



INSTITUTO  
SUPERIOR DE  
AGRONOMIA  
*Universidade de Lisboa*

Departamento de Ciências e  
Engenharia de Biosistemas

# HIDROLOGIA

## 5. ÁGUA NO SOLO. INFILTRAÇÃO E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### 5.2. INFILTRAÇÃO – BACIA HIDROGRÁFICA

---

- Métodos empíricos para cálculo da infiltração
  - Método do índice  $\phi$
  - Método do índice  $\phi$  modificado
  - Método do SCS

### Modelos empíricos

- À escala da bacia hidrográfica

{ Método do Índice  $\phi$   
 método do Índice  $\phi$ , modificado  
 método do *Soil Conservation Service*

- ➔ Estes modelos foram desenvolvidos na caracterização das relações precipitação-escoamento, sendo normalmente vistos na perspectiva de obtenção do hietograma de precipitação eficaz sobre a bacia dado o hietograma de precipitação total
- ➔ Mas a obtenção do hietograma eficaz implica a modelação da infiltração (mesmo que de forma indirecta e/ou agregada a outros processos hidrológicos, como a intercepção e a retenção superficial)

Os diferentes métodos devem ser analisados segundo duas perspectivas

- **Existe hidrograma de escoamento** – é possível fazer a calibração dos parâmetros (dado que  $P_n = Q_d$ )
- **Não existe hidrograma de escoamento** – os modelos são aplicados em simulação, tendo que se recorrer a relações regionais para a obtenção dos parâmetros

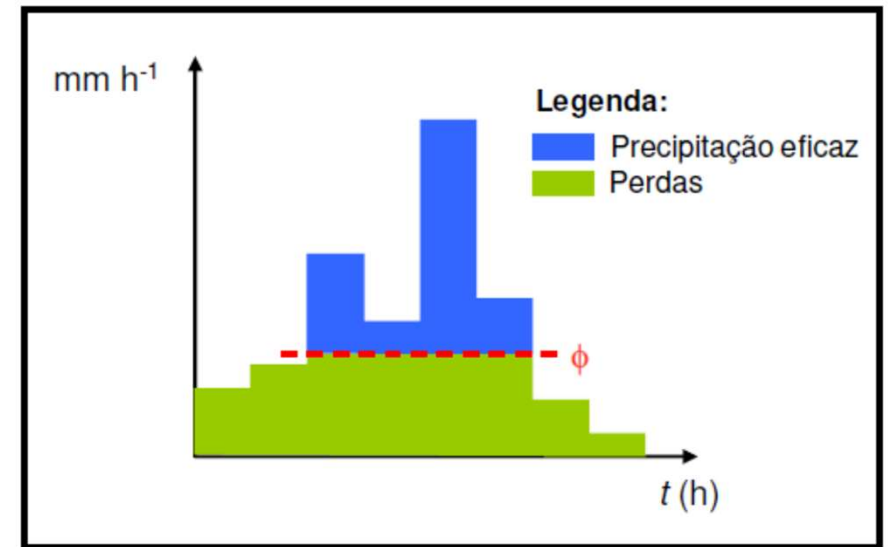
## Modelos mais utilizados

1. As **perdas** são consideradas como uma **fracção da precipitação total**, em cada intervalo de tempo (conceito do **coeficiente de escoamento**)
2. As **perdas** ocorrem a uma **taxa constante** (**método do índice  $\phi$** )
3. As **perdas** ocorrem com uma **taxa constante** apenas **após o preenchimento de uma capacidade inicial** (**método do índice  $\phi$  modificado**)
4. As **perdas** ocorrem com uma **taxa variável**, predominantemente decrescente, apenas **após o preenchimento de uma capacidade inicial** (**método do SCS**)
5. As **perdas** são modeladas com **base física**, com quantificação da **intercepção, infiltração e retenção superficial**

## ❑ Método do Índice $\phi$

O valor de  $\phi$  corresponde a uma **taxa de perdas constante** durante a chuvada, sendo representado graficamente por uma recta horizontal de forma que a a altura de precipitação acima iguale o valor de  $P_n$

