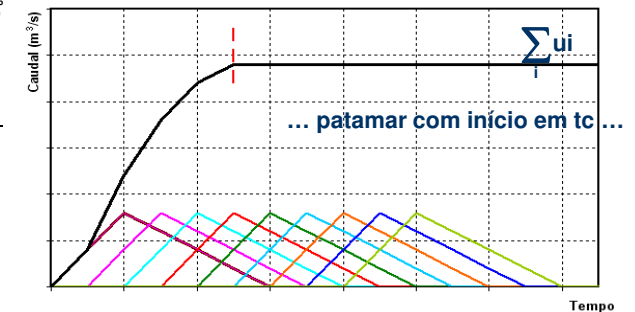
$$\begin{cases} c_0 = \frac{2 \Delta t}{2 \kappa + \Delta t} \\ c_1 = \frac{2 \kappa - \Delta t}{2 \kappa + \Delta t} \end{cases}$$



Obtenção do HUD' para uma duração D' conhecido o HUD para a duração D e para a precipitação efectiva de 1 mm – Computation of the HUD' for the D' duration and the excess rainfall of 1 mm knowing the HUD for the D and for the same excess rainfall

- 1) Obtenção da curva em S correspondente ao HUD (... sucessivo somatório de todas as ordenadas) (based on the HUD, evaluation of the S curve (the S-curve method involves continually lagging a unit hydrograph by its duration and adding the ordinates).

Intervalo de tempo Em unidades de D	Tempo (s)	HUD (m³/s/mm)	Precipitação efectiva em cada intervalo de tempo, D (mm) e correspondente hidrograma de cheia parcelar (m³/s)										Caudal do escoamento directo (m³/s)
			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	t1	u1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	u1	u1
2D	t2	u2	u1	0	0	0	0	0	0	0	0	u1+u2	u1+u2
3D	t3	u3	u3	u2	u1	0	0	0	0	0	0	u1+u2+u3	u1+u2+u3
4D	t4	u4	u4	u4	u3	u2	u1	0	0	0	0	u1+u2+u3+u4	u1+u2+u3+u4
5D	t5	u5	u5	u5	u5	u4	u3	u2	u1	0	0	u1+u2+u3+u4+u5	u1+u2+u3+u4+u5
6D	t6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7D	t7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8D	t8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9D	t9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10D	t10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11D	t11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12D	t12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13D	t13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14D	t14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15D	t15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



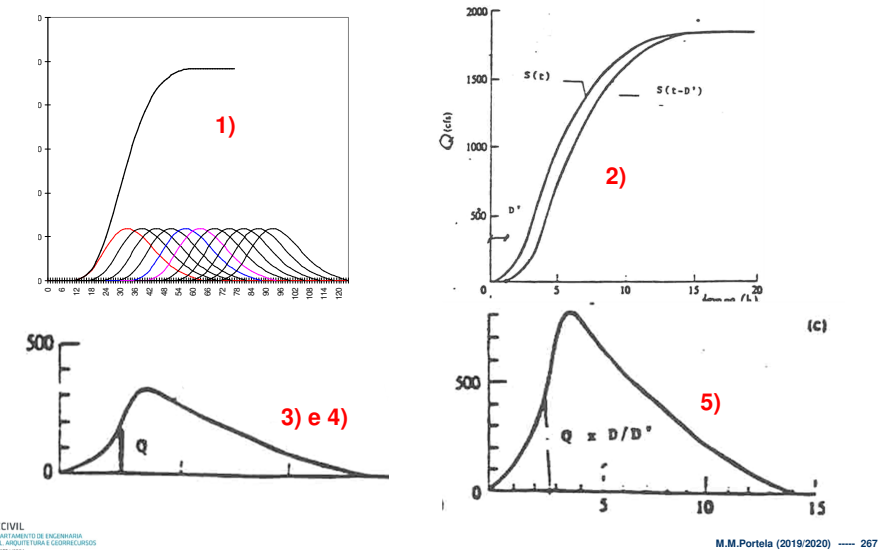
Obtenção do HUD' para uma duração D' conhecido o HUD para a duração D e para a precipitação efectiva de 1 mm

- 1) Obtenção da curva em S correspondente ao HUD (... sucessivo somatório de todas as ordenadas)
- 2) Obtenção de uma segunda curva em S, igual à precedente mas "translacionada" (no tempo), da nova duração D'
- 3) Para cada instante, cálculo das diferenças entre as ordenadas das duas curvas em S
- 4) O hidrograma assim obtido representa o hidrograma do escoamento directo para a precipitação efectiva com o valor de D/D' e com a duração D' (precipitação, portanto, valor não unitário)
- 5) Para referir o anterior hidrograma à precipitação de 1 mm, transformando-o no HUD', basta multiplicar as correspondentes ordenadas por D/D' e reter apenas as ordenadas que se referem aos sucessivos instantes de D' em D' (ou seja, o HUD' tem de ser discretizado de D' em D')

Computation of the HUD' for the D' duration and the excess rainfall of 1 mm knowing the HUD for the D and for the same excess rainfall

- 1) Based on the HUD, evaluation of the S curve - the S-curve method involves continually lagging a unit hydrograph by its duration and adding the ordinates.
- 2) The S-curve is next lagged by the duration D.
- 3) For each instant, the difference between the two lagged S-curves is next computed.
- 4) Because the S-curve was formulated from unit hydrographs having a D duration of uniformly distributed precipitation, the hydrograph obtained by subtracting the two S-curves will be the result of D/D' mm of precipitation with duration D' - excess rainfall different from one.
- 5) Thus the ordinates of the newly created D' duration unit hydrograph must be multiplied by the ratio D/D' in order to be a true unit hydrograph. Only the ordinates for a time step of D' are adopted to describe the new hydrograph for the excess rainfall of 1 mm with duration of D'

Obtenção do HUD' para uma duração D' conhecido o HUD para a duração D e para a precipitação efectiva de 1 mm - Computation of the HUD' for the D' duration and the excess rainfall of 1 mm knowing the HUD for the D and for the same excess rainfall



HUS Clark – exemplo de aplicação/Clark HUS application exemple

Exercício de exemplificação Modelo do hidrograma unitário instantâneo de Clark

Considere o seguinte diagrama tempo-área relativo a uma bacia hidrográfica com a área de 10 km²:

Intervalo de tempo (min)	Área (km ²)
0 – 15	1.0
15 – 30	3.0
30 – 45	5.0
45 – 60	1.0

A constante do reservatório ou de armazenamento na bacia hidrográfica tem o valor de $\kappa=30$ min.

Por aplicação do hidrograma unitário de Clark, obtenha o hidrograma unitário para a precipitação efectiva unitária de 10 mm com a duração de 15 min. Compare tal hidrograma com o que resultaria do valor 10 min para a constante de armazenamento. Comente o resultado.

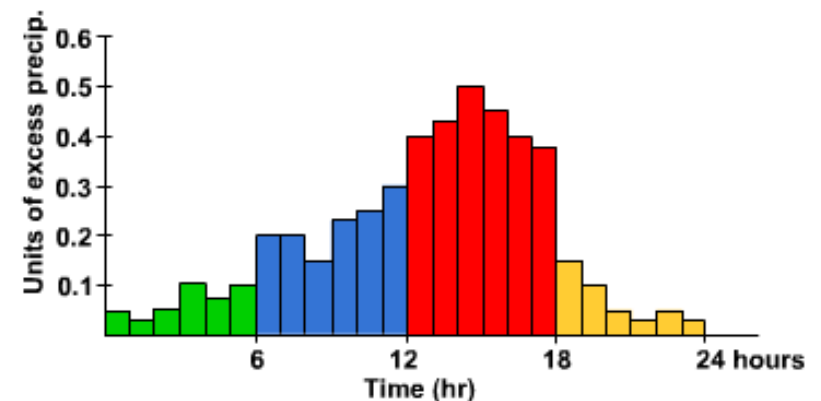
Na resolução do problema atenda a que a ordenada no instante t do hidrograma unitário para a duração D da precipitação efectiva unitária, HUI_t , pode ser obtida a partir das ordenadas nos instantes t e t-D do hidrograma unitário instantâneo referente àquela mesma precipitação efectiva, HUI_t e HUI_{t-D} , por aplicação da seguinte equação:

$$HUI_t \cong \frac{1}{2}(HUI_t + HUI_{t-D}) \quad (6.55)$$

IN THE TEXT THAT SUPPORTS THE COURSE THERE
IS AN APPLICATION EXAMPLE OF THE CLARK
INSTANTANEOUS UNIT HYDROGRAPH

DESIGN RAINFALLS – values and hyetographs

PRECIPITAÇÕES DE PROJECTO



DESIGN RAINFALL MODELS (PRECIPITAÇÕES DE PROJETO. MODELOS)

- ✓ **Rainfall event** (acontecimento pluvioso)

Occurrence of a considerable amount of rainfall after a period and followed by a period without rainfall (ocorrência de uma quantidade significativa de precipitação sobre a bacia hidrográfica, antecedida e seguida por intervalos de tempo sem precipitação mensurável).



DESIGN RAINFALL MODELS (PRECIPITAÇÕES DE PROJETO. MODELOS)

- ✓ **Rainfall event** (acontecimento pluvioso)
- ✓ **Rainfall duration** (duração da precipitação)



DESIGN RAINFALL MODELS (PRECIPITAÇÕES DE PROJETO. MODELOS)

- ✓ **Rainfall event** (acontecimento pluvioso)
- ✓ **Rainfall duration** (duração da precipitação)
- ✓ **Design values of the extreme rainfall and of its duration: intensive or extreme rainfall event** (precipitação intensa e duração da precipitação intensa a considerar na análise de cheias: precipitação e duração de projeto ou críticas)

Relevance of the time of concentration to ensure that the all watershed is contributing to the runoff in the outlet section with the highest rainfall intensity compatible with such scenario (Importância da consideração de tc – tempo de concentração)



DESIGN RAINFALL MODELS (PRECIPITAÇÕES DE PROJETO. MODELOS)

- ✓ **Rainfall event** (acontecimento pluvioso)
- ✓ **Rainfall duration** (duração da precipitação)
- ✓ **Design values of the extreme rainfall and of its duration: intensive or extreme rainfall event** (precipitação intensa e duração da precipitação intensa a considerar na análise de cheias: precipitação e duração de projeto ou críticas)
- ✓ **Databases ... SNIRH ... generally without or only a few values for durations smaller than the day** (bases de dados ... não contemplam, de modo geral, precipitações com durações inferiores ao dia)



$$\text{LPU: } P = a t^m$$

$$\text{IDF: } i = b t^n$$

P – rainfall with a given return period, T ; t – duration of the rainfall event; i – average intensity of the rainfall. The coefficients a e b and the exponent m and n are function of T (for the same T , $n=m-1$).

The exponent m is smaller than 1 and often comprehended between 0.3 and 0.6 when P is expressed in millimetres and t , in hours or days. The equations express the increase of the rainfall with the increase of time, though the rainfall intensity decreases with the duration.

P - precipitação com dado período de retorno, T ; t – duração da precipitação; i - intensidade média da precipitação. Os coeficientes a e b e os expoentes m e n são função do período de retorno, T (para um mesmo posto e o mesmo período de retorno - $n=m-1$).

O expoente m apresenta valores inferiores à unidade, frequentemente compreendidos entre 0.3 e 0.6 quando P se exprime em milímetros e t , em horas ou dias (QUINTELA, 1996, p. 5.23). As anteriores expressões traduzem o acréscimo da precipitação com o aumento da correspondente duração, não obstante a intensidade média dessa precipitação diminuir com o aumento da duração

- ✓ **LPU relationship – $P = a t^m$ – and intensity-duration-frequency curve, IDF – $i = b t^n$** (linha de possibilidade udométrica e curva intensidade-duração-frequência, IDF)

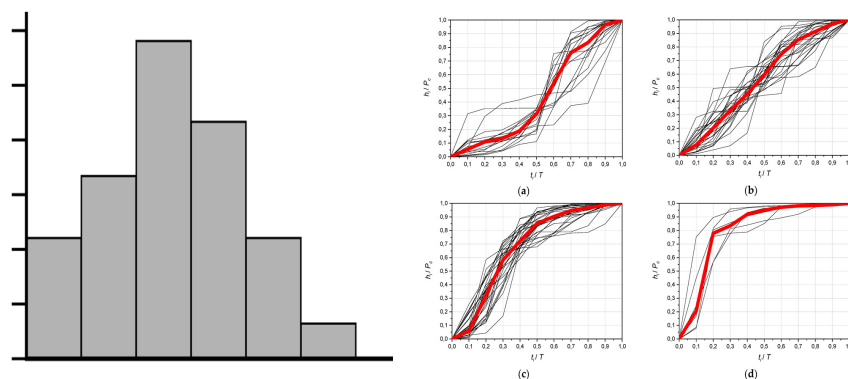
DESIGN RAINFALL MODELS (PRECIPITAÇÕES DE PROJETO. MODELOS)

- ✓ **Rainfall event** (acontecimento pluvioso)
- ✓ **Rainfall duration** (duração da precipitação)
- ✓ **Design design values of the extreme rainfall and of its duration: intensive or extreme rainfall event** (precipitação intensa e duração da precipitação intensa a considerar na análise de cheias: precipitação e duração de projeto ou críticas)
- ✓ **Databases ... SNIRH ... generally without or only a few values for durations smaller than the day** (bases de dados ... não contemplam, de modo geral, precipitações com durações inferiores ao dia)
- ✓ **LPU relationship – $P = a t^m$ – and intensity-duration-frequency curve, IDF – $i = b t^n$** (linha de possibilidade udométrica e curva intensidade-duração-frequência, IDF)
- ✓ **Previous results for mainland Portugal** (resultados antecedentes para Portugal Continental)

TARGET: ESTABLISHMENT OF THE DESIGN RAINFALLS AND OF THE DESIGN HYETOGRAPHS

OBJECTIVO: DETERMINAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES DE PROJETO.

