

# HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

## Avaliação do escoamento anual médio a partir de elementos climáticos

"Hydrologic modeling is concerned with the accurate prediction of the partitioning of water among the various pathways of the hydrological cycle"

Dooge, J. C. I.: 1992, 'Hydrologic Models and Climate Change', *J. Geophys. Res.* 97 D3, 2677-2686.



$$P = H + E + \Delta Sp + \Delta S + \Delta Su + Ex - R$$

- P** precipitação sobre a bacia;
- H** escoamento na secção de jusante da bacia;
- E** evapotranspiração na bacia;
- $\Delta Sp$  variação da quantidade de água de interceção, de detenção superficial e de armazenamento nos leitos;
- $\Delta S$  variação da quantidade de humidade do solo (água na zona não saturada);
- $\Delta Su$  variação da quantidade de água das reservas subterrâneas;
- Ex** quantidade de água extraída da bacia pela Ação humana;
- R** idem quantidade de água lançada.



( $\Delta S$ : variação > 0 se corresponder ao aumento de água).



$$P = H + E + \Delta Sp + \Delta S + \Delta Su + Ex - R$$

- P** precipitação sobre a bacia;
- H** **escoamento na secção de jusante da bacia na ausência da dados hidrométricos ?**
- E** evapotranspiração na bacia;
- $\Delta Sp$  variação da quantidade de água de interceção, de detenção superficial e de armazenamento nos leitos;
- $\Delta S$  variação da quantidade de humidade do solo (água na zona não saturada);
- $\Delta Su$  variação da quantidade de água das reservas subterrâneas;
- Ex** quantidade de água extraída da bacia pela Ação humana;
- R** idem quantidade de água lançada.



( $\Delta S$ : variação > 0 se corresponder ao aumento de água).

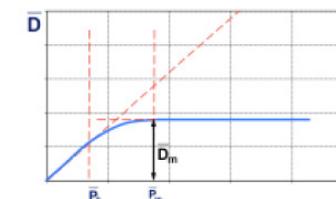
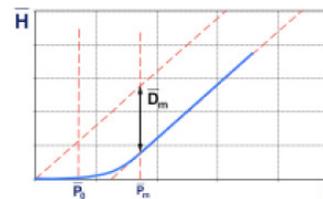


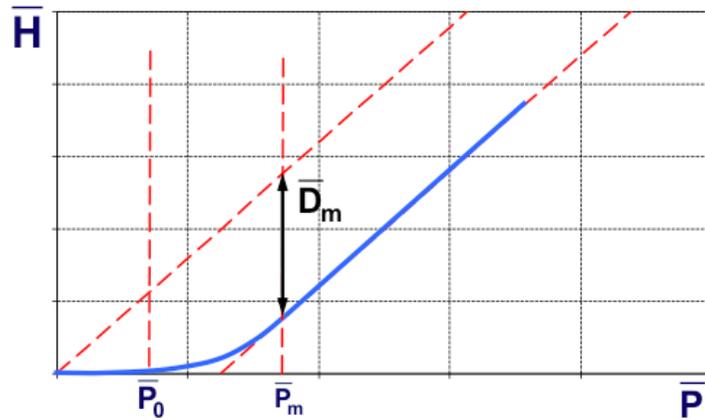
### Equação do balanço hidrológico em ANO HIDROLÓGICO

(em bacias hidrográficas em regime natural, ou seja, sendo também desprezáveis os volumes de água postos em causa pela ação do Homem)

