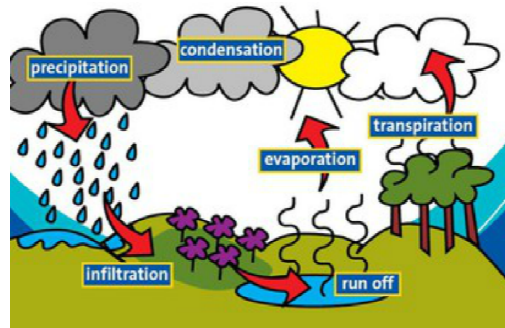
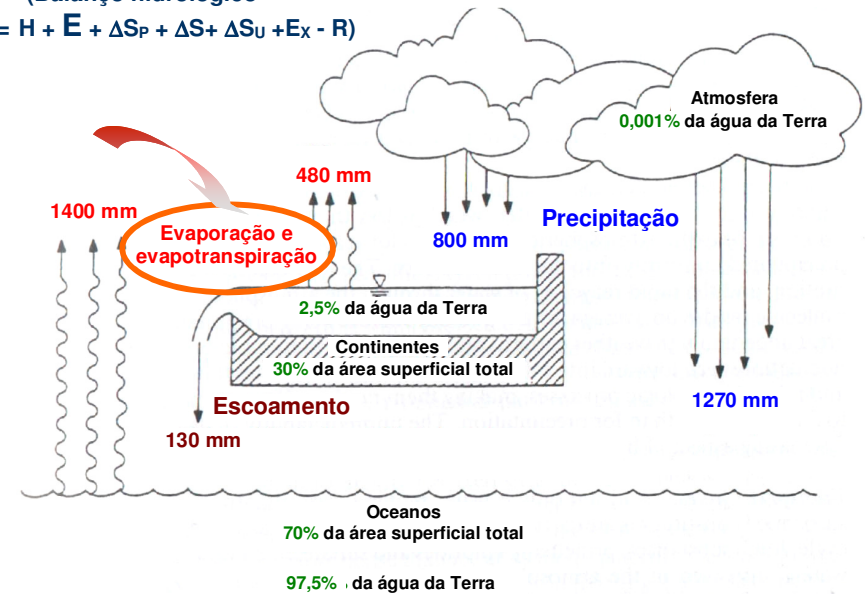


# HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

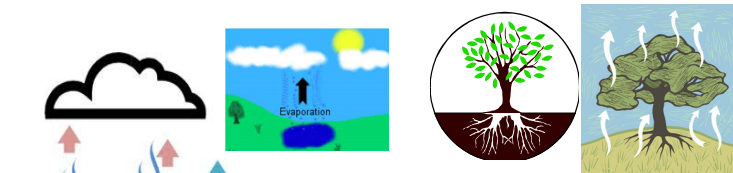
## Evaporação, transpiração e evapotranspiração



(Balanço hidrológico  
 $P = H + E + \Delta S_P + \Delta S_U + E_X - R$ )



- ✓ **EVAPORAÇÃO** processo pelo qual a água passa do ESTADO LÍQUIDO para o ESTADO DE VAPOR.
- ✓ **TRANSPIRAÇÃO:** transferência de vapor de água dos continentes e de outras massas de terra para a atmosfera por transpiração das plantas e dos seres vivos.
- ✓ **EVAPOTRANSPIRAÇÃO:** processo conjunto de evaporação e de transpiração.

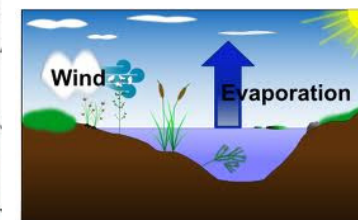
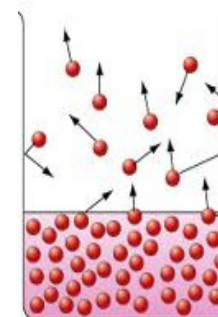


Transpiração das plantas; evaporação a partir de superfícies de água, de vegetação e de solos húmidos, de obstáculos que interceptem a água ...



## Fatores da evaporação a partir de uma superfície líquida

- Meteorológicos:**
- existência da **energia** necessária à passagem do estado líquido ao de vapor (basicamente de **origem solar**);
  - **temperatura** do ar e da superfície evaporante que potencia ou inibe a agitação molecular;
  - velocidade do **vento** responsável pela renovação do ar com consequente afastamento do vapor de água formado, permitindo à atmosfera “recuperar” a capacidade de “absorver” novo vapor de água. Esta capacidade pode ser expressa pelo “défice” de humidade da atmosfera relativamente ao estado de saturação (“**poder evaporante**” da atmosfera);





## Fatores da evaporação a partir de uma superfície líquida

- Meteorológicos:**
- existência da **energia** necessária à passagem do estado líquido ao de vapor (basicamente de **origem solar**);
  - **temperatura** do ar e da superfície evaporante que potencia ou inibe a agitação molecular;
  - velocidade do **vento** responsável pela renovação do ar com consequente afastamento do vapor de água formado, permitindo à atmosfera “recuperar” a capacidade de “absorver” novo vapor de água. Esta capacidade pode ser expressa pelo “défice” de humidade da atmosfera relativamente ao estado de saturação (“**poder evaporante**” da atmosfera);
  - **pressão** atmosférica.
- Físicos:**
- características **geométricas** do reservatório e da região circundante;
  - substâncias **contidas** na água;
  - plantas **aquáticas**.