- ATRIBUIÇÃO A TAIS PRECIPITAÇÕES DE HIETOGRAMAS DE PROJECTO



Design hyetographs

In Portugal, the more common durations of the rainfall events adopted as design criteria are comprehended between 1 and 24 h or even less for the smaller watersheds as those around Lisbon – watersheds prone to flash floods. In fact, only the largest watersheds, namely those of the international rivers, may have times of concentration higher than 1 day.

HIETOGRAMAS DAS PRECIPITAÇÕES DE PROJECTO

Durações críticas da ordem de 1 a 24 h são comuns no dimensionamento hidrológico em bacias hidrográficas portuguesas. Se tais bacias tiverem áreas reduzidas poderão ser mais importantes durações de escassos minutos e as suas áreas forem apreciáveis, poderão ser requeridas durações de dias.

Normally, the very **short rainfall events** (duration of 1 h or less) may be described by their **average intensity** (the ratio between the rainfall and the duration, $i=P/t$). As the rainfall duration increases to adopt the average rainfall intensity becomes inappropriate, namely for flood analysis purpose, and hyetographs expressing the variation of the rainfall intensity along the time are required

Diagram describing the temporal pattern of the rainfall event: hyetographs

Normalmente os acontecimentos pluviosos de curta duração (1 h ou menos) podem ser descritos pela respectiva intensidade média da precipitação, i , ou seja, pelo quociente entre a precipitação P e a respectiva duração, t ($i = P/t$). À medida que aumenta a duração do acontecimento pluvioso, torna-se mais importante conhecer as intensidades da precipitação em sucessivos sub intervalos de tempo, especialmente quando se está perante um problema de determinação de caudais de ponta de cheias.

Discretização temporal do acontecimento pluvioso: hietograma

--- 278

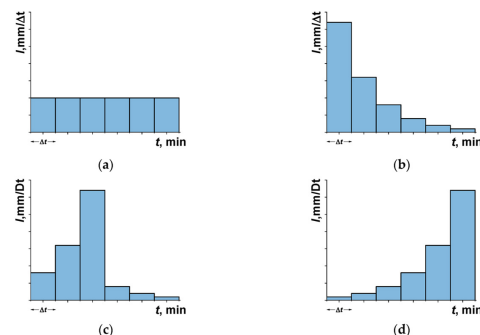
The analysis of the rainfall intensities for durations smaller than the day is crucial for flood analysis in Portugal. However the short duration records are generally available only for 24 h – annual maximum daily rainfall, P_{dma} (one value per year, the maximum “daily” rainfall). Most of the public databases do not include rainfall records for duration smaller than the day even when those records exist . The measuring network of the sub daily extreme rainfall is quite sparse and most of the time unsuitable to compute the design rainfall

O estudo de precipitações intensas com duração inferior ao dia é, normalmente, determinante para a análise de cheias em bacias hidrográficas de Portugal Continental. Contudo, os postos udográficos que dispõem de registos de precipitações máximas anuais com curtas durações e que possibilitam tal estudo, são em número significativamente inferior ao dos postos com registos de precipitações diárias máximas anuais, P_{dma} . Acresce que as bases de dados (SNIRH) diretamente acessíveis ao público, em geral, e à comunidade técnica e científica, em particular, não incluem registos de precipitações com durações inferiores ao dia, mesmo quando tais registos existem.

--- 279

OBJECTIVE

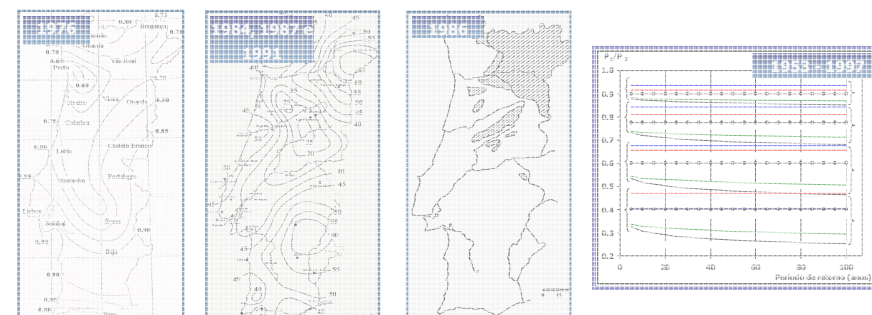
In the previous context, presentation of procedures aiming at overcoming the scarcity (in terms of the number of rain gauges and of the length of the corresponding time series) of sub daily rainfall data and at evaluating the annual maximum short duration rainfall based on the annual maximum daily rainfall (developed for Portugal but also applicable in other regions).



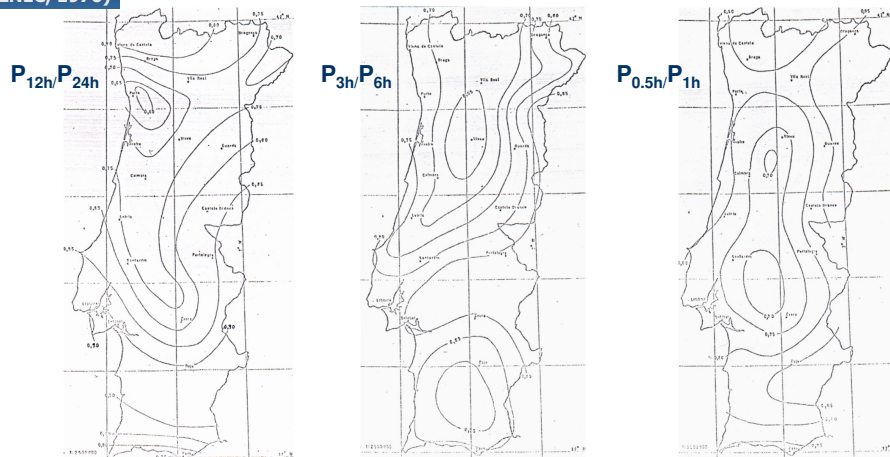
M.M.Portela (2019/2020) --- 280

OBJECTIVE: procedures aiming at overcoming the scarcity of sub daily rainfall data and at evaluating the annual maximum short duration rainfall based on the annual maximum daily rainfall.

PREVIOUS STUDIES DESCRIBING THE EXPECTED BEHAVIOR OF THE SHORT DURATION INTENSIVE RAINFALLS



M.M.Portela (2019/2020) --- 281

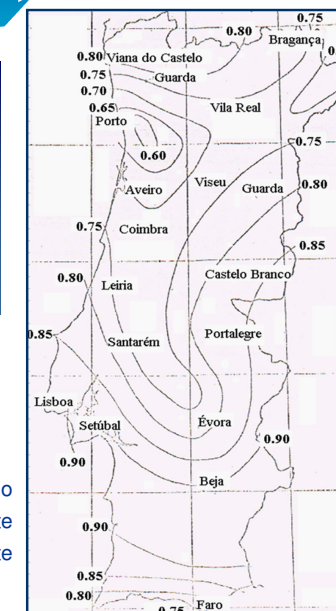


Maps with the contour lines of the ratio between two precipitations with different durations but with the same return period (regardless the value of this period)

Isolinhas do quociente entre precipitações com o mesmo período de retorno e durações de a) 12,0 e 24,0 h, b) 3,0 e 6,0 h e c) 0,5 e 1,0 h

(LNEC, 1976, Laboratório Nacional e Engenharia Civil, Drenagem de estradas, caminhos de ferro e aeródromos. Estudo hidrológico, Determinação de caudais de ponta de cheia em pequenas bacias hidrográficas. Relatório. Estudo realizado para o plano de estradas, caminhos de ferro e aeródromos. Serviço de Hidráulica. Divisão de Hidráulica Fluvial. Proc. 62/12/5309, Lisboa).

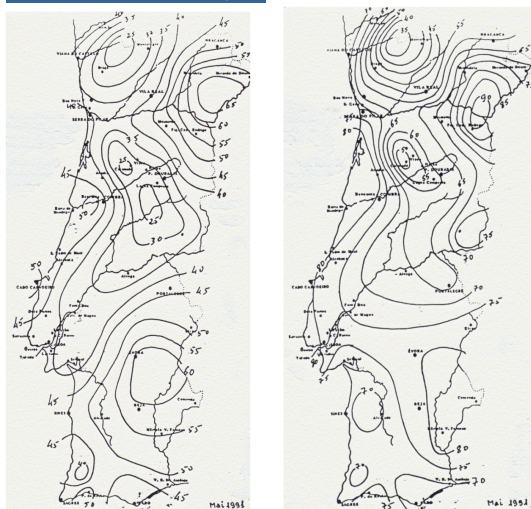
Contour lines of the ratio between two precipitations with durations of 12 and 24 h and "a" same return period



The ratio between two precipitations with different durations but with the same return period can be considered is independent of that return period; (2) the spatial variability of such ratio is very smoothed.

Isolinhas do quociente entre precipitações com igual período de retorno e durações de 12,0 e 24,0 h

- ✓ O quociente entre duas precipitações intensas com o mesmo período de retorno é considerado independente desse período. A variabilidade espacial desse quociente é bastante pequena.



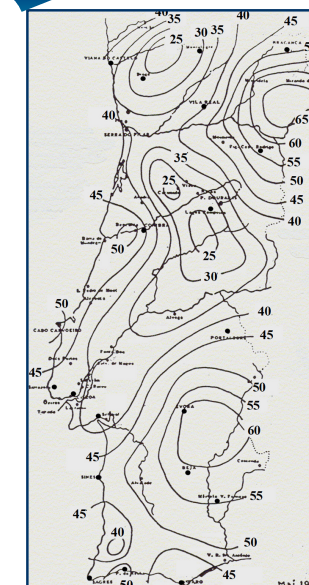
T = 100 years

Maps with the contour lines of the precipitation with duration of 60 min (left) and 6 h (right) expressed as percentage of the annual maximum daily rainfall for the return period of 100 years

Mapa de isolinhas dos valores máximos da precipitação em 60 min e em 6 h expressos em percentagem dos valores em 24 h. Período de retorno de 100 anos

(adaptada de GODINHO, INMG, 1984 e 1987, atualizada em, GODINHO, S. F., 1991, Valores máximos anuais da quantidade da precipitação. Estimativa dos valores relativos a durações inferiores a 24 horas Aditamento. Nota Técnica de Meteorologia e Geofísica. Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica. Divisão de Hidrometeorologia. MOPTC.)

T = 100 years



Contour lines of the precipitation with duration of 60 min expressed as percentage of the annual maximum daily rainfall for the return period of 100 years

Differently from the previous study of LNEC, 1976, these authors consider that the ratio between two precipitations may not be independent of the return period. However the spatial variability of such ratio is also very smoothed

Mapa de isolinhas dos valores máximos da precipitação em 60 min expressos em percentagem dos valores em 24 h. Período de retorno de 100 anos

- ✓ O quociente entre duas precipitações intensas com o mesmo período de retorno não é considerado independente desse período. A variabilidade espacial desse quociente é bastante pequena



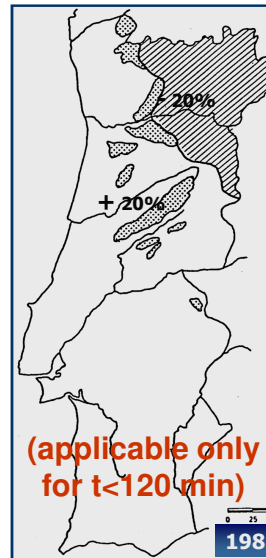
MATOS e SILVA, 1986: three regions with different IDF curves parameters (rainfall duration until 120 min and retrun period from 2 to 100 years)

MATOS e SILVA, 1986: três regiões pluviométricas e parâmetros das curvas intensidade-duração-frequência, IDF (duração da precipitação e período de retorno inferiores a 120 min e 100 anos, respetivamente)

Período de retorno, T (anos)	Região pluviométrica					
	A		B		C	
	Curva IDF Lisboa		Curva IDF Lisboa - 20%		Curva IDF Lisboa + 20%	
	a'	n'	a'	n'	a'	n'
2	202.72	-0.577	162.18	-0.577	243.26	-0.577
5	259.26	-0.562	207.41	-0.562	311.11	-0.562
10	290.68	-0.549	232.21	-0.549	348.82	-0.549
20	317.74	-0.538	254.19	-0.538	381.29	-0.538
50	349.54	-0.524	279.63	-0.524	419.45	-0.524
100	365.62	-0.508	292.5	-0.508	438.75	-0.508

(... Return period as a parameter of the IDF curves; spatial variation unifom within each region/período de retorno como parâmetro das IDF; variação espacial muito pequena).

$$i(\text{mm/h}) = a \cdot t(\text{min})^n$$



MATOS e SILVA, 1986: three regions with different IDF curves parameters (rainfall

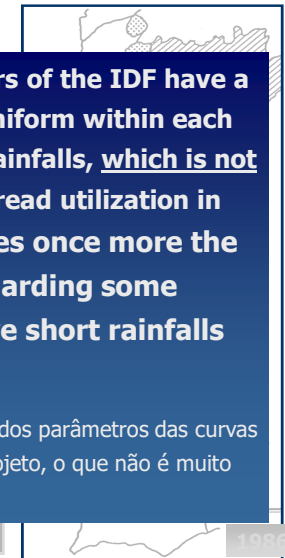
This study considers that the parameters of the IDF have a very smoothed spatial pattern, even uniform within each region. The same applies to the design rainfalls, which is not be very accurate, although its widespread utilization in Portugal! However, the study stresses once more the spatial uniformity expected regarding some characteristics of the very intensive short rainfalls

O estudo pressupõe acentuada uniformidade espacial dos parâmetros das curvas IDF (e mesmo para as próprias precipitações de projeto, o que não é muito correto!)