- é pouco realista
- não considera as condições iniciais de humidade
- o valor de  $\phi$  varia de chuvada para chuvada
- não assegura a sincronização entre o aparecimento da precipitação eficaz e do escoamento directo
- o valor de  $\phi$  tende para um valor um pouco acima da condutividade hidráulica em condições de saturação natural pois inclui a interceptação, a infiltração e a retenção superficial



## Exercício 1

Considere o seguinte Quadro referente a uma chuvada

Tempo (h)	1	2	3	4	5	6
p (mm/h)	2.7	3.3	2.0	1.9	1.8	1.5

A partir do escoamento determinou-se que a precipitação útil foi de 1.6 mm

Determine o índice  $\phi$

---

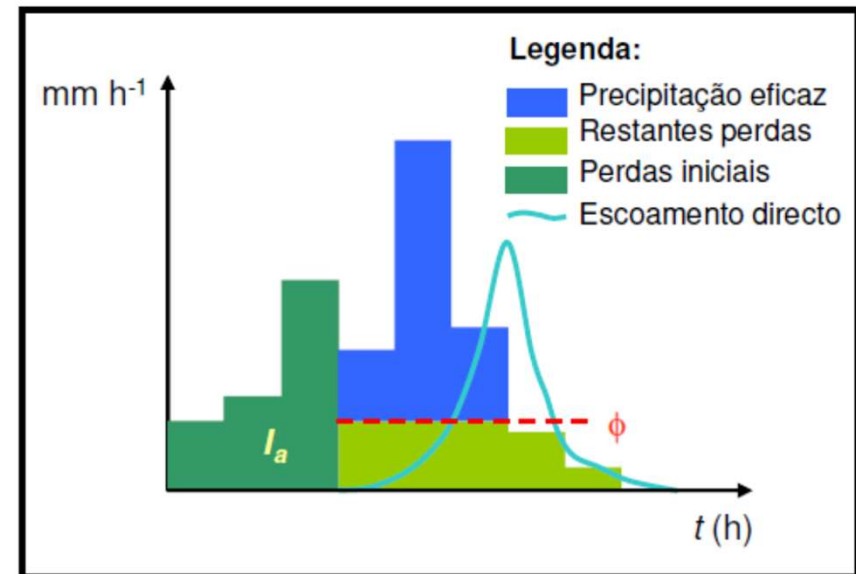
## ❑ Método do Índice $\phi$ modificado

Considera que até ao aparecimento do escoamento directo todo o hietograma corresponde a **perdas iniciais**  $I_a$  e que a partir daí as perdas se processam a uma **taxa constante**, tal como no método do índice  $\phi$

Após o início do escoamento directo, o hietograma de precipitação eficaz é assim:

$$p_{ni} = p_{ti} - \phi \quad \text{para } p_{ti} > \phi$$

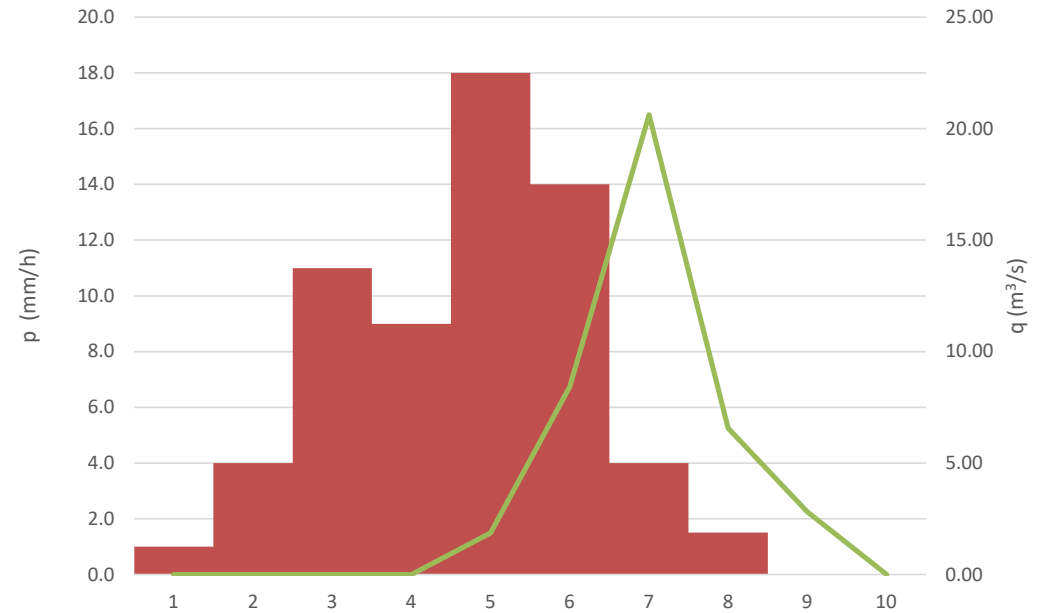
- é um pouco mais realista que o método anterior
- não considera explicitamente as condições antecedentes de humidade do solo mas estas reflectem-se no valor de  $I_a$
- assegura a sincronização entre o aparecimento da precipitação eficaz e do escoamento directo
- o valor do índice  $\phi$  varia com as chuvadas
- o valor de  $\phi$  pode tender para um valor um pouco acima da condutividade hidráulica em condições de saturação natural, mas mais próximo que no método anterior uma vez que não inclui as perdas iniciais