$$\bar{P} = \bar{H} + \bar{E}$$

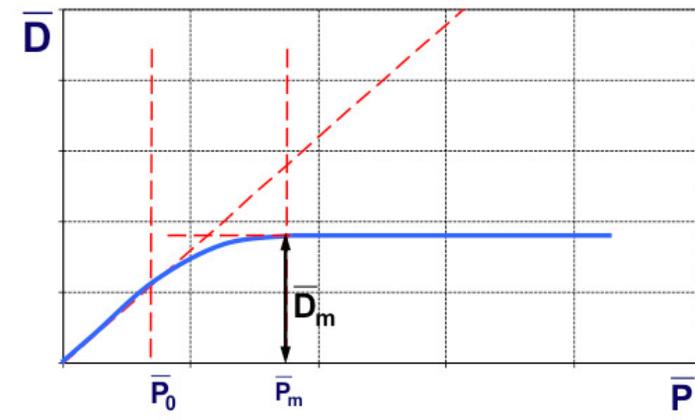
$$\bar{P} - \bar{H} = \bar{D} = \bar{E}$$





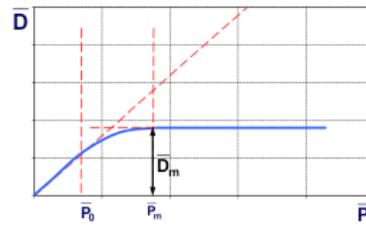
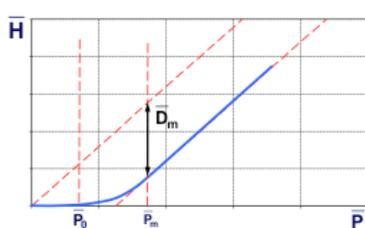
$$\bar{P} = \bar{H} + \bar{E}$$

$$\bar{P} - \bar{H} = \bar{D} = \bar{E}$$



$$\bar{P} = \bar{H} + \bar{E}$$

$$\bar{P} - \bar{H} = \bar{D} = \bar{E}$$



Keller (1906) – bacias hidrográficas da Europa Central

$$\bar{H} = b_1 \bar{P} - a_1$$

Wundt (1937)

$$\bar{H} = b_2 \bar{P}^2 - a_2$$



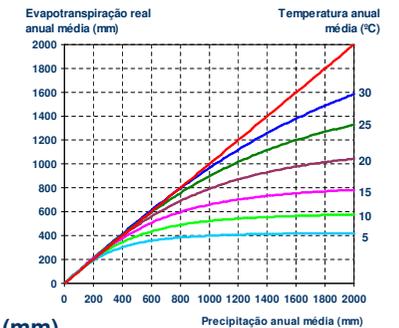
Na ausência de qualquer informação relativa a escoamentos pode recorrer-se a fórmulas, necessariamente aproximadas, como seja a **fórmula de Turc (1954)** (estabelecida com base em **254 bacias hidrográficas** localizadas na Europa, em África, na América e em Java e, portanto, com a diferentes climas)

$$\bar{P} = \bar{H} + \bar{E}$$

Se  $\left(\frac{\bar{P}}{L}\right)^2 \geq 0.1 \Rightarrow \bar{E} = \frac{\bar{P}}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{\bar{P}}{L}\right)^2}}$

Se  $\left(\frac{\bar{P}}{L}\right)^2 < 0.1 \Rightarrow \bar{E} = \bar{P}$

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



$\bar{P}$  - Precipitação anual média (mm)

$\bar{H}$  - Escoamento anual médio (mm)

$\bar{E}$  - Evapotranspiração real anual média (mm)

$\bar{T}$  - Temperatura anual média do ar (°C)

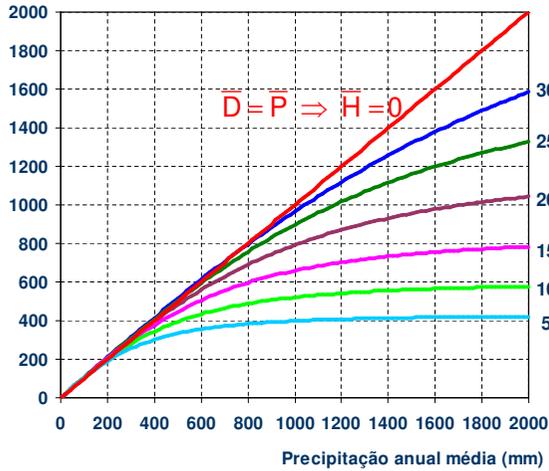
L - Poder evaporante da atmosfera (mm)