100	365.62	-0.508	292.5	-0.508	438.75	-0.508
-----	--------	--------	-------	--------	--------	--------

(... Return period as a parameter of the IDF curves; spatial variation unifom within each region/período de retorno como parâmetro das IDF; variação espacial muito pequena).

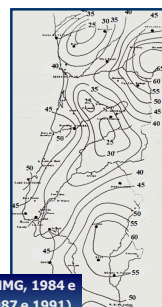
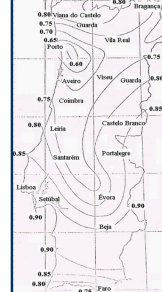
$$i(\text{mm/h}) = a \cdot t(\text{min})^n$$



Several Portuguese authors established values for the parameters of the LPU/IDF curves for specific locations of Portugal or even particular equations applicable to the extreme design rainfalls; for that purpose, some of them consider that the ratio between two rainfalls with different durations depends on the return period while others don't.

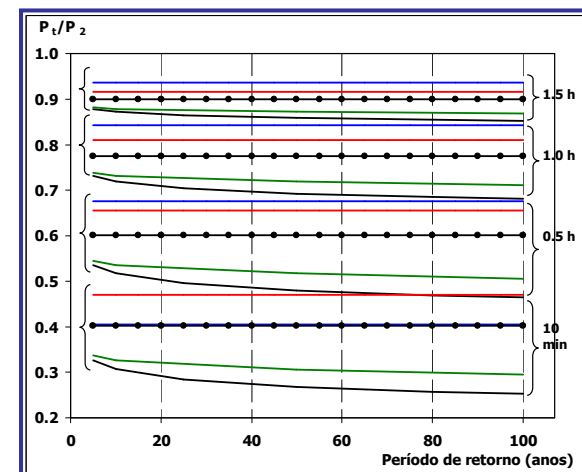
Vários autores apresentam, para dadas regiões (Lisboa, Porto, Évora, Barcelos, ...), valores para os parâmetros das linhas de possibilidade udométrica/curvas intensidade-duração-frequência (curvas IDF) ou, ainda, expressões aplicáveis ao cálculo de precipitações intensas (pressupondo ou não que o quociente entre duas precipitações intensas com durações fixas é independente do período de retorno).

(LNEC, 1976)



(GODINHO, INMG, 1984 e 1987/1984, 1987 e 1991)
para T=100 anos

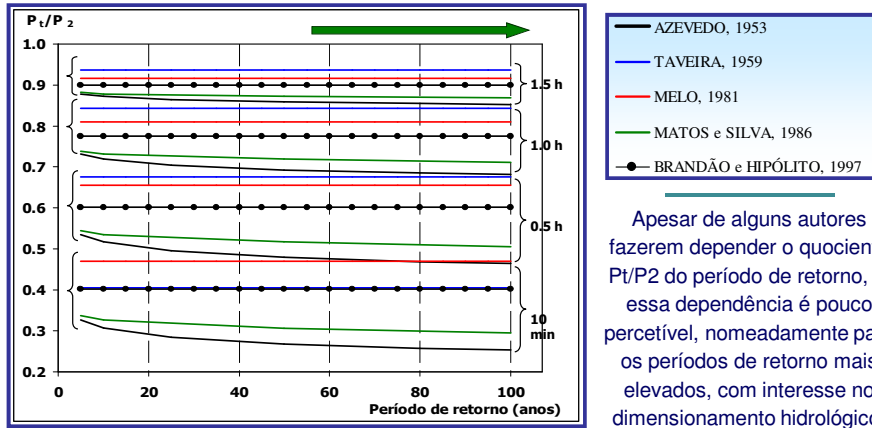
Ratios, P_t/P_2 , as a function of the return period ratio, between two intense rainfalls one with fixed duration (denominator) – in the case of the figure 2 h, - and other with variable duration between 10 min and 1.5 h (numerator)



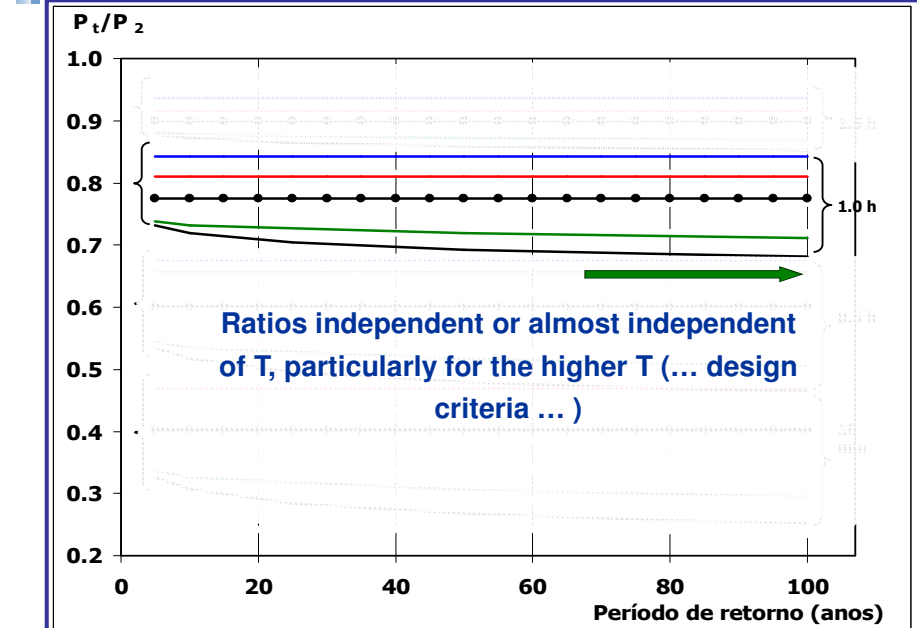
— AZEVEDO, 1953
— TAVEIRA, 1959
— MELO, 1981
— MATOS e SILVA, 1986
— BRANDÃO e HIPÓLITO, 1997

Quocientes, em função do período de retorno, T , entre duas precipitações intensas, P_t/P_2 , uma com duração t variável, P_t (numerador), e outra com a duração fixa de 2 h, P_2 (denominador)

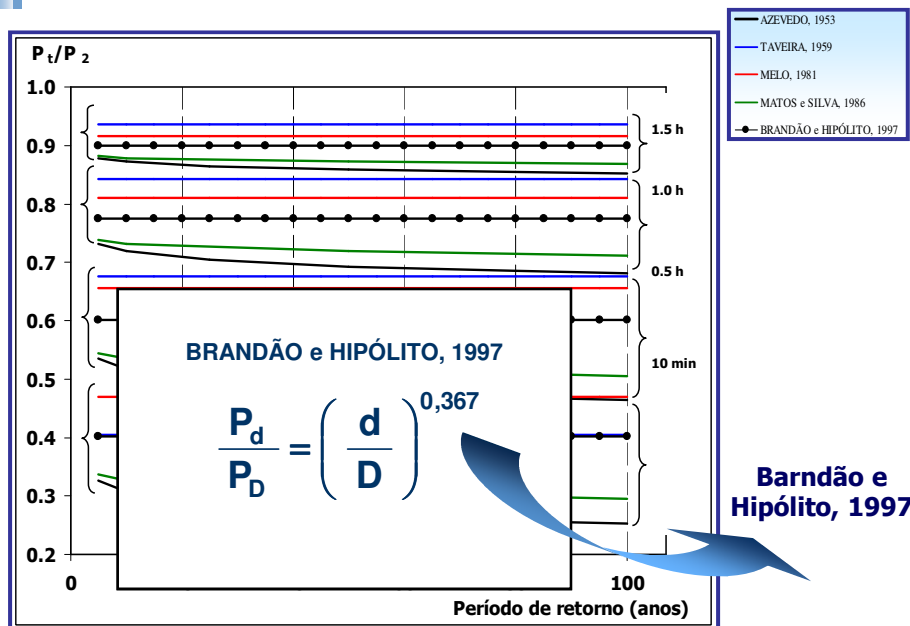
The ratios between the two rainfalls are independent or almost independent of the return period, T , even for those others who adopted T as a parameter of the relationships. This is particularly visible for the higher T usually adopted as design criteria (80 → 100 years)



— 290



M.M.Portela (2019/2020) — 291



— 292

Conclusions

- ✓ The ratio between two annual maximum rainfalls with given durations can be considered independent or almost independent of the return period, T , provided those rainfalls have the same return period – valid worldwide.
- ✓ The spatial variability of such ratio is very smoothed - also valid worldwide.

$$\frac{P_t}{P_t^*} = \frac{P}{P_t^*} \approx \text{cte}$$

with P_t and P_t^* known rainfalls based on studies or computed from the available records and P unknown design short duration rainfall

Conclusões

- ✓ O quociente entre duas precipitações máximas anuais com durações previamente fixadas é pouco, ou mesmo muito pouco, influenciado pelo período de retorno, T , desde que essas duas precipitações tenham um mesmo T .
- ✓ A variação espacial de tal quociente é muito pequena.

— 293

Conclusions

- ✓ The ratio between two ... even duration ...
- ✓ T ... is very smoothed - also

HOW TO GET P_t AND P_t^* ?

$$\frac{P_t}{P_t^*} = \frac{P}{P_t^*} \approx \text{cte}$$

with P_t and P_t^* known rainfalls based on studies or computed from the available records and P unknown design short duration rainfall

Conclusões

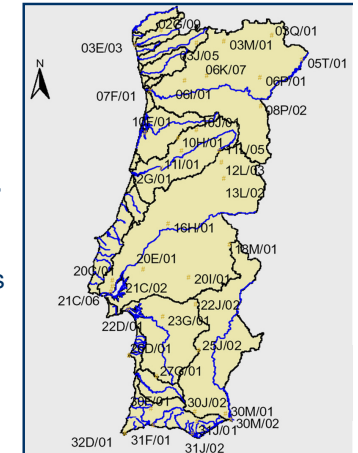
- ✓ O quociente entre duas precipitações máximas anuais com durações previamente fixadas é pouco, ou mesmo muito pouco, influenciado pelo período de retorno, T , desde que essas duas precipitações tenham um mesmo T .
- ✓ A variação espacial de tal quociente é muito pequena.

--- 294

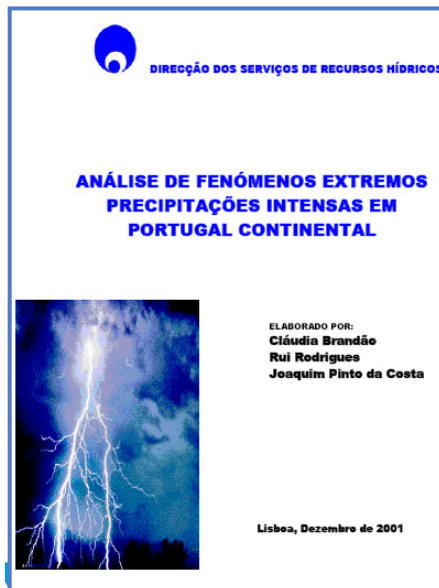
Previous results on IDF curves from BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R.; COSTA, J. P., 2001, "Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental". DSRH-INAG, Instituto da Água. Lisboa, Portugal (meanwhile updated by "As cheias em Portugal Continental. Estar informado e preparado para um Mundo mais seguro no século XXI", 2004, Ministério do Planeamento e do ordenamento do território).