## Exercício 2

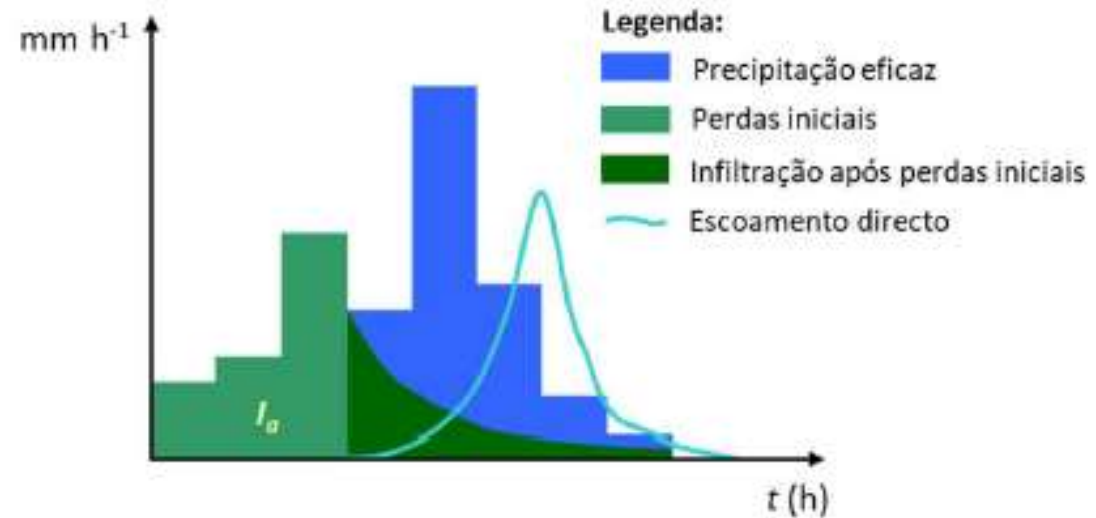
Determine o índice  $\phi$  modificado, considerando que a área da bacia é 10 km<sup>2</sup>

t (h)	P <sub>t</sub> (mm/h)	q <sub>d</sub> (m <sup>3</sup> /s)
0.5	1.0	0.00
1.0	4.0	0.00
1.5	11.0	0.00
2.0	9.0	0.00
2.5	18.0	1.86
3.0	14.0	8.42
3.5	4.0	20.61
4.0	1.5	6.56
4.5	0.0	2.81
5.0	0.0	0.00



## ❑ Método do Soil Conservation Service (SCS)

- Inicialmente foi desenvolvido para estimar o *volume de escoamento direto* e o *caudal de ponta* produzidos por uma chuvada intensa;
- Passou a ser também aplicado com intervalos de tempo diários, pois nas chuvadas intensas o volume total de precipitação é próximo do volume diário;
- Adequado para bacias hidrográficas rurais e, em menor grau, para bacias urbanizadas de pequena a média dimensão;
- Para além de caracterizar diretamente o *escoamento resultante da chuvada*, modela também, de forma indireta e agregada, outros processos hidrológicos, como a *interceção*, a *infiltração até ao empoçamento* e a *retenção superficial*.