Evapotranspiração real anual média (mm)

Temperatura anual média (°C)

### FÓRMULA DE TURC



$$P = \bar{H} + \bar{E}$$

Se  $\left(\frac{\bar{P}}{L}\right)^2 \geq 0.1 \Rightarrow \bar{E} = \frac{\bar{P}}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{\bar{P}}{L}\right)^2}}$

Se  $\left(\frac{\bar{P}}{L}\right)^2 < 0.1 \Rightarrow \bar{E} = \bar{P}$

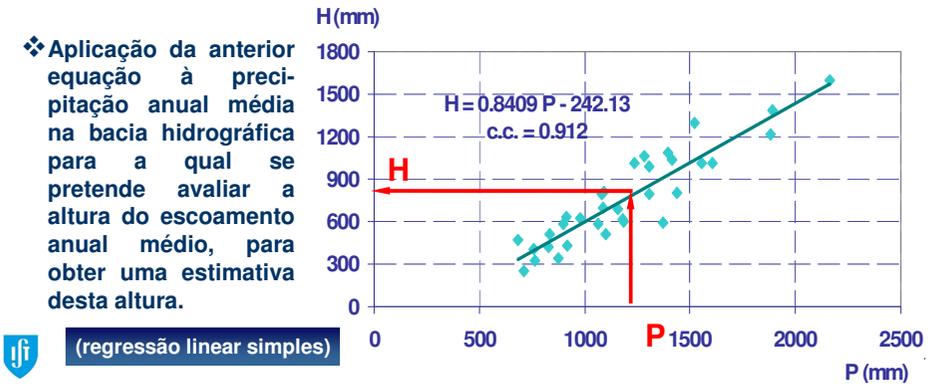
$$L = 300 + 25 \bar{T} + 0.05 \bar{T}^3$$

P  
T L P/L E  
H



### Regressão do escoamento anual sobre a precipitação anual

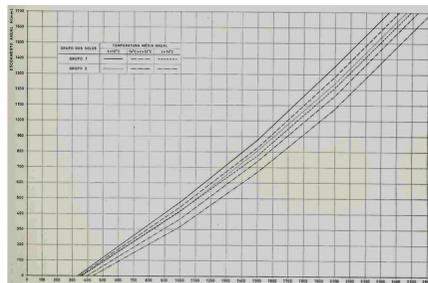
- ❖ Identificação de uma estação hidrométrica dominando uma bacia hidrográfica localizada tão próximo quanto possível da bacia hidrográfica para a qual se pretende avaliar a altura do escoamento anual médio.
- ❖ Com base em pares de valores anuais do escoamento e da precipitação na bacia hidrográfica da estação hidrométrica, estabelecimento da equação de regressão linear simples do escoamento anual sobre a precipitação anual.



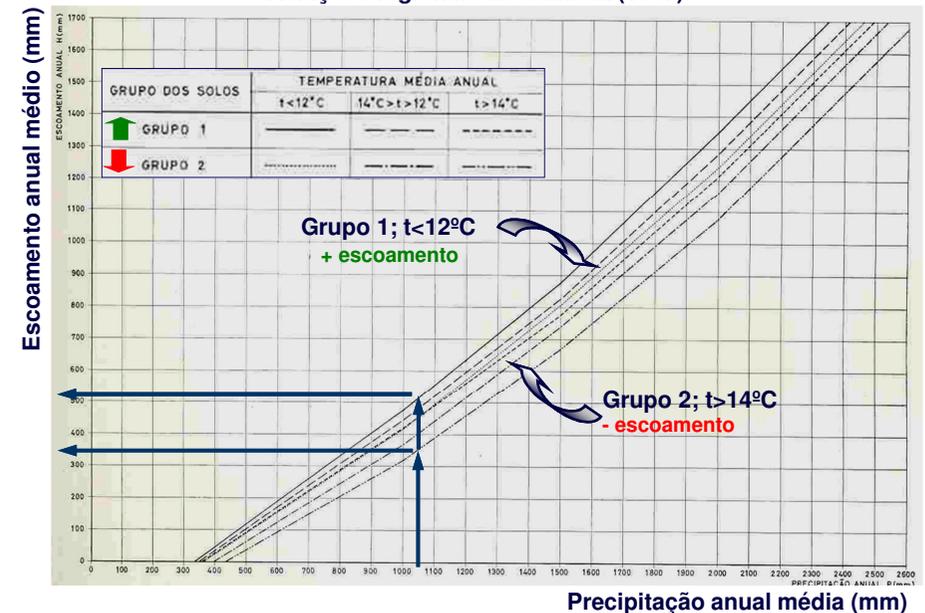
### Relações regionais de Quintela (1967)