Intensity-duration-frequency curves (IDF curves) in 27 rain gages

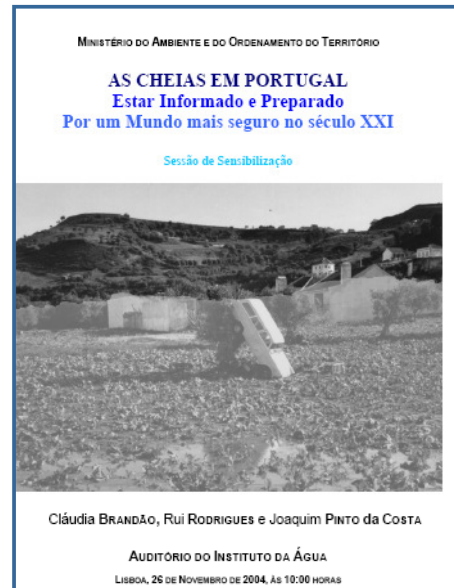
In each rain gage the parameters of the IDF curves depend on the return period, T , and the rainfall duration, t (T from 2 to 1000 years and intervals of the t up to 5 min to 0.5 h, from 0.5 to 6 h, and from 6 to 48 h)



Initial study (2001)



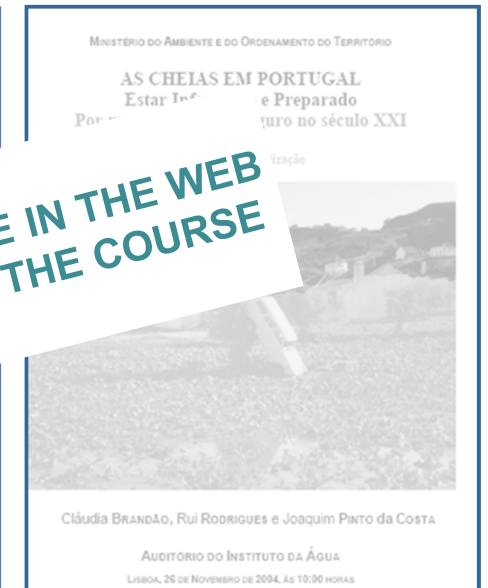
Update(2004)



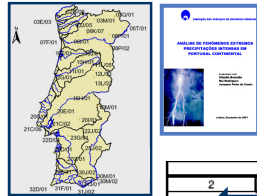
Initial study (2001)



Update(2004)



AVAILABLE IN THE WEB
PAGE OF THE COURSE



IDF Curves for different T and duration of the rainfall (from 5 min on),

$$i \text{ (mm/h)} = a t \text{ (min)}^b$$

		Períodos de retorno (anos)															
		2	5	10	20	50	100	500	1000	2	5	10	20	50	100	500	1000
Posto udiográfico		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
02G/09	Casal Soeiro	368.70	-0.690	487.77	-0.674	567.07	-0.665	643.30	-0.659	742.13	-0.652	816.26	-0.649	987.73	-0.643	1061.50	-0.641
05T/01	Miranda do Douro	146.70	-0.539	179.44	-0.483	202.44	-0.461	224.96	-0.446	254.50	-0.431	276.82	-0.423	328.76	-0.409	351.19	-0.405
03M/01	Chaves	148.96	-0.585	217.29	-0.596	262.48	-0.600	305.82	-0.603	361.90	-0.605	403.91	-0.607	509.90	-0.609	542.72	-0.610
03E/03	Viana do Castelo	202.49	-0.525	286.54	-0.512	342.32	-0.508	395.86	-0.504	465.21	-0.502	517.19	-0.500	637.36	-0.497	689.03	-0.496
10F/01	Aveiro (Universidade)	168.74	-0.529	213.70	-0.530	243.44	-0.531	271.90	-0.531	308.88	-0.531	336.53	-0.531	400.43	-0.532	427.90	-0.532
10H/01	Caramulo	142.94	-0.457	179.08	-0.445	203.10	-0.439	226.18	-0.436	258.08	-0.431	278.50	-0.429	330.37	-0.425	352.67	-0.423
11I/05	Santa Comba Dão	178.77	-0.549	272.05	-0.575	333.98	-0.585	393.45	-0.592	470.50	-0.599	528.26	-0.602	661.80	-0.609	719.22	-0.611
11U/05	Penhas Douradas	163.11	-0.514	242.78	-0.518	295.51	-0.519	346.09	-0.520	411.56	-0.521	480.82	-0.522	573.97	-0.522	622.71	-0.523
12I/03	Covilhã	159.10	-0.527	215.00	-0.540	252.06	-0.546	287.83	-0.550	333.69	-0.554	368.22	-0.558	448.04	-0.561	482.36	-0.562
12G/01	Coimbra (IG)																
13L/02	Graças	219.65	-0.530	282.71	-0.514	324.85	-0.507	364.95	-0.503	417.19	-0.498	456.38	-0.496	546.97	-0.490	585.94	-0.489
21C/06	Lisboa (IGIDL)	176.46	-0.529	214.32	-0.490	239.69	-0.486	264.16	-0.477	295.96	-0.461	319.86	-0.461	375.21	-0.451	399.04	-0.447
21C/02	Lisboa (Portela)	187.70	-0.516	294.15	-0.555	365.58	-0.571	434.48	-0.581	524.03	-0.592	591.31	-0.598	747.18	-0.608	814.30	-0.611
20C/01	S. Julião do Tojal	164.68	-0.545	236.96	-0.557	284.64	-0.561	330.31	-0.565	389.37	-0.569	433.58	-0.569	538.70	-0.572	579.58	-0.573
18M/01	Portalegre	155.34	-0.498	189.67	-0.455	213.08	-0.437	235.80	-0.442								
20I/01	Pavia	155.93	-0.532	239.17	-0.563	294.68	-0.575	348.08	-0.581	417.36	-0.592	489.35	-0.597	589.64	-0.605	641.40	-0.607
22I/02	Évora-Cemitério	197.78	-0.534	228.45	-0.474	250.35	-0.449	271.98	-0.430	300.48	-0.412	322.13	-0.399	372.70	-0.383	394.60	-0.377
25I/02	Beja	163.46	-0.511	190.75	-0.478	224.26	-0.464	247.97	-0.454	278.84	-0.444	302.07	-0.438	355.92	-0.427	379.12	-0.424
26D/01	Sines	169.86	-0.536	233.04	-0.546	274.92	-0.550	315.12	-0.555								
27G/01	Relíquias	162.92	-0.483	208.66	-0.432	240.08	-0.413	270.59	-0.399								
30I/02	Catraia																
31I/01	S. Brás de Alportel																
30M/01	Figueiras																
31F/01	Praia da Rocha	143.24	-0.516	209.85	-0.544	254.08	-0.555	296.58	-0.563	351.59	-0.571	392.85	-0.575	488.25	-0.582	520.26	-0.585
30F/01	Monchique	232.49	-0.549	274.93	-0.480	306.29	-0.452	337.36	-0.433	378.41	-0.415	409.57	-0.406	482.32	-0.387	513.81	-0.382
31I/02	Faro	199.45	-0.541	246.18	-0.483	278.58	-0.461	310.14	-0.446	351.44	-0.431	382.59	-0.422	454.90	-0.408	486.23	-0.403
30M/02	Vila Real de Santo António	163.82	-0.479	204.99	-0.452	232.58	-0.440	259.17	-0.432	293.72	-0.424	319.66	-0.419	379.75	-0.410	405.61	-0.408

(Adaptada de BRANDÃO e RODRIGUES, 1998, e de BRANDÃO *et al.*, 2001).

IDF Curves for different T and duration of the rainfall,

$$i \text{ (mm/h)} = a t \text{ (min)}^b$$

5 e 30 min

		Períodos de retorno (anos)															
		2	5	10	20	50	100	500	1000	2	5	10	20	50	100	500	1000
Posto udiográfico		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
02G/09	Casal Soeiro	368.70	-0.690	487.77	-0.674	567.07	-0.665	643.30	-0.659	742.13	-0.652	816.26	-0.649	987.73	-0.643	1061.50	-0.641
05T/01	Miranda do Douro	146.70	-0.539	179.44	-0.483	202.44	-0.461	224.96	-0.446	254.50	-0.431	276.82	-0.423	328.76	-0.409	351.19	-0.405
03M/01	Chaves	148.96	-0.585	217.29	-0.596	262.48	-0.600	305.82	-0.603	361.90	-0.605	403.91	-0.607	509.90	-0.609	542.72	-0.610
03E/03	Viana do Castelo	202.49	-0.525	286.54	-0.512	342.32	-0.508	395.86	-0.504	465.21	-0.502	517.19	-0.500	637.36	-0.497	689.03	-0.496
10F/01	Aveiro (Universidade)	168.74	-0.529	213.70	-0.530	243.44	-0.531	271.90	-0.531	308.88	-0.531	336.53	-0.531	400.43	-0.532	427.90	-0.532
10H/01	Caramulo	142.94	-0.457	179.08	-0.445	203.10	-0.439	226.18	-0.436	258.08	-0.431	278.50	-0.429	330.37	-0.425	352.67	-0.423
11I/05	Santa Comba Dão	178.77	-0.549	272.05	-0.575	333.98	-0.585	393.45	-0.592	470.50	-0.599	528.26	-0.602	661.80	-0.609	719.22	-0.611
11U/05	Penhas Douradas	163.11	-0.514	242.78	-0.518	295.51	-0.519	346.09	-0.520	411.56	-0.521	480.82	-0.522	573.97	-0.522	622.71	-0.523
12I/03	Covilhã	159.10	-0.527	215.00	-0.540	252.06	-0.546	287.83	-0.550	333.69	-0.554	368.22	-0.558	448.04	-0.561	482.36	-0.562
12G/01	Coimbra (IG)																
13L/02	Graças	219.65	-0.530	282.71	-0.514	324.85	-0.507	364.95	-0.503	417.19	-0.498	456.38	-0.496	546.97	-0.490	585.94	-0.489
21C/06	Lisboa (IGIDL)	176.46	-0.529	214.32	-0.490	239.69	-0.486	264.16	-0.477	295.96	-0.461	319.86	-0.461	375.21	-0.451	399.04	-0.447
21C/02	Lisboa (Portela)	187.70	-0.516	294.15	-0.555	365.58	-0.571	434.48	-0.581	524.03	-0.592	591.31	-0.598	747.18	-0.608	814.30	-0.611
20C/01	S. Julião do Tojal	164.68	-0.545	236.96	-0.557	284.64	-0.561	330.31	-0.565	389.37	-0.569	433.58	-0.569	538.70	-0.572	579.58	-0.573
18M/01	Portalegre	155.34	-0.498	189.67	-0.455	213.08	-0.437	235.80	-0.442								
20I/01	Pavia	155.93	-0.532	239.17	-0.563	294.68	-0.575	348.08	-0.581	417.36	-0.592	489.35	-0.597	589.64	-0.605	641.40	-0.607
22I/02	Évora-Cemitério	197.78	-0.534	228.45	-0.474	250.35	-0.449	271.98	-0.430	300.48	-0.412	322.13	-0.399	372.70	-0.383	394.60	-0.377
25I/02	Beja	163.46	-0.511	190.75	-0.478	224.26	-0.464	247.97	-0.454	278.84	-0.444	302.07	-0.438	355.92	-0.427	379.12	-0.424
26D/01	Sines	169.86	-0.536	233.04	-0.546	274.92	-0.550	315.12	-0.555								
27G/01	Relíquias	162.92	-0.483	208.66	-0.432	240.08	-0.413	270.59	-0.399								
30I/02	Catraia																
31I/01	S. Brás de Alportel																
30M/01	Figueiras																
31F/01	Praia da Rocha	143.24	-0.516	209.85	-0.544	254.08	-0.555	296.58	-0.563	351.59	-0.571	392.85	-0.575	488.25	-0.582	520.26	-0.585
30F/01	Monchique	232.49	-0.549	274.93	-0.480	306.29	-0.452	337.36	-0.433	378.41	-0.415	409.57	-0.406	482.32	-0.387	513.81	-0.382
31I/02	Faro	199.45	-0.541	246.18	-0.483	278.58	-0.461	310.14	-0.446	351.44	-0.431	382.59	-0.422	454.90	-0.408	486.23	-0.403
30M/02	Vila Real de Santo António	163.82	-0.479	204.99	-0.452	232.58	-0.440	259.17	-0.432	293.72	-0.424	319.66	-0.419	379.75	-0.410	405.61	-0.408