Secção de Enge

Método do SCS



O modelo considera que, até ao aparecimento do escoamento direto, todo o hietograma corresponde a *perdas iniciais*  $I_a$ , que incluem:

- Intercepção
- Infiltração até ao empoçamento e
- Retenção superficial.

A precipitação eficaz, em altura,  $P_n$ , corresponde ao escoamento direto,  $Q_d$

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

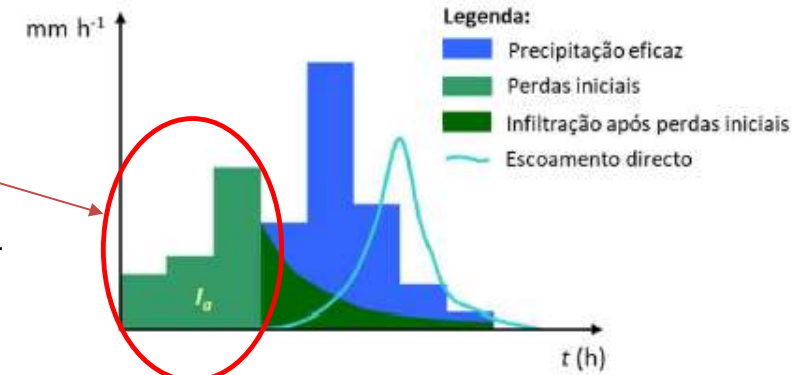


Figura 7 Método do SCS

em que  $P_n$  é a precipitação eficaz,  $P$  é a precipitação total,  $I_a$  são as perdas iniciais e  $S_d$  representa a retenção potencial máxima da bacia ( $> I_a$ )

## 1º caso

- **Existem dados observados (medidos) de precipitação total e de escoamento** → podemos *identificar/calibrar* previamente os dois parâmetros do modelo ( $I_a$  e  $S_d$ )

Hidrograma de escoamento → volume total escoado → altura de escoamento directo  $Q_d (= V_t/A \text{ bacia})$

Por definição  $Q_d = P_n$  → é este o critério para a calibração

$$S_d = \frac{(P - I_a)^2}{P_n} + I_a - P$$

## 2º caso

- **Não existem dados de escoamento** → o modelo não pode ser calibrado, tendo que se recorrer a relações regionais para estimar os parâmetros ( $I_a$  e  $S_d$ )

- Com base em dados de várias bacias hidrográficas experimentais de pequenas dimensões, o Soil Conservation Service (SCS) obteve a relação:

$$I_a = 0.2 S_d$$

Esta aproximação também é utilizada em Portugal sendo válida em média, havendo contudo uma grande dispersão dos valores conhecidos experimentalmente.

- Substituindo a expressão de cálculo de  $I_a$  na equação 1, o método fica reduzido a um só parâmetro:

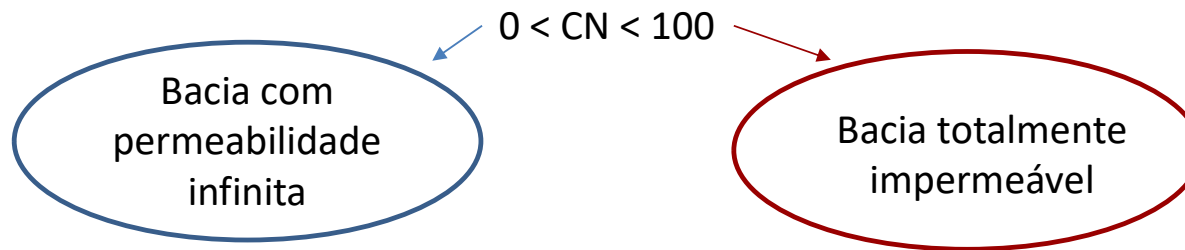
$$P_n = \frac{(P - 0.2 S_d)^2}{P + 0.8 S_d}$$

para  $P > 0.2 S_d$

- O SCS obteve, para várias chuvadas e bacias, valores de  $S_d$ , relacionou-os com o tipo e uso do solo daquelas bacias e tabelou-os (ver Quadros seguintes)