... equações lineares válidas em média em Portugal Continental entre o escoamento anual e a precipitação anual e que têm como parâmetros:

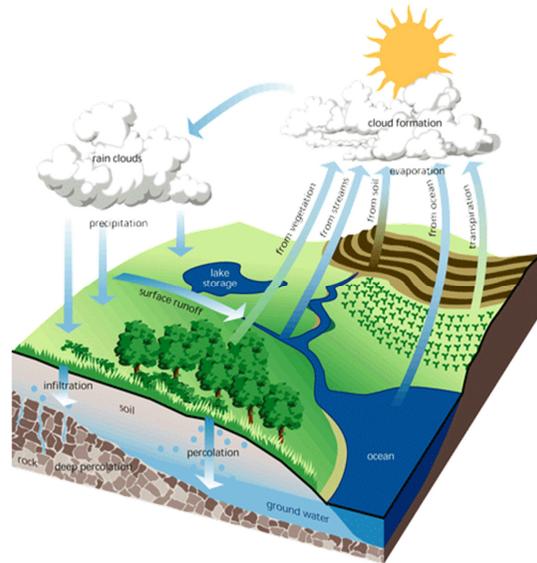
- ❖ a precipitação anual;
- ❖ a temperatura anual média (três classes:  $t < 14^\circ\text{C}$ ;  $14^\circ\text{C} > t > 12^\circ\text{C}$ ;  $t < 12^\circ\text{C}$ );
- ❖ o grupo de solos (dois grupos de solos, correspondendo a solos dando origem a escoamento anual médio a elevado – grupo 1 – ou a escoamento anual médio a baixo – grupo 2).



### Relações regionais de Quintela (1967)



# EXERCÍCIOS 21 e 22

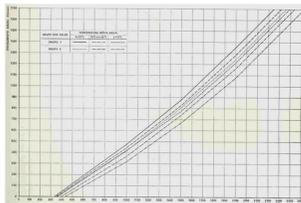


21. Em determinada região a precipitação anual média é 1200 mm e a temperatura média anual é 14 °C. Estime pelo método de Turc o escoamento anual médio (m³) e o respetivo módulo numa bacia hidrográfica dessa região e com 280 km² de área.  
(R: 148.86 hm³, 4.72 m³/s).