M.M.Portela (2019/2020) — 299

$$i \text{ (mm/h)} = a t \text{ (min)}^b$$

30 min e 6 h

		Períodos de retorno (anos)															
		2		5		10		20		50		100		500		1000	
		Parâmetros das curvas intensidade-duração-frequência para durações da precipitação entre 30 minutos e 6 horas															
Posto udográfico		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
02G/09	Casal Sotelo	208.20	-0.533	347.51	-0.581	445.15	-0.602	541.43	-0.617	688.76	-0.632	765.64	-0.640	992.85	-0.656	1091.80	-0.660
05T/01	Miranda do Douro	243.20	-0.699	467.22	-0.766	630.14	-0.793	793.34	-0.812	1011.70	-0.830	1179.10	-0.841	1574.50	-0.859	1747.10	-0.865
03M/01	Chaves	211.55	-0.691	390.39	-0.753	520.77	-0.779	651.83	-0.798	827.78	-0.817	963.14	-0.826	1284.00	-0.847	1424.60	-0.853
03E/03	Viana do Castelo	281.33	-0.624	545.43	-0.704	742.80	-0.738	943.80	-0.762	1216.60	-0.796	1428.20	-0.800	1934.00	-0.824	2158.80	-0.832
10F/01	Aveiro (Universidade)	253.70	-0.654	361.63	-0.693	435.95	-0.697	508.78	-0.707	604.76	-0.718	677.67	-0.725	848.55	-0.738	922.80	-0.742
10H/01	Caramulo	151.70	-0.416	186.42	-0.466	235.34	-0.489	284.34	-0.507	350.11	-0.526	400.79	-0.537	521.30	-0.558	574.26	-0.568
11I/01	Santa Comba Dão	241.72	-0.641	378.45	-0.663	470.50	-0.672	559.43	-0.678	675.14	-0.684	762.16	-0.687	963.91	-0.693	1050.80	-0.696
11I/05	Penhas Douradas	148.98	-0.499	207.35	-0.579	409.67	-0.613	524.90	-0.638	681.88	-0.662	804.03	-0.676	1007.00	-0.700	1226.30	-0.709
12L/03	Covilhã	138.92	-0.493	194.75	-0.521	233.27	-0.535	270.74	-0.545	319.82	-0.555	356.92	-0.562	443.41	-0.573	480.84	-0.577
12G/01	Coimbra (IG)	280.69	-0.653	373.48	-0.647	436.65	-0.644	496.49	-0.643	574.03	-0.641	632.17	-0.640	766.83	-0.639	824.45	-0.638
13L/02	Gratão	229.22	-0.561	361.34	-0.604	453.73	-0.623	544.85	-0.637	665.47	-0.651	757.34	-0.660	973.15	-0.675	1067.00	-0.680
21O/06	Liéboa (IGIDL)	351.82	-0.626	345.32	-0.634	407.36	-0.637	466.92	-0.639	544.07	-0.641	601.92	-0.642	735.65	-0.644	793.16	-0.645
21C/02	Liéboa (Portela)	369.15	-0.711	417.14	-0.665	461.54	-0.647	506.26	-0.634	565.82	-0.623	611.24	-0.616	717.88	-0.605	763.88	-0.602
20C/01	S. Julião do Tojal	205.93	-0.596	238.70	-0.554	265.17	-0.525	292.01	-0.512	327.90	-0.500	355.32	-0.493	419.64	-0.482	447.50	-0.476
19M/01	Portalegre	219.15	-0.622	389.81	-0.674	504.10	-0.697	617.67	-0.712	738.83	-0.729	864.39	-0.739	1156.70	-0.756	1275.57	-0.761
20I/01	Pavia	237.28	-0.659	306.77	-0.647	353.20	-0.642	397.89	-0.639	455.90	-0.635	490.43	-0.633	600.18	-0.630	643.53	-0.629
22J/02	Évora-Cemitério	366.51	-0.713	671.47	-0.736	709.63	-0.744	843.21	-0.751	1017.00	-0.757	1147.90	-0.761	1451.30	-0.767	1582.10	-0.769
25J/02	Beja	303.85	-0.692	468.63	-0.727	581.81	-0.743	692.32	-0.754	837.37	-0.765	947.16	-0.772	1203.30	-0.783	1314.20	-0.787
26D/01	Simes	316.67	-0.719	416.93	-0.713	483.30	-0.711	546.97	-0.709	629.39	-0.707	691.15	-0.706	833.87	-0.705	895.20	-0.704
27G/01	Relíquias	285.02	-0.658	484.95	-0.683	619.29	-0.691	748.90	-0.697	917.30	-0.702	1043.80	-0.705	1336.80	-0.710	1462.90	-0.712
30J/02	Catrala					358.73	-0.583			600.18	-0.595	745.31	-0.600	1225.90	-0.611	1519.50	-0.618
31J/01	S. Brás de Alportel					342.70	-0.575			589.56	-0.576	709.50	-0.577	1174.90	-0.580	1459.40	-0.581
30M/01	Figueiras					373.03	-0.579			748.70	-0.592	1006.60	-0.598	1980.80	-0.610	3323.50	-0.656
31F/01	Praia da Rocha	354.91	-0.684	366.91	-0.700	441.75	-0.706	513.84	-0.711	607.46	-0.715	677.78	-0.718	840.58	-0.723	910.65	-0.724
30F/01	Monchique	245.74	-0.566	312.01	-0.509	361.22	-0.491	409.85	-0.479	473.87	-0.469	522.31	-0.463	695.30	-0.454	683.80	-0.451
31J/02	Faro	316.50	-0.679	475.42	-0.686	583.37	-0.688	686.94	-0.690	821.02	-0.691	921.51	-0.692	1153.70	-0.693	1253.80	-0.694
30M/02	Vila Real de Santo António	342.88	-0.690	483.64	-0.694	577.01	-0.696	666.52	-0.697	782.29	-0.698	869.87	-0.699	1069.80	-0.700	1155.90	-0.700

		Períodos de retorno (anos)															
		2		5		10		20		50		100		500		1000	
		Parâmetros das curvas intensidade-duração-frequência para durações da precipitação entre 5 e 48 horas															
Posto udiográfico		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
02G/09 Casal Soeiro		292.29	-0.589	287.00	-0.545	293.03	-0.527	302.25	-0.513	317.15	-0.499	329.73	-0.491	361.60	-0.477	376.10	-0.472
05T/01 Miranda do Douro		255.40	-0.701	269.27	-0.669	283.58	-0.656	299.23	-0.646	321.19	-0.636	338.48	-0.630	380.08	-0.620	398.44	-0.617
03M/01 Chaves		171.15	-0.654	189.58	-0.635	203.14	-0.627	216.72	-0.621	234.84	-0.614	248.70	-0.610	281.34	-0.603	295.54	-0.601
03E/03 Viana do Castelo		325.76	-0.652	317.36	-0.616	320.05	-0.599	325.96	-0.586	336.65	-0.574	346.17	-0.566	371.29	-0.552	383.00	-0.547
10F/01 Aveiro (Universidade)		278.52	-0.669	360.93	-0.677	415.45	-0.681	467.72	-0.684	535.97	-0.687	586.04	-0.689	703.13	-0.693	753.46	-0.694
10H/01 Caramulo		208.61	-0.504	235.18	-0.496	253.03	-0.492	270.27	-0.488	292.72	-0.485	309.62	-0.482	348.84	-0.478	365.76	-0.477
11I/01 Santa Comba Dão		239.06	-0.639	347.38	-0.651	406.55	-0.659	488.63	-0.660	578.72	-0.663	646.41	-0.666	803.21	-0.669	870.74	-0.671
11L/05 Penhas Douradas		223.11	-0.559	246.16	-0.545	262.85	-0.528	279.48	-0.526	301.63	-0.522	318.54	-0.518	358.34	-0.511	375.66	-0.508
12L/03 Covilhã		152.39	-0.505	168.42	-0.479	179.26	-0.480	190.07	-0.473	204.45	-0.467	215.44	-0.463	241.30	-0.455	253.57	-0.453
12G/01 Coimbra (IG)		271.67	-0.653	485.15	-0.695	639.05	-0.712	792.84	-0.725	998.29	-0.738	1155.70	-0.745	1527.60	-0.758	1889.90	-0.762
13L/02							-0.490	236.26	-0.481	252.11	-0.472	264.47	-0.466	294.10	-0.456	307.14	-0.452
21C/06							-0.732	792.97	-0.739	963.23	-0.747	1074.50	-0.752	1357.30	-0.760	1479.80	-0.762
21G/02							-0.767	1139.40	-0.769	1378.10	-0.771	1557.10	-0.772	1970.90	-0.773	2148.80	-0.774
20C/01							-0.770	1430.30	-0.781	1837.50	-0.792	2147.20	-0.797	2872.40	-0.807	3186.90	-0.810
18M/01							-0.617	336.72	-0.612	368.50	-0.606	392.58	-0.603	448.78	-0.597	473.11	-0.596
20M/01 Pavia		282.93	-0.680	395.64	-0.689	483.85	-0.692	568.61	-0.695	678.44	-0.697	760.81	-0.698	951.27	-0.700	1033.20	-0.701
22J/02 Évora-Capela		364.04	-0.712	532.50	-0.732	654.02	-0.741	772.17	-0.747	926.70	-0.753	1043.40	-0.757	1314.90	-0.764	1432.20	-0.766
25J/02 Beja		368.82	-0.725	511.80	-0.742	608.92	-0.750	703.36	-0.756	826.97	-0.762	920.38	-0.766	1138.10	-0.773	1232.00	-0.776
26D/01 Sines		293.59	-0.709	455.06	-0.733	566.36	-0.744	675.25	-0.752	818.37	-0.759	926.80	-0.764	1180.00	-0.772	1289.80	-0.775
27G/01 Relíquias	48															10	-0.819
30J/02 Caltraia																10	-0.616
31J/01 S. Brás de Alportel																30	-0.682
30M/01 Figueirais						758.40	-0.685			1686.50	-0.712	2324.80	-0.724	5081.90	-0.752	6990.60	-0.761
31F/01 Praia da Rocha		420.21	-0.773	481.99	-0.749	527.23	-0.739	572.27	-0.732	632.04	-0.725	677.55	-0.721	784.16	-0.714	830.42	-0.711
30F/01 Monchique		593.83	-0.710	1587.20	-0.785	2342.80	-0.810	3107.90	-0.825	4135.30	-0.840	4923.70	-0.848	6783.50	-0.860	7594.20	-0.864
31J/02 Faro		405.67	-0.726	594.84	-0.724	720.14	-0.724	840.34	-0.723	995.95	-0.723	1112.80	-0.723	1382.10	-0.722	1497.90	-0.722
30M/02 Vila Real de Santo António		432.64	-0.735	536.23	-0.718	605.53	-0.711	674.11	-0.706	763.99	-0.701	831.45	-0.699	988.58	-0.694	1056.30	-0.693

Based on the previous IDF curves, procedures to establish the short duration design rainfalls (less than 24 h) in any watershed of Portugal considering the available information in the nearby rain gages with annual maximum daily rainfalls (the only records normally available).

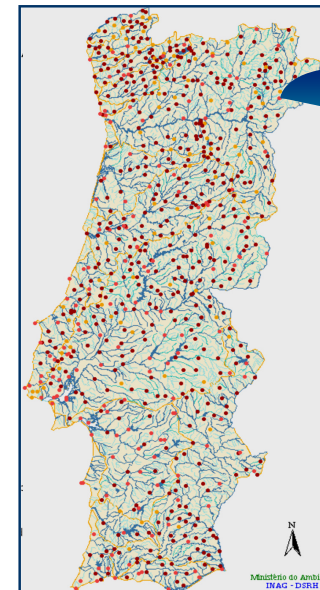
Com base nas anteriores curvas IDF, procedimentos para estimar precipitações intensas em qualquer bacia hidrográfica do País, considerando, cumulativamente, informação udométrica em postos localizados naquela bacia ou nas proximidades da mesma, por norma apenas relativa a precipitações diárias máximas anuais.

Precipitações e hietogramas de projeto/design rainfalls and hyetographs

Target: Coupling of the previous results and models into an integrated approach aiming at evaluating the maximum annual rainfalls with any duration and return period based on the application of a kind of partition coefficients (ratio) to the estimates of the annual maximum daily rainfall, Pamd, available in most of the rainfall monitoring networks.

Objetivo: Estimativa da precipitação intensa relevante em termos da análise de cheias numa dada bacia hidrográfica a partir da precipitação diária máxima anual com o período de retorno T nessa mesma bacia, Pdma, mediante aplicação de adequado “coeficiente de repartição” estabelecido a partir das curvas IDF de BRANDÃO et al., 2001, 2004.

Precipitações e hietogramas de projeto/design rainfalls and hyetographs

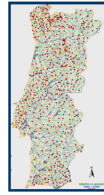


Rainfall measuring network/Rede com registos de precipitações

Widespread monitoring network able of providing, by means of statistical models, accurate estimates of the annual maximum daily rainfall – even for very small watersheds.

“Extensa” rede udométrica (número de pontos de medição e dimensão das amostras) → estimativa de precipitações diárias máximas anuais fiáveis e representativas do regime local da precipitação (...mesmo para pequenas bh).

27 rain gages considered in the study by BRANDÃO et al., 2001, and with IDF curves



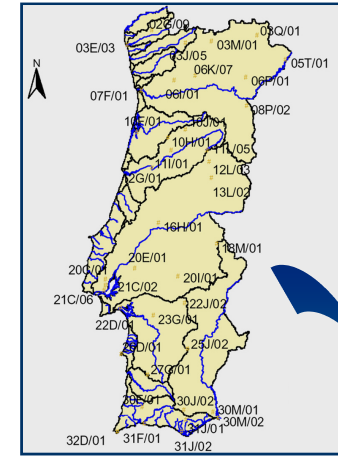
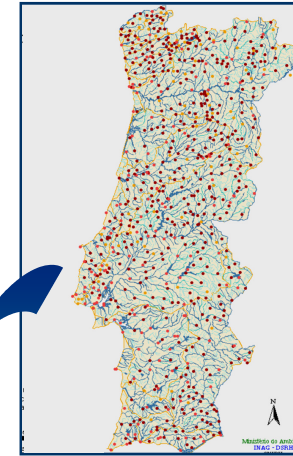
Rain gauges with known and accurate IDF curves

Postos dispoño de IDF criteriosamente estabelecidas

Tabela 4.1 (CB) - Parâmetros de curvas IDF estabelecidas com base em precipitações intensas registradas em pontos estratégicos do Continente

Ponto de observação	Período de retorno (anos)									
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000	1500
1. São Paulo	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
2. Rio de Janeiro	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
3. Belo Horizonte	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
4. Curitiba	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
5. Porto Alegre	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
6. Brasília	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
7. Salvador	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
8. Recife	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
9. Fortaleza	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
10. Manaus	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
11. Belém	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
12. Goiânia	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
13. Foz de Iguaçu	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
14. Rio Grande	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
15. Florianópolis	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
16. Curitiba	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
17. São Paulo	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
18. Rio de Janeiro	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
19. Belo Horizonte	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
20. Curitiba	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
21. Porto Alegre	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
22. Brasília	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
23. Salvador	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
24. Recife	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
25. Fortaleza	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
26. Manaus	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
27. Belém	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
28. Goiânia	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
29. Foz de Iguaçu	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
30. Rio Grande	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
31. Florianópolis	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
32. Curitiba	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45

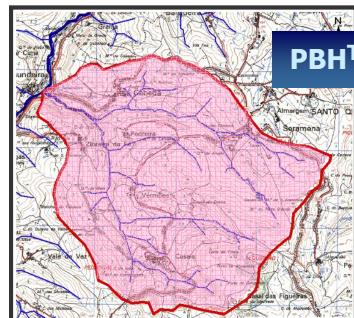
M.M.Portela (2019/2020) ----- 308



"Coupling" of both information into an integrated model able of providing accurate estimates for the short duration rainfalls relevant for flood analysis

Estimativas mais fiáveis da precipitação com curta duração interveniente na análise de cheias

What do we want? – maximum annual rainfall with the duration of t h and the return period of T years.