- Para simplificar a elaboração das tabelas e as tornar independentes das unidades utilizadas para  $S_d$ , estes foram padronizados dando origem ao numero de escoamento **CN**.

$$CN = \frac{25400}{S_d + 254} \quad \text{Para } S_d \text{ em mm}$$



- Também para simplificação os solos foram classificados em quatro grupos, com diferentes potencialidades de produção de escoamento direto, designados por solos **A, B, C e D**
- A capacidade de retenção da bacia,  $S_d$ , depende das condições iniciais de humidade do solo. Uma vez que o teor de água do solo não é calculado, o SCS considerou, simplificadamente, três condições antecedentes de humidade: solo seco (um pouco acima do coeficiente de emurchecimento), solo perto da capacidade de campo e solo próximo da saturação, designadas de **AMC I, AMC II e AMC III**

## Classificação hidrológica SCS dos solo (Lencastre e Franco, 1984)

Tipo de solo	Definição	Taxa de infiltração (cm h <sup>-1</sup> )	Textura (USDA)
<b>A</b>	<i>Baixo potencial de escoamento directo</i> - Solos com elevadas intensidades de infiltração, mesmo quando completamente humedecidos. Incluem sobretudo areias profundas ou cascalho, com muito boa drenagem.	> 0,76	Arenoso Arenoso-franco Franco-arenoso
<b>B</b>	<i>Potencial de escoamento directo abaixo da média</i> – Solos com intensidades de infiltração moderadas, quando completamente humedecidos. Incluem sobretudo solos medianamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados e com textura moderadamente fina a moderadamente grosseira.	0,38 – 0,76	Franco-limoso Franco
<b>C</b>	<i>Potencial de escoamento directo acima da média</i> – Solos com baixas intensidades de infiltração, quando completamente humedecidos. Incluem sobretudo solos com camadas impermeáveis subjacentes e solos com textura moderadamente fina a fina.	0,13 – 0,38	Franco-argilo-arenoso
<b>D</b>	<i>Elevado potencial de escoamento directo</i> – Solos com intensidades de infiltração muito baixas, quando completamente humedecidos. Incluem sobretudo solos argilosos expansíveis, solos com o nível freático permanentemente próximo da superfície e solos com substratos impermeáveis a pouca profundidade.	0,00 – 0,13	Franco-argiloso Franco-argilo-limoso Argilo-arenoso Argilo-limoso Argiloso

Valores do número de escoamento para regiões urbanas e semi-urbanas (Correia, 1984)

Utilização ou cobertura do solo	Tipo de solo			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem medidas de conservação do solo	72	81	88	91
com medidas de conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou baldios: em más condições	68	79	86	89
em boas condições	39	61	74	80
Prados em boas condições	30	58	71	81
Florestas: pouco densas	45	66	77	83
densas	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios, etc.				
em boas condições: relva cobrindo mais de 75% da área	39	61	74	80
em condições razoáveis: relva cobrindo de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Áreas comerciais (85% de área impermeável)	89	92	94	95
Zonas industriais (72% de área impermeável)	81	88	91	93
Zonas residenciais:				
Área média dos lotes (m <sup>2</sup> )	Impermeabilização média (%)			
< 500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos	98	98	98	98
Ruas e estradas:				
pavimentadas, com sargetas e colectores	98	98	98	98
empedradas	76	85	89	91
terra batida	72	82	87	89

Os valores de CN apresentados dizem respeito às condições AMC II, pelo que se designam por CN<sub>II</sub>