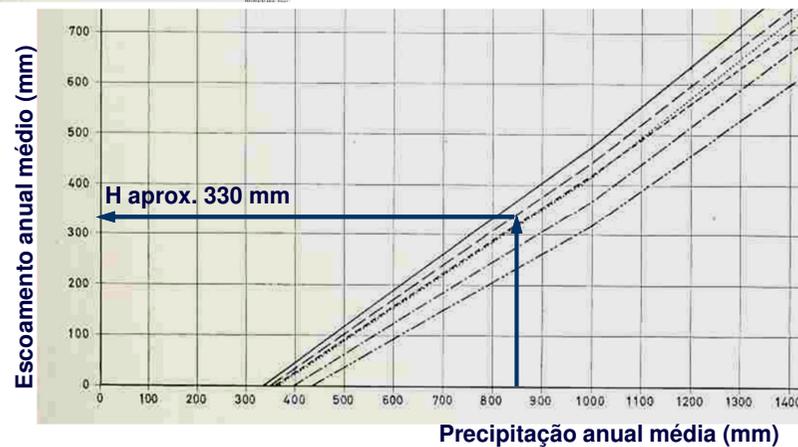
$$L = 300 + 25 t + 0.05 t^3$$

$$\frac{\bar{P}^2}{L^2} > 0.1 \quad \bar{D} = \sqrt{\frac{\bar{P}^2}{0.9 + \frac{\bar{P}^2}{L^2}}}$$

22. Estime o escoamento anual médio (em mm) numa bacia hidrográfica de Portugal Continental, com solos dando origem a escoamento elevado, onde a temperatura anual média é de 12° C e a precipitação anual média, de 850 mm. Utilize as relações regionais de Quintela.  
Admitindo que a bacia hidrográfica tem a área de 200 km², calcule o volume do escoamento anual médio e o respetivo módulo.  
(R: aprox. 330 mm; 66 hm³, 2.1 m³/s).



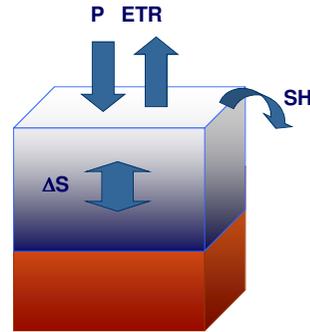
GRUPO DOS SOLOS	TEMPERATURA MÉDIA ANUAL		
	t < 12°C	14°C > t > 12°C	t > 14°C
GRUPO 1	-----	-----	-----
GRUPO 2	-----	-----	-----



**MODELO DO BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL MENSAL**

**MODELO DETERMINÍSTICO FISICAMENTE BASEADO DE AVALIAÇÃO DE ESCOAMENTO A ESCALAS INFERIORES AO ANO ( ... escoamentos mensais ... )**

➤ A uma dada **escala temporal** - mais frequentemente mensal - a **técnica do balanço hídrico** recorre à equação da **continuidade** aplicada a um “elemento” da **fase terrestre do balanço hidrológico**, mediante o cálculo dos fluxos de água “**entrados**” nesse “elemento”, dos fluxos de água dele “**saídos**” e das **variações de armazenamento de água** no mesmo.



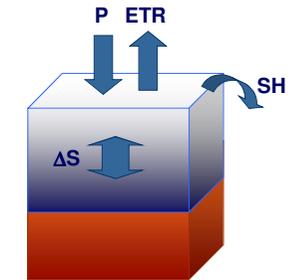
➤ Para tanto, é necessário dispor, para a escala temporal considerada, de registos da **precipitação, P**, e de valores calculados da **evapotranspiração potencial, ETP**.

➤ O balanço hídrico sequencial fornece como resultados valores da **evapotranspiração real, ETR**, do **défice hídrico, DH**, do **excesso hídrico ou superavit, SH**, e do **volume de água armazenado no solo por unidade de área, S**.

➤ A equação geral que traduz o balanço hídrico sequencial num dado intervalo de tempo:

$$P = SH + ETR + \Delta S$$

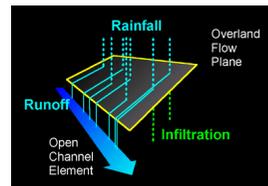
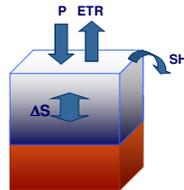
em que, para um dado intervalo de tempo, P é a precipitação; SH, o *superavit* ou excesso hídrico; ETR, a evapotranspiração real; e ΔS, a variação de armazenamento de água no elemento (*variáveis expressas nas mesmas unidades*).