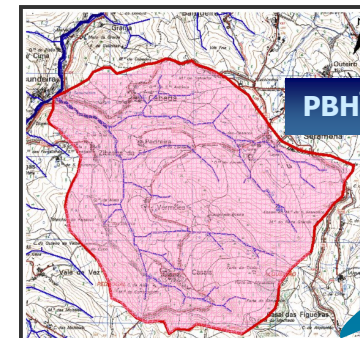
$PBH^T_t = ?$

What do we know? – the location of the watershed

What can we estimate based on the available information? – maximum daily rainfall with the same return period of T years:

PBH^T_{24}

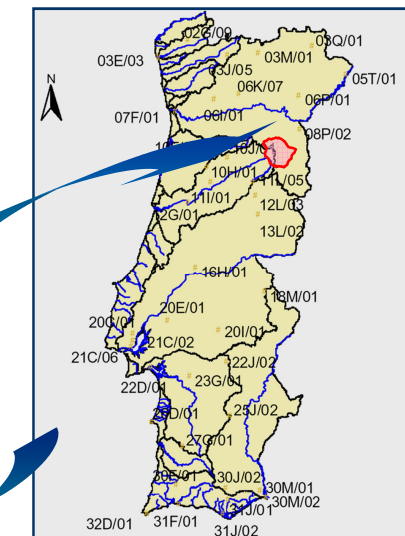
M.M.Portela (2019/2020) ----- 308



$PBH^T_t = ?$

Based on the study on IDFs, definition of the partition coefficient/ratio (coeficiente de repartição) between the rainfall with the foreseen duration and the one with 24 h duration:

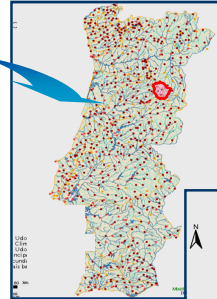
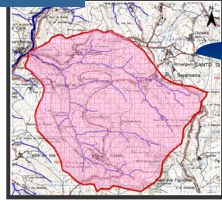
P_t/P_{24}



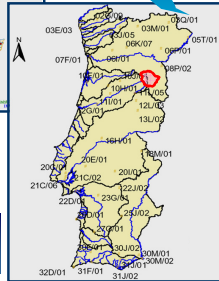
M.M.Portela (2019/2020) ----- 309

Based on the statistical analysis of the local rainfall records, establishment of the maximum daily rainfall with the foreseen return period, T

$$PBH_t^T = ?$$



$$PBH_{24}^T$$



Maximum annual rainfall with duration t and return period T:

$$PBH_t^T = PBH_{24}^T \times P_t/P_{24}$$

$$P_t/P_{24}$$

Partition coefficient

Selection of the IDF curve

Thiessen Polygon method to assign an influence area to each one of the 23 rain gages with known IDF within which each specific IDF curve can be applied (approach valid because of the smooth pattern of the ration P_t/P_{24})

Watershed under study



Na área de influência de cada um dos vinte sete postos dispondo de IDF, o quociente P_t/P_{24} é o que se obtém por aplicação das IDF estabelecidas para esse posto (para o período de retorno pretendido, ou em termos da média dos quocientes relativos aos diferentes períodos de retorno).

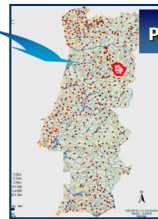
(... pequena variação espacial de P_t/P_{24} ; permite considerar ou não dependência entre P_t/P_{24} e T).

Since the Portuguese rainfall monitoring network provides records of annual maximum daily rainfall in abundance - with regard to both the number of measurement points and the size of the samples – the approaches developed based on a “partition coefficient” allow to account for the specific features of the local intense rainfall in an watershed.

$$PBH_t^T = ?$$

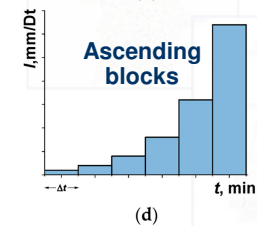
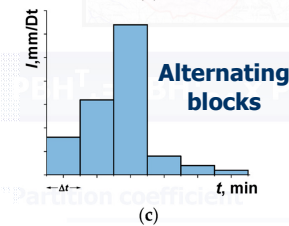
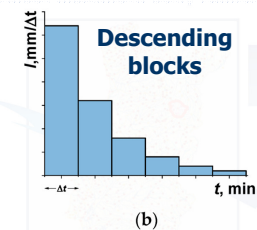
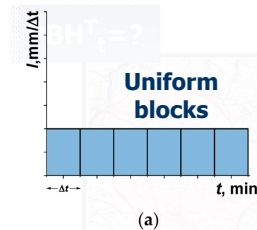


$$PBH_{24}^T$$

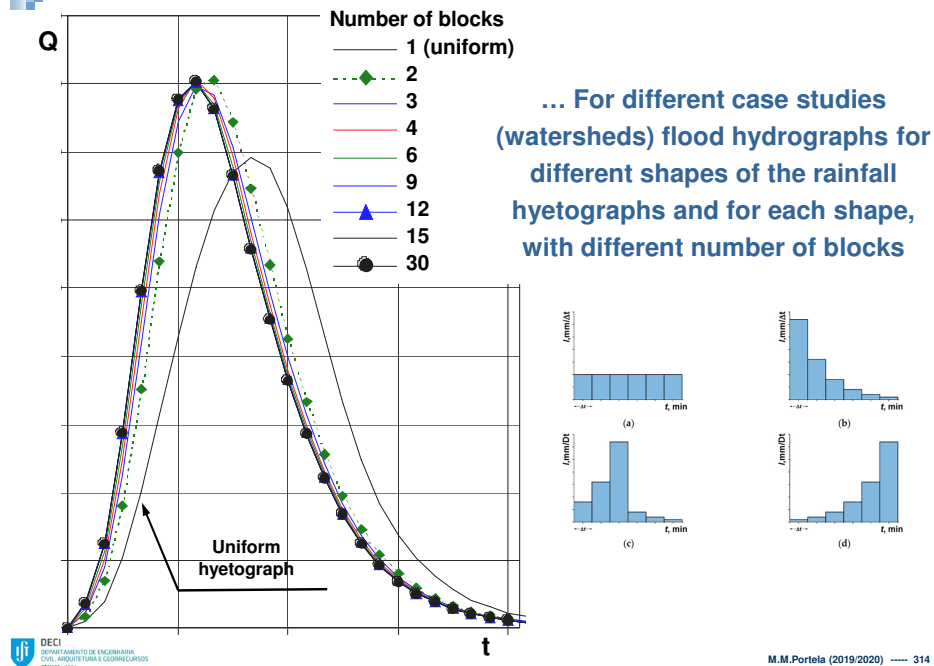


$$PBH_t^T = PBH_{24}^T \times P_t/P_{24}$$

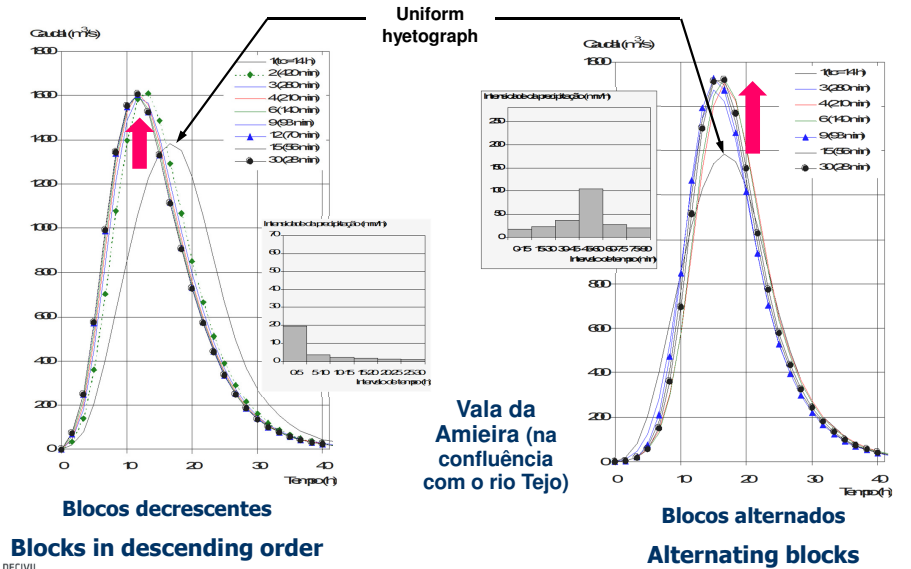
$$P_t/P_{24}$$



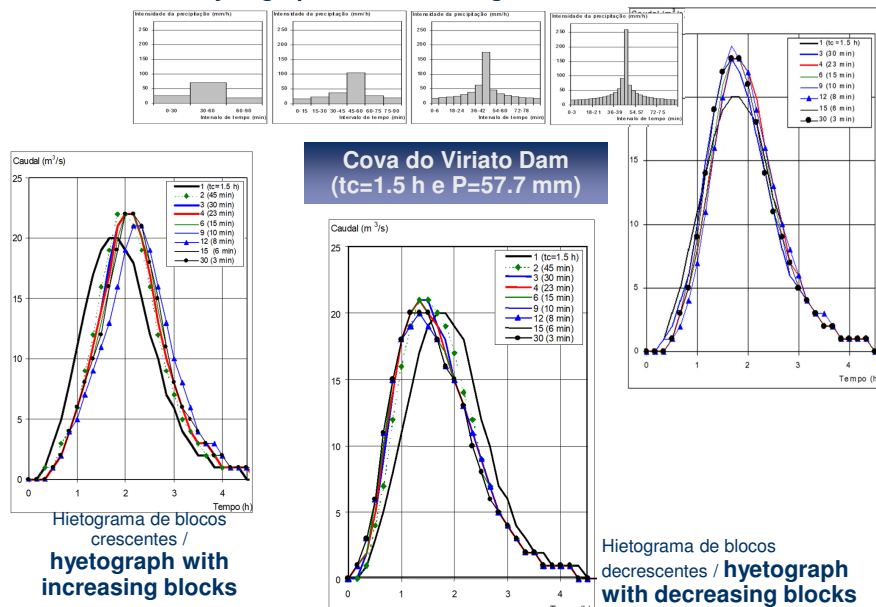
... approach also applicable to establish design hyetographs ...



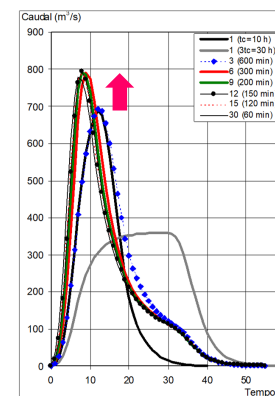
Assignment of design hietographs to the design rainfalls (Atribuição de hietogramas de projeto às precipitações de projecto)



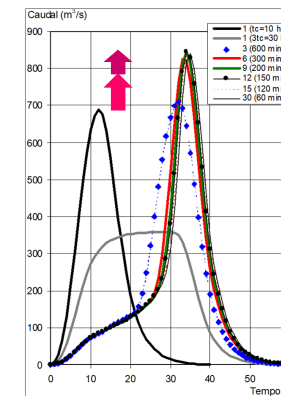
Hietograph with alternating blocks / Hietograma de blocos alternados



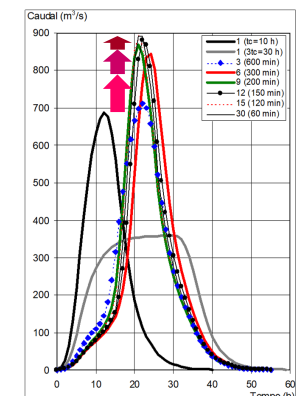
Decreasing blocks



Increasing blocks



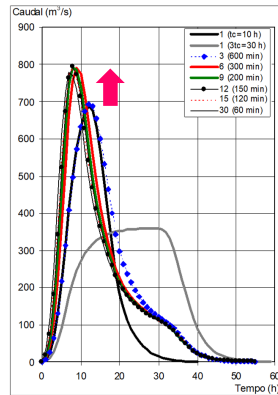
Alternating blocks



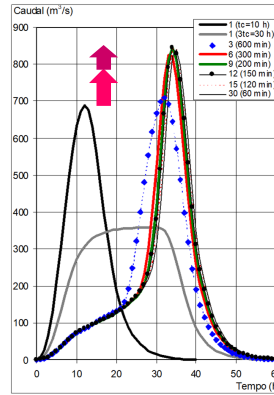
Ribeira de Lavre em Lavre. Hidrogramas de cheia para a precipitação com duração, quer igual ao tempo de concentração e intensidade uniforme (precipitação de 115.6 mm em 10 h), quer tripla do tempo de concentração e diferente tipos de hietogramas de projecto (precipitação de 149.1 mm em 30 h).

... Ribeira do Lavre. Flood hydrographs for tc (10 h; 115.6 mm) and 3 tc (30 h; 149.1 mm) with uniform and variable hietographs ...