## Valores do número de escoamento para regiões rurais (Correia, 1984)

Utilização ou cobertura de solo	Condições de superfície	Tipo de solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado		77	86	91	94
Culturas arvenses	segundo o maior declive	64	76	84	88
	segundo as curvas de nível	62	74	82	85
	segundo as curvas de nível e em terraços	60	71	79	82
Rotações de cultura	segundo o maior declive	62	75	83	87
	segundo as curvas de nível	60	72	81	84
	segundo as curvas de nível e em terraços	57	70	78	82
Pastagens	pobre (<50% de área coberta, pastoreio intensivo, sem "mulch")	68	79	86	89
	normal (50 – 70% de área coberta, pastoreio moderado)	49	69	79	84
	boa (>75% de área coberta, pastoreio suave ou inexistente)	39	61	74	80
	pobre, segundo as curvas de nível	47	67	81	88
	normal, segundo as curvas de nível	25	59	75	83
	boa, segundo as curvas de nível	6	35	70	79
Prado permanente	normal	30	58	71	78
Zonas sociais rurais	normal	59	74	82	86
Estradas	pavimento permeável	72	82	87	89
	pavimento impermeável	74	84	90	92
Florestas	muito aberta ou de baixa transpiração	56	75	86	91
	abertas ou de baixa transpiração	46	68	78	84
	normal	36	60	70	76
	densas ou de alta transpiração	26	52	62	69
	muito densas ou de alta transpiração	15	44	54	61
Superfície impermeável		100	100	100	100

Secção de Engenharia Rural

Os valores de CN apresentados dizem respeito às condições AMC II, pelo que se designação por CN<sub>II</sub>

A partir do valor obtido para  $CN_{II}$ , os números de escoamento correspondentes a solo seco ( $AMC I$ ) ou muito húmido ( $AMC III$ ) podem obter-se através de (Ponce, 1989):

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,3 - 0,013CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,43 + 0,0057CN_{II}}$$

Condição antecedente de humidade em função da precipitação acumulada

Precipitação acumulada nos cinco dias anteriores (mm)		Condição antecedente de humidade a considerar
Período dormente	Período de crescimento	
< 13	< 36	<i>AMC I</i>
13 a 28	36 a 53	<i>AMC II</i>
> 28	> 53	<i>AMC III</i>



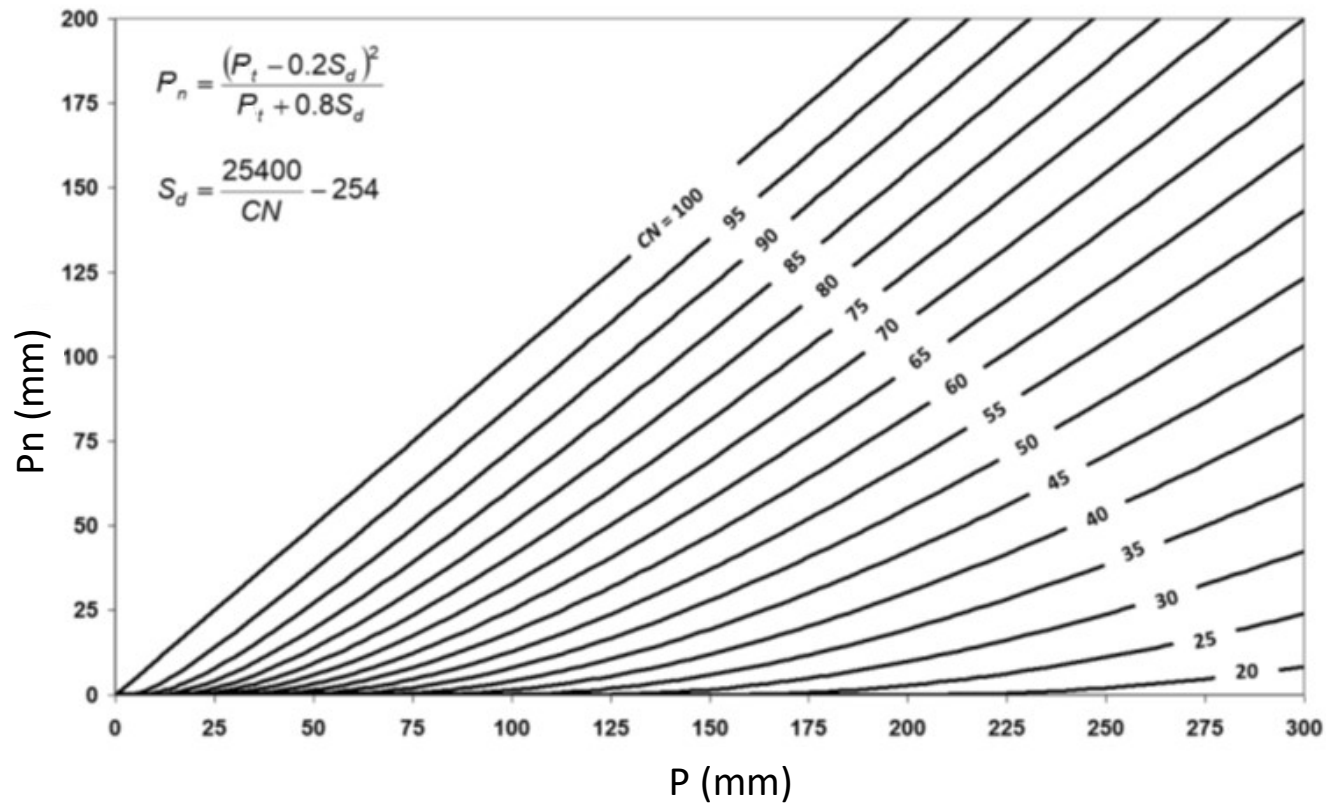
## Etapas a percorrer na aplicação do método do SCS quando não se dispõe de dados de escoamento