➤ ... **défice hídrico, DH**: diferença entre a evapotranspiração potencial, ETP, e a evapotranspiração real, ETR, no intervalo de tempo considerado (*indicador de estado*). Existindo *défice* significa que a água precipitada e retida no solo é insuficiente para satisfazer a evapotranspiração potencial, afetando o bom desenvolvimento da vegetação local.

➤ ... **superavit ou excesso hídrico, SH**: excesso de precipitação sobre a soma da evapotranspiração potencial, ETP, com a quantidade de água cedida ao solo, S, até ao seu completo abastecimento de água. Nos meses em que a precipitação, P, é inferior ou igual à soma de ETP com S não há *superavit*. Nos meses em que a precipitação, P, é superior ao valor da soma de ETP com S há *superavit* que será responsável pelos escoamentos superficial e em profundidade.

$$P = SH + ETR + \Delta S$$



➤ Embora com carácter aproximado – que, no essencial, decorre do facto de o balanço hídrico sequencial não ter em conta a heterogeneidade da bacia hidrográfica, a complexidade dos movimentos da água à superfície e no interior do solo que contribuem para o escoamento, a infiltração profunda, as perdas de precipitação e as eventuais contribuições externas e de não atender a que existe necessariamente produção de escoamento superficial sempre que a intensidade da precipitação excede a taxa de infiltração –, pode considerar-se que o **superavit ou excesso hídrico, SH**, representa o **limite superior do escoamento superficial**.

$$\text{Escoamento superficial} \leq \text{superavit ou excesso hídrico, SH}$$

### Algoritmo de cálculo

1. Se em Δt a precipitação, P, exceder a evapotranspiração potencial, ETP, haverá cedência de água pela atmosfera ao solo, admitindo-se que a evapotranspiração real, ETR, iguale a ETP. Se o solo não estiver plenamente abastecido de água, o excesso de P sobre ETP fica retido no mesmo até se atingir a sua capacidade limite de armazenamento de água, S<sub>max</sub>. Havendo ainda remanescente de precipitação, tal remanescente origina escoamento à superfície, expresso pelo *superavit*.

### Algoritmo de cálculo

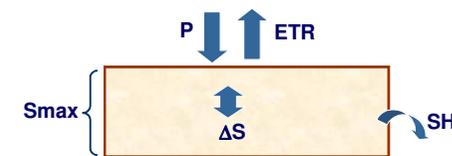
1. Se em  $\Delta t$  a precipitação,  $P$ , exceder a evapotranspiração potencial,  $ETP$ , haverá cedência de água pela atmosfera ao solo, admitindo-se que a evapotranspiração real,  $ETR$ , iguale a  $ETP$ . Se o solo não estiver plenamente abastecido de água, o excesso de  $P$  sobre  $ETP$  fica retido no mesmo até se atingir a sua capacidade limite de armazenamento de água,  $S_{max}$ . Havendo ainda remanescente de precipitação, tal remanescente origina escoamento à superfície, expresso pelo *superavit*.
2. Quando, em  $\Delta t$ ,  $P$  é inferior a  $ETP$ , existe cedência de água do solo à atmosfera, sendo a  $ETR$  superiormente limitada pela soma da precipitação e da quantidade de água que o solo pode ceder enquanto nele existir água disponível.

### Algoritmo de cálculo

1. Se em  $\Delta t$  a precipitação,  $P$ , exceder a evapotranspiração potencial,  $ETP$ , haverá cedência de água pela atmosfera ao solo, admitindo-se que a evapotranspiração real,  $ETR$ , iguale a  $ETP$ . Se o solo não estiver plenamente abastecido de água, o excesso de  $P$  sobre  $ETP$  fica retido no mesmo até se atingir a sua capacidade limite de armazenamento de água,  $S_{max}$ . Havendo ainda remanescente de precipitação, tal remanescente origina escoamento à superfície, expresso pelo *superavit*.
2. Quando, em  $\Delta t$ ,  $P$  é inferior a  $ETP$ , existe cedência de água do solo à atmosfera, sendo a  $ETR$  superiormente limitada pela soma da precipitação e da quantidade de água que o solo pode ceder enquanto nele existir água disponível.
3. O valor máximo da quantidade de água que o solo pode ceder à atmosfera que é também o valor máximo da quantidade de água que o mesmo pode reter até ficar amplamente abastecido,  $S_{max}$ , depende da natureza do solo e do seu revestimento vegetal.