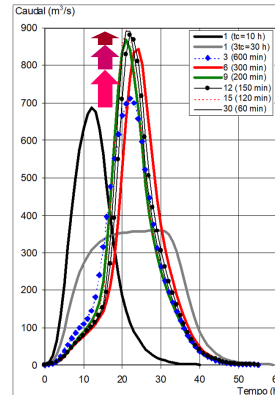
Decreasing blocks Blocos decrescentes



Increasing blocks Blocos crescentes



Alternating blocks Blocos alternados



Comparatively to the uniform hyetograph, the consideration of the temporal variability of the rainfall always results and higher peak flood discharges. Additionally, different types of hyetographs result in different peak flood discharges — the highest for the alternating blocks

— 318

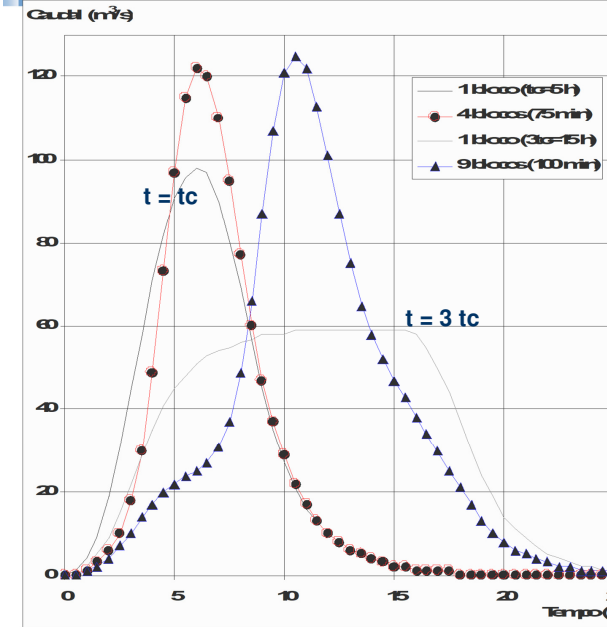
Alternating blocks

Toulica dam river section

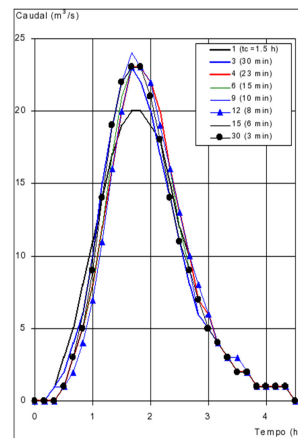
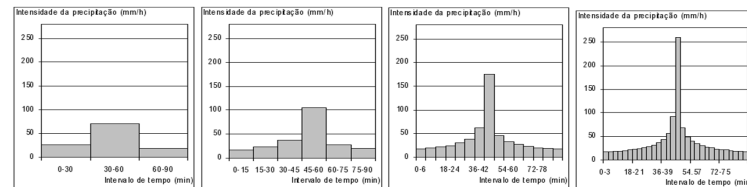
Design rainfall with duration equal to the time of concentration and three times that time and with uniform and variable hyetographs.

Secção da barragem de Toulica

Precipitações de projecto com durações igual e tripla do tempo de concentração e intensidade uniforme e não uniforme.

DECIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL, ARQUITECTURA E GEOTECNICAS
FEUP-FCUP

M.M.Portela (2019/2020) — 319



Number of blocks of the rainfall hyetograph (número de blocos do hietograma da precipitação)

Duration equal to tc → 3 a 4 blocos

Duration 3 times tc → 6 a 9 blocos



Establishment of the design rainfall

Estabelecimento da precipitação de projecto

$$i(\text{mm/h}) = a t(\text{min})^b$$



Posto udográfico	2		5		10	
	a	b	a	b	a	b
02G/09 Casal Soeiro	208.29	-0.5330	347.51	-0.5810	445.15	-0.6020
05T/01 Miranda do Douro	243.20	-0.6985	467.22	-0.7656	630.14	-0.7926
03M/01 Chaves	211.55	-0.6906	390.39	-0.7531	520.77	-0.7794
03E/03 Viana do Castelo	281.33	-0.6243	545.43	-0.7041	742.80	-0.7376
10F/01 Aveiro (Universidade)	253.70	-0.6541	361.63	-0.6829	435.95	-0.6967
10H/01 Caramulo	118.17	-0.4160	186.42	-0.4660	235.34	-0.4890
11V/01 Santa Comba Dão	241.72	-0.6410	378.45	-0.6630	470.50	-0.6720
11L/05 Penhas Douradas	148.88	-0.4990	297.38	-0.5790	409.76	-0.6130
12L/03 Covilhã	138.92	-0.4944	196.47	-0.5237	235.68	-0.5374

Estabelecimento da precipitação de projecto

1. Cálculo do tempo de concentração.
2. Identificação do(s) posto(s) udométrico(s) com influência na bacia.
3. Precipitação diária máxima anual para o período de retorno pretendido.
4. Atribuição de hietogramas não uniformes no tempo à precipitação de projecto ... número de blocos, forma do hietograma, procedimento de cálculo dos blocos de precipitação ... blocos alternados ... menção à disposição resultante do estudo a propósito da fórmula racional com factor de majoração.

Establishment of rainfall hyetographs

1. Computation of the time of concentration.
2. Identification of the rain gage(s) to be considered.
3. By applying statistical tools, establishment of the annual maximum daily rainfall with a given return period/recurrence interval.
4. Establishment of the design hyetographs – number of blocks and shape of the hyetograph ... selection of the most suitable shape ... alternate blocks ... results provided by the rational method with scaling factor.

--- 322

RATIONAL FORMULA WITH A SCALING FACTOR**FÓRMULA RACIONAL COM FACTOR DE MAJORAÇÃO**

$$Q = f C i A$$

$$f = 2 - \sqrt{n}$$

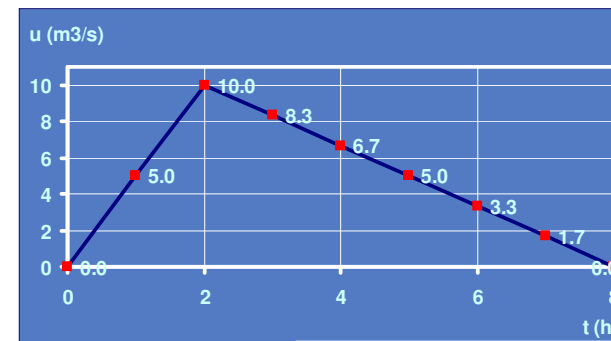
... rational formula with a scaling factor that accounts for the increase in the peak flood discharges due to the temporal variability of the rainfall intensity

Among all the possible permutations of the blocks of the hyetograph the maximum maximum direct peak flood discharge is achieved based on a temporal distribution of the blocks roughly symmetrical to the temporal distribution of the ordinates of the unit hydrograph around its highest ordinate.

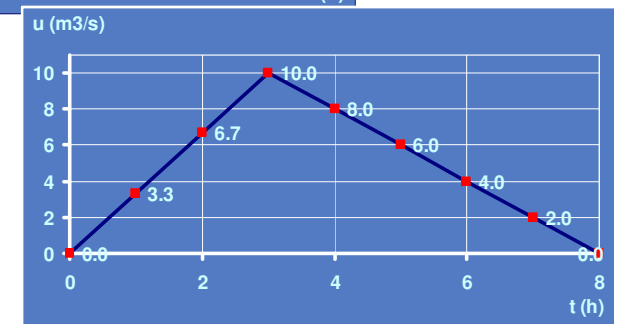
Fórmula racional com fator de majoração

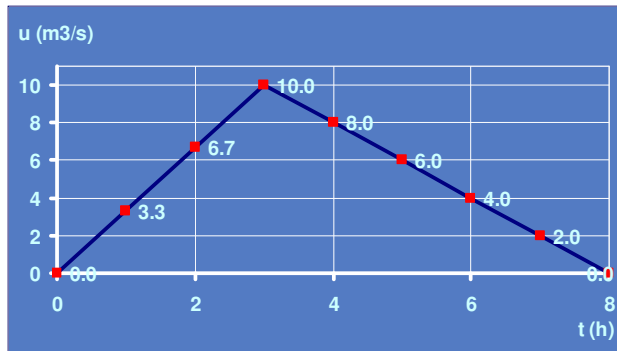
... o caudal máximo dos máximos caudais do escoamento directo resultantes das possíveis permutações dos blocos de precipitação corresponde a uma distribuição temporal dos números de ordem dos blocos de precipitação que, grosso modo, é simétrica da distribuição temporal dos números de ordem das ordenadas do hidrograma unitário em torno do número de ordem 1 (ordenada máxima do hidrograma unitário) ...

324

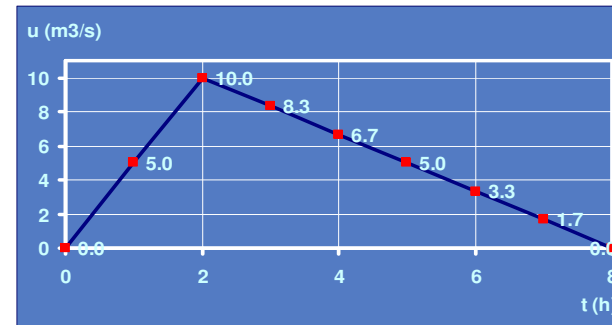
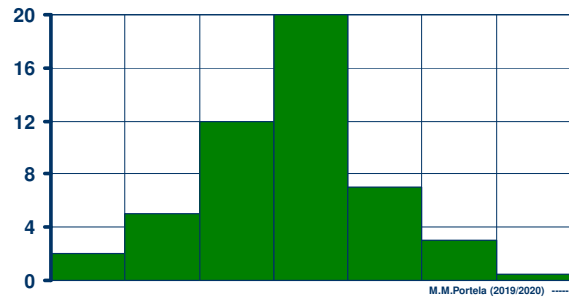


Unit hydrographs

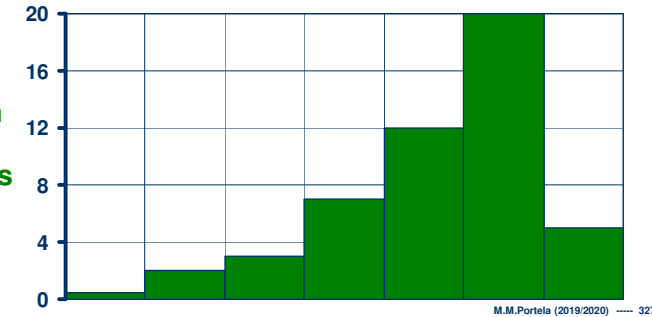




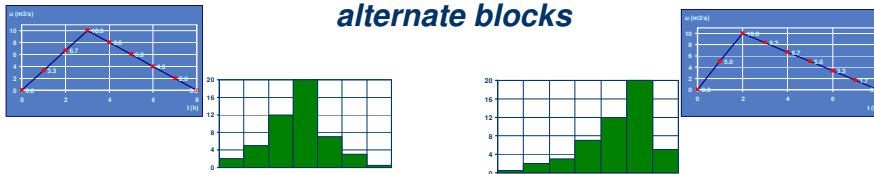
Hyetograph with alternating blocks



Hyetograph with partially alternating blocks

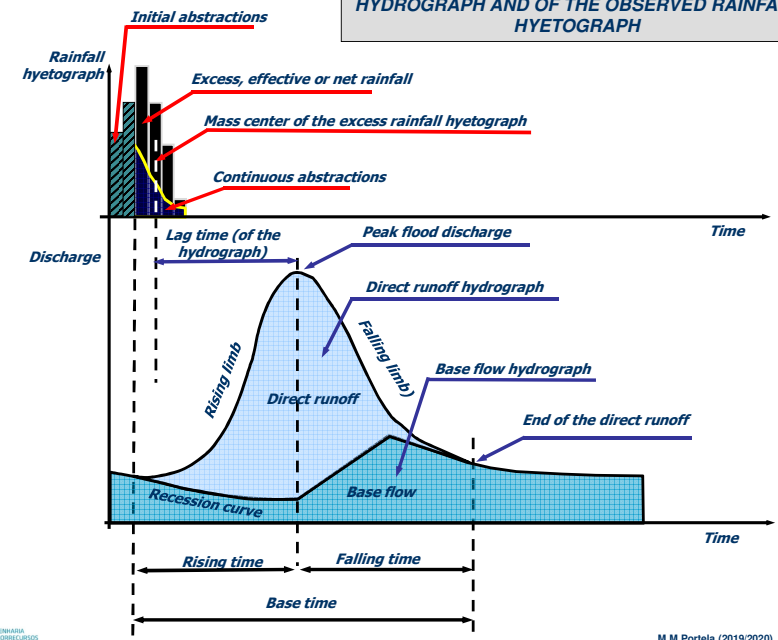


From a theoretical point of view, the blocks may not be exactly alternating, depending on the shape of the HUD, but there will always be some alternation ... However, in most of the applications the HUD is not known and, so, the most common decision is for hyetographs with alternate blocks

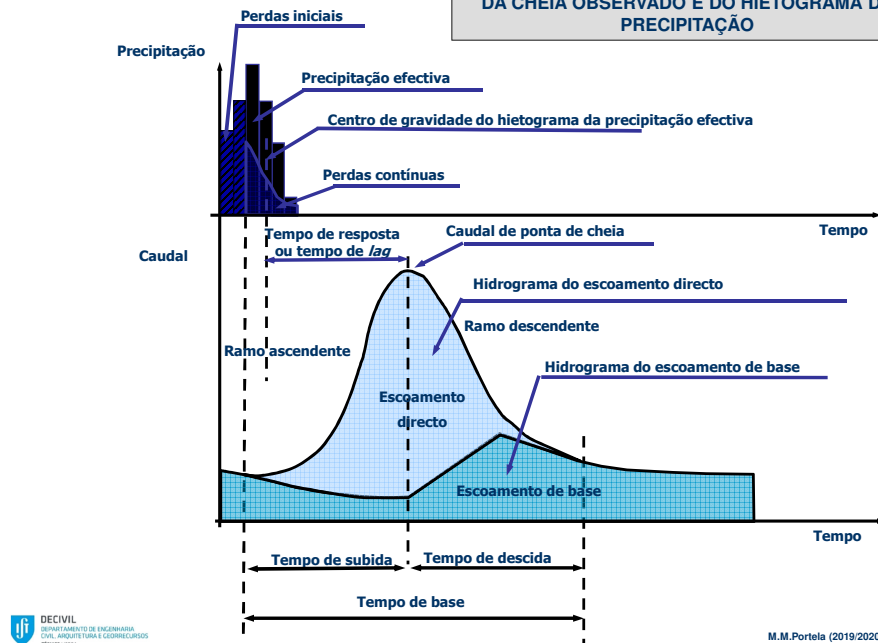


Em rigor, os blocos podem não ser estritamente alternados, mas existirá sempre alguma alternância em parte do hietograma ... Na generalidade das aplicações desconhece-se a forma do HUD que traduz o comportamento de uma dada bacia hidrográfica em situação de cheia hietogramas de blocos alternados ...