1. Decompor a bacia em **machas homogéneas** em termos de **tipo hidrológico de solo** (Quadro 1) e de **utilização e cobertura** deste (Quadros);
2. Obter dos Quadros os valores de **CN<sub>III</sub>** para as *i* manchas homogéneas identificadas;
3. Identificar a **condição antecedente de humidade** a considerar: **(a)** se a aplicação do método corresponde à obtenção de um caudal de ponta, de projecto, este pode ser maximizado considerando o solo próximo da saturação, condição **AMC III**; **(b)** se a aplicação do método corresponde a um dia concreto do ano então a condição é identificada com o auxílio do Quadro respetivo;
4. Se necessário, **converter** os valores **CNII à condição identificada** em (3), com as respetivas equações;
5. Estimar o **valor médio do número de escoamento** através de uma **média ponderada** com as áreas *A<sub>i</sub>* das manchas homogéneas correspondentes (este procedimento é mais rigoroso, embora haja autores que, por simplicidade, obtêm primeiro o valor médio e depois o convertem à condição antecedente de humidade a considerar):

$$\overline{CN} = \frac{\sum_i A_i CN_i}{A} \quad , A = \text{área da bacia}$$

6. Obter a **retenção potencial máxima** para a bacia, por resolução da Eq. em ordem a *S<sub>d</sub>*:

$$S_d = \frac{25400}{\overline{CN}} - 254 \quad (\text{mm})$$

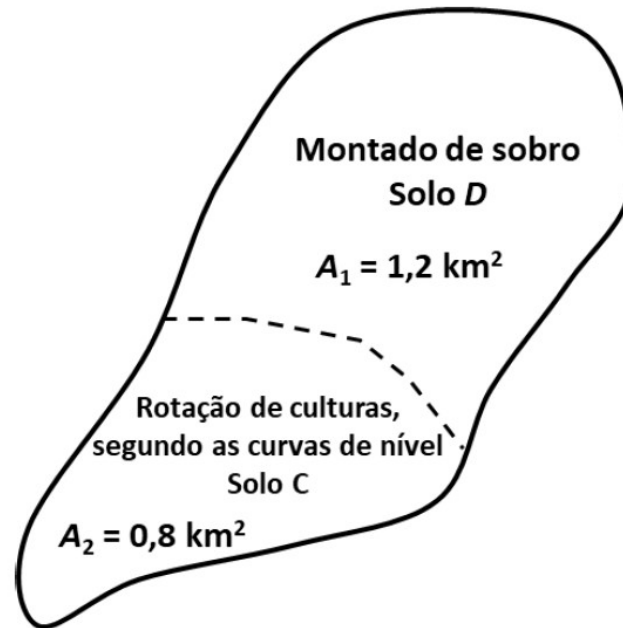


Relação entre a precipitação eficaz e a precipitação total no método do SCS, com 1 parâmetro,  $CN$

### Exercício 3

Considere as características de tipos e uso de solo existentes e respectivas áreas, na bacia hidrográfica representada na figura abaixo.

- Considerando uma precipitação diária de 40 mm, calcule o escoamento diário produzido por esta bacia, com o método do SCS;
- Verifique qual o novo escoamento diário se 50 % da zona agrícola for transformada em zona industrial.