### Algoritmo de cálculo

1. Se em  $\Delta t$  a precipitação,  $P$ , exceder a evapotranspiração potencial,  $ETP$ , haverá cedência de água pela atmosfera ao solo, admitindo-se que a evapotranspiração real,  $ETR$ , iguale a  $ETP$ . Se o solo não estiver plenamente abastecido de água, o excesso de  $P$  sobre  $ETP$  fica retido no mesmo até se atingir a sua capacidade limite de armazenamento de água,  $S_{max}$ . Havendo ainda remanescente de precipitação, tal remanescente origina escoamento à superfície, expresso pelo *superavit*.
2. Quando, em  $\Delta t$ ,  $P$  é inferior a  $ETP$ , existe cedência de água do solo à atmosfera, sendo a  $ETR$  superiormente limitada pela soma da precipitação e da quantidade de água que o solo pode ceder enquanto nele existir água disponível.
3. O valor máximo da quantidade de água que o solo pode ceder à atmosfera que é também o valor máximo da quantidade de água que o mesmo pode reter até ficar amplamente abastecido,  $S_{max}$ , depende da natureza do solo e do seu revestimento vegetal.
4. A avaliação, em cada  $\Delta t$ , do volume de água armazenado no solo por unidade de área,  $S$ , deve considerar a atenuação da intensidade da evapotranspiração real pois à medida que diminui o teor de água no solo (é tanto mais difícil “tirar” água do solo quanto mais seco está).

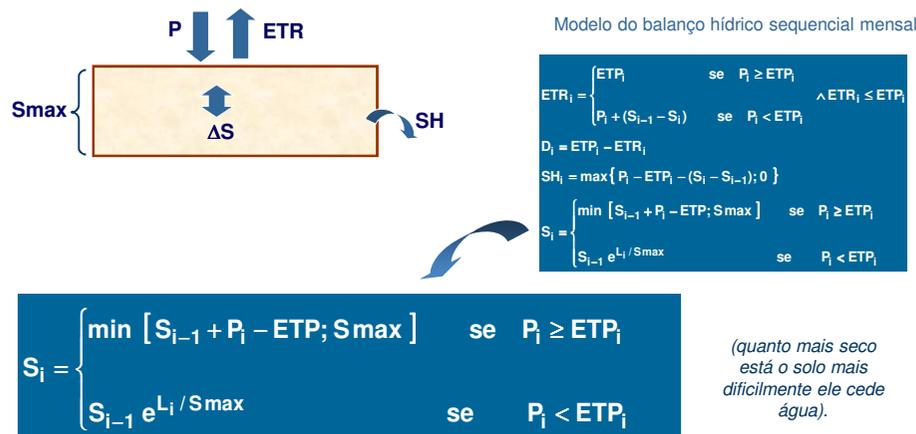


$$ETR_i = \begin{cases} ETP_i & \text{se } P_i \geq ETP_i \\ P_i + (S_{i-1} - S_i) & \text{se } P_i < ETP_i \end{cases} \wedge ETR_i \leq ETP_i$$

$$D_i = ETP_i - ETR_i$$

$$SH_i = \max \{ P_i - ETP_i - (S_i - S_{i-1}); 0 \}$$

$$S_i = \begin{cases} \min [ S_{i-1} + P_i - ETP_i; S_{max} ] & \text{se } P_i \geq ETP_i \\ S_{i-1} e^{L_i / S_{max}} & \text{se } P_i < ETP_i \end{cases}$$



$$S_i = \begin{cases} \min [S_{i-1} + P_i - ETP; S_{max}] & \text{se } P_i \geq ETP_i \\ S_{i-1} e^{L_i/S_{max}} & \text{se } P_i < ETP_i \end{cases}$$

(quanto mais seco está o solo mais dificilmente ele cede água).