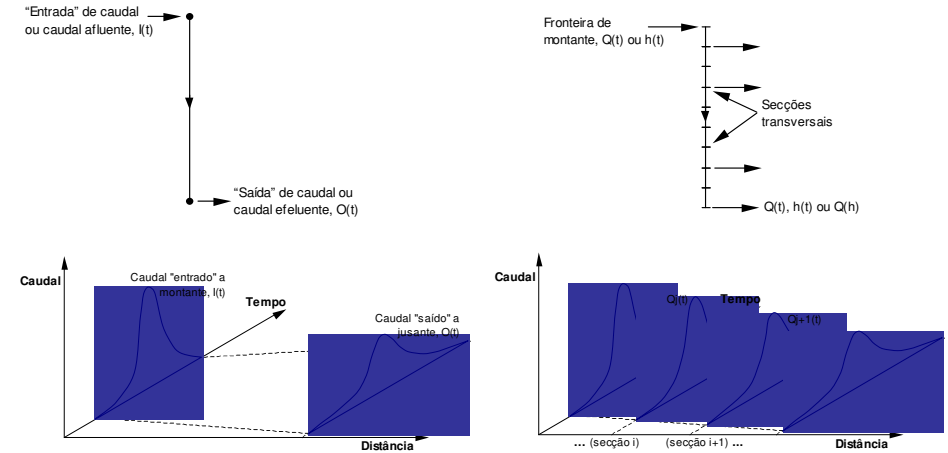
COMPONENTS OF THE OBSERVED FLOOD HYDROGRAPH AND OF THE OBSERVED RAINFALL HYETOGRAPH



RESUMO DAS COMPONENTES DO HIDROGRAMA DA CHEIA OBSERVADO E DO HIETOGRAMA DA PRECIPITAÇÃO



FLOOD HYDROGRAPHS ROUTING IN NATURAL RIVER REACHES – fundamental concepts (propagação de hidrogramas de cheias em trechos de rio – conceitos básicos)



Modelos agregados (hidrológicos; *lumped*) e distribuídos (hidráulicos; *distributed*)

FLOOD HYDROGRAPHS ROUTING IN NATURAL RIVER REACHES – fundamental concepts (propagação de hidrogramas de cheias em trechos de rio – conceitos básicos)

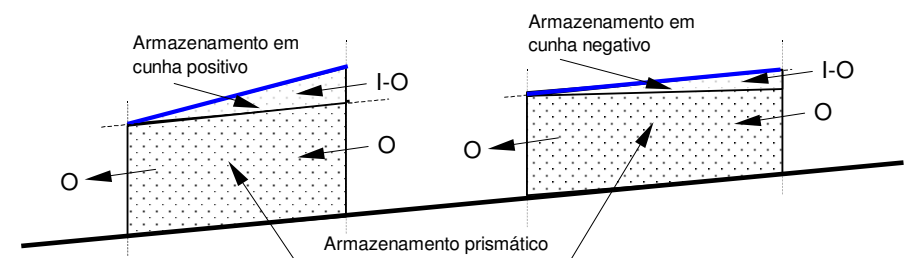


Modelos agregados (hidrológicos; *lumped*) e distribuídos (hidráulicos; *distributed*)

Os modelos agregados são os mais simples, baseando-se na equação da continuidade expressa sob a forma de equação de armazenamento complementada por uma relação adicional que depende do tipo de problema a que se aplicam tais modelos (*HUI Clark ... reservatório linear*)

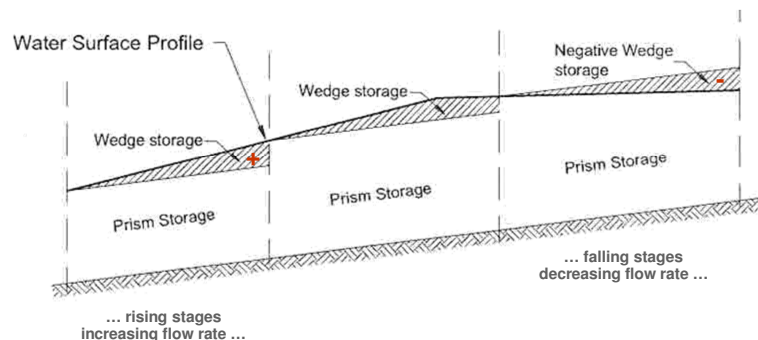
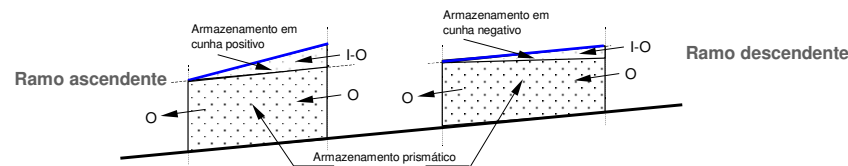
$$\frac{dS}{dt} = I - O \Leftrightarrow dS = I dt - O dt$$

Método de Muskingum – Modelo agregado para propagação de hidrogramas de cheia (*lumped model for flood hydrograph routing*)



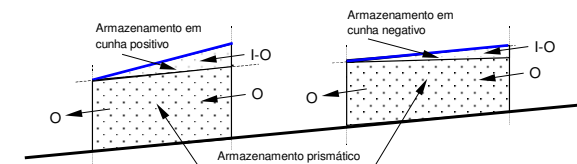
... the storage in each river reach is modeled as a sum of two storages: a prismatic storage and a wedge storage. The former is the volume defined by the steady flow and the latter is an additional storage due to the flood wave propagation

Método de Muskingum – Modelo agregado para propagação de hidrogramas de cheia (lumped model for flood hydrograph routing)



... during the rising stages of the flood (increasing flow rate) the wedge storage is positive and added to the prismatic storage while during the falling stages (decreasing flow rate) the wedge storage is negative and is subtracted to the prism storage.

Método de Muskingum



Em cada trecho de canal a que é aplicado o método, o armazenamento prismático é dado pelo produto do caudal efluente do trecho pelo tempo de percurso no trecho, K . O armazenamento em cunha é dado por uma diferença ponderada entre os caudais afluente na secção de montante do trecho e efluente na de jusante, diferença também multiplicada pelo tempo de percurso no trecho de modo a obter-se um volume (... the volume of the prismatic storage is related to the outflow rate, O , multiplied by the travel time through the river reach, K . The volume of the wedge storage is a weighted difference between inflow and outflow, also multiplied by the travel time):

$$S = KO + KX(I - O) = K[XI + (1 - X)O]$$

X factor de ponderação (weighting factor);
 K tempo de percurso no trecho de rio (travel time)

$$\frac{dS}{dt} = I - O \Leftrightarrow dS = I dt - O dt \quad S = KO + KX(I - O) = K[XI + (1 - X)O]$$

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t}$$

$$S_1 = K[XI_1 + (1 - X)O_1]$$

$$S_2 = K[XI_2 + (1 - X)O_2]$$

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1$$

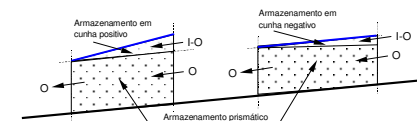
$$C_0 = \frac{\Delta t/K - 2X}{2(1 - X) + \Delta t/K}$$

$$C_1 = \frac{\Delta t/K + 2X}{2(1 - X) + \Delta t/K}$$

$$C_2 = \frac{2(1 - X) - \Delta t/K}{2(1 - X) + \Delta t/K}$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1$$

Método de Muskingum



$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1$$

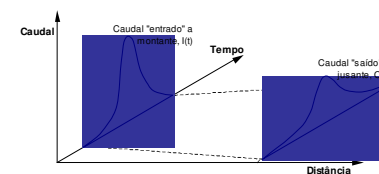
$$C_0 = \frac{\Delta t/K - 2X}{2(1 - X) + \Delta t/K}$$

$$C_1 = \frac{\Delta t/K + 2X}{2(1 - X) + \Delta t/K}$$

$$C_2 = \frac{2(1 - X) - \Delta t/K}{2(1 - X) + \Delta t/K}$$

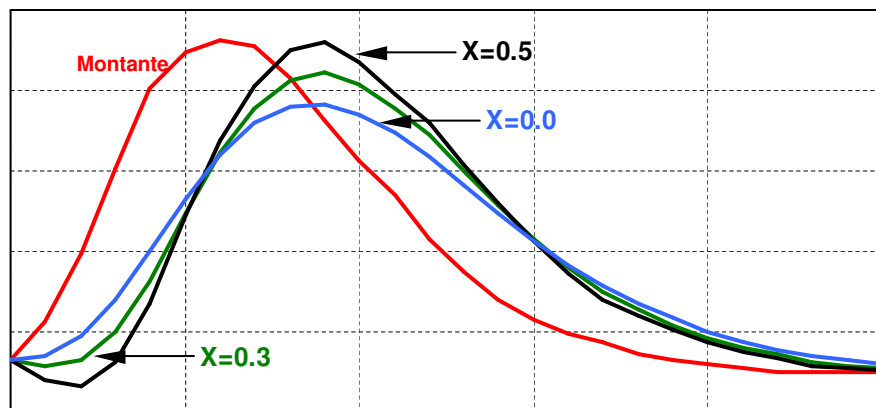
O parâmetro K pode ser entendido como o tempo de percurso da onda de cheia ao longo do trecho de canal, tendo em conta a translação de tal onda.
O parâmetro X é um factor de ponderação que introduz o efeito do amortecimento da onda durante a propagação no trecho de canal. O amortecimento traduz-se na redução do caudal de ponta do hidrograma efluente no extremo de jusante do trecho relativamente ao caudal de ponta do hidrograma afluente ao extremo de montante, com consequente aumento do tempo de base daquele hidrograma relativamente ao tempo de base deste último hidrograma

($0 \leq X \leq 0.5$ e incremento de tempo geralmente entre $K/3 \leq \Delta t \leq K$)



The parameter K can be considered as representing the travel time of the flood hydrograph along the river channel, as a pure translation movement.
The parameter X is a weighting factor responsible for the "dumping" of the flood hydrograph as it propagates downstream. As a consequence the peak flood discharge decreases and the base time of the flood hydrograph increases.

Caudal

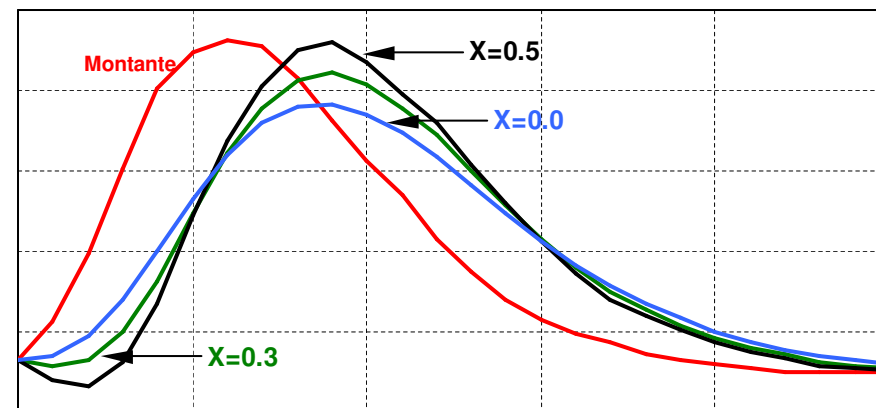


Tempo

If $K=\Delta t$ e $X=0.5$ then $C_0=-C_2$ and $C_1=1$ and the flood wave suffers a pure translation when propagating downstream, that is, without any decrease of the peak flood discharge (unless for the numerical errors of the method). If $X=0$ then $S=KO$, which is the equation of a linear reservoir; under this conditions the peak flood discharge decrease is the highest.

- 338

Caudal



Tempo

Se $K=\Delta t$ e $X=0.5$ obtém-se $C_0=-C_2$ e $C_1=1$ e a onda de cheia sofre uma translação pura ao propagar-se no trecho, portanto, sem qualquer amortecimento (a menos de erros numéricos inerentes ao método). Se $X=0$ obtém-se $S=KO$, equação que traduz o modelo do reservatório linear, sendo o amortecimento máximo.

- 339