## Exercício 4

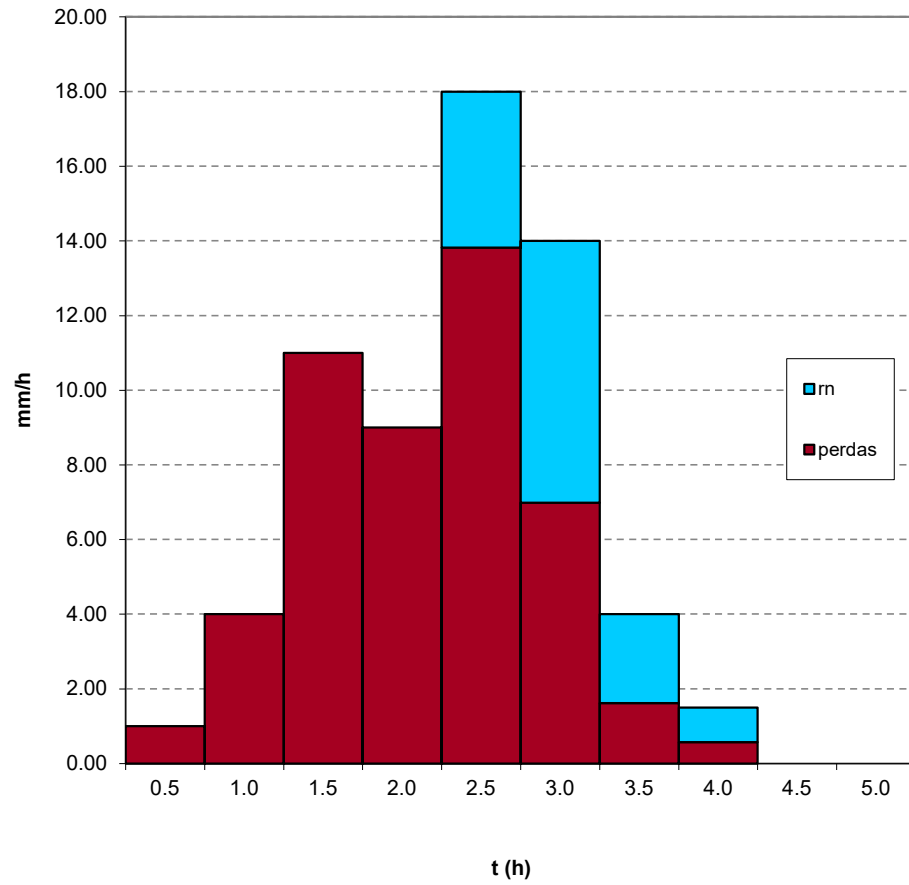
Considere o hietograma de precipitação total ocorrido sobre uma pequena bacia hidrográfica com um solo relativamente homogéneo e com  $A = 10 \text{ km}^2$ , e o hidrograma de escoamento direto, na secção de jusante da mesma, representados no Quadro.

- a) Obtenha o hietograma de precipitação eficaz, utilizando:
  - i. o método do *Soil Conservation Service*;
  - ii. o modelo de infiltração de Green Ampt ( $K \approx 3 \text{ mm h}^{-1}$  e  $S_f = 20 \text{ mm}$ ) (modelo de base física). Considere que a interceptação pode ser equiparada a um reservatório com capacidade máxima de  $S_i = 1 \text{ mm}$ . Despreze a evapotranspiração. A que se deve a diferença entre a precipitação eficaz calculada e o escoamento medido?
  
- b) Represente graficamente o hietograma de precipitação total e identifique neste os diferentes processos hidrológicos quantificados

Hietograma de precipitação total e hidrograma de escoamento superficial

<b>t</b> <b>(h)</b>	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
<b>p<sub>t</sub></b> <b>(mmh<sup>-1</sup>)</b>	1.0	4.0	11.0	9.0	18.0	14.0	4.0	1.5	0.0	0.0
<b>q<sub>d</sub></b> <b>(m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	1.86	8.42	20.61	6.56	2.81	0.00

SCS



Green-Ampt