... perda potencial,  $L_i$ : diferença (<0) entre a precipitação e a evapotranspiração potencial acumulada desde o início do período seco – período tal que  $(P - ETP) < 0$  – até ao passo de cálculo  $i$ .

$$L_i = \begin{cases} L_{i-1} + (P_i - ETP_i) & \text{se } L_i < 0 \\ 0 & \text{se } L_i \geq 0 \end{cases} \iff L_i = \text{Min} \{ L_{i-1} + (P_i - ETP_i); 0 \}$$



De modo a simular a dependência temporal que caracteriza as séries de escoamento, alguns autores introduzem uma espécie de “atraso” na contribuição do excesso hídrico ou superavit,  $R_i$ , considerando que parte dessa contribuição ocorre nesse intervalo de tempo e o remanescente no intervalo de tempo seguinte, que recebe ainda a contribuição de parte do escoamento superficial no intervalo de tempo precedente, que  $R_{i-1}$ :

$$R_i = \frac{1}{2} (SH_{i-1} + SH_i)$$

Lencastre; Franco, 1984

### Dados de base

- Para o intervalo de tempo a que se refere o cálculo, registos de precipitação e das variáveis intervenientes no cálculo da evapotranspiração potencial (dependentes do modelo para o efeito selecionado).
- Volume de água no solo por unidade de área no início do período de aplicação do modelo,  $S_0$  (para a estimação de escoamentos em longos períodos o efeito das condições iniciais é pouco significativo).
- Capacidade de água utilizável (volume máximo ...),  $S_{max}$



Insoleção astronómica diária para a latitude de \_\_\_\_\_  
Jan Feb Mar Abr Mai Jun Jul Ago Set Out Nov Dez

Ano	Mês	P (mm)	T (°C)	$I_j$	I	ETP (mm)	P-ETP (mm)	L (-)	S (mm)	ETR (mm)	D (mm)	SH (mm)	R (mm)	Escoamento observado (fase de calibração) (mm)
	Out													
	Nov													
	Dez													
	Jan													
	Fev													
	Mar													
	Abr													
	Mai													
	Jun													
	Jul													
	Ago													
	Set													
Valores anuais														
	Out													
	Nov													
	Dez													
	Jan													
	Fev													
	Mar													
	Abr													
	Mai													
	Jun													
	Jul													
	Ago													
	Set													
Valores anuais														

### 2º Trabalho Prático

$$ETR_i = \begin{cases} ETP_i & \text{se } P_i \geq ETP_i \\ P_i + (S_{i-1} - S_i) & \text{se } P_i < ETP_i \wedge ETR_i \leq ETP_i \end{cases}$$

$$D_i = ETP_i - ETR_i$$

$$SH_i = \max \{ P_i - ETP_i + (S_i - S_{i-1}); 0 \}$$

$$S_i = \begin{cases} \min [S_{i-1} + P_i - ETP; S_{max}] & \text{se } P_i \geq ETP_i \\ S_{i-1} e^{L_i/S_{max}} & \text{se } P_i < ETP_i \end{cases}$$

$$L_i = \begin{cases} L_{i-1} + (P_i - ETP_i) & \text{se } L_{i-1} + (P_i - ETP_i) < 0 \\ 0 & \text{se } L_{i-1} + (P_i - ETP_i) \geq 0 \end{cases}$$

$$R_i = \frac{1}{2} (SH_i + SH_{i+1})$$

- Dados
- Resumo de valores anuais
- Células com cálculos específicos – 1ª iteração (não podem ser copiadas para as células abaixo pois vão buscar as condições iniciais)
- Células com cálculos específicos – com exceção do primeiro ano, 1º mês de cada ano hidrológico (não podem ser copiadas para as células abaixo pois vão buscar as condições no último mês do ano hidrológico precedente)