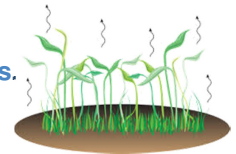
## Fatores da evaporação a partir de solos nus (sem vegetação)

- ↪ Fatores **meteorológicos** precedentes referentes à evaporação a partir de superfícies de água.
- ↪ Fatores relativos ao **teor e a distribuição** da humidade do solo.
- ↪ **Características físicas e químicas** do solo.



## Fatores da evapotranspiração

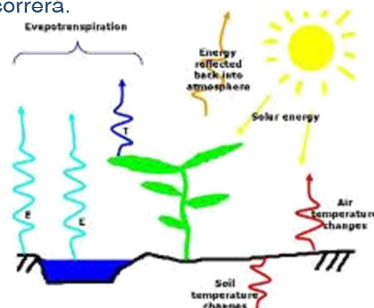
- ↪ Fatores referentes à **evaporação a partir de solos nus**.
- ↪ Fatores relativos às **plantas**.



(As designações de evaporação e de evapotranspiração tanto designam os **processos** em causa, como as **alturas de água** em jogo).



A evapotranspiração depende, assim, de fatores intrinsecamente **meteorológicos** ou **climáticos** a par com outros fatores diversos relacionadas com as características geométricas, físicas e químicas do meio (água, solo, plantas) e com a **disponibilidade de água para o processo** sem a qual o processo não ocorrerá.



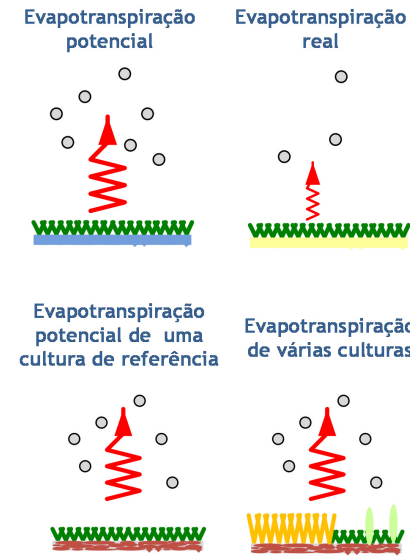
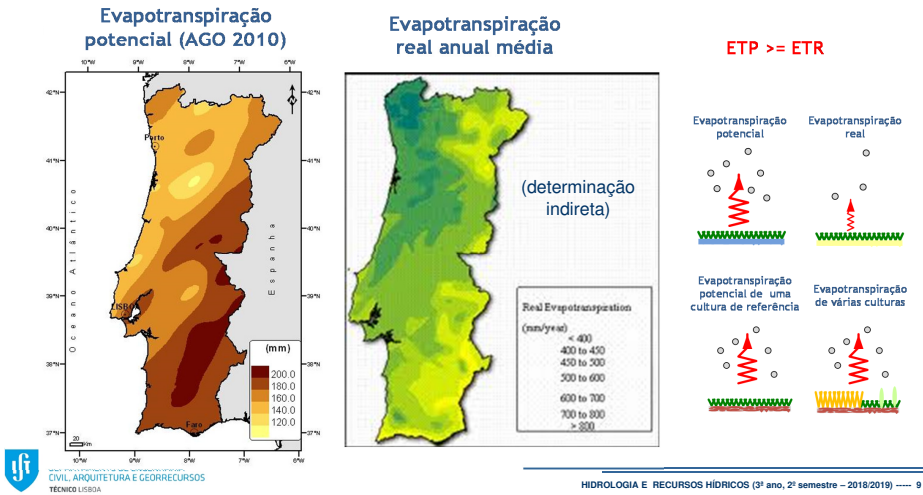
**THORNTWHAITE** introduziu em 1944 o conceito de **EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL**: quantidade de água que poderá passar para a atmosfera, diretamente ou através das plantas, se a humidade existente no solo estiver sempre disponível, em quantidade suficiente.



A **EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL** como definida por **THORNTWHAITE** (*quantidade de água que poderá passar para a atmosfera, diretamente ou através das plantas, se a humidade existente no solo estiver sempre disponível, em quantidade suficiente*) embora já não dependendo da existência de água para o processo, dependia do tipo e desenvolvimento da cobertura vegetal: era uma **GRANDEZA ECOCLIMÁTICA**.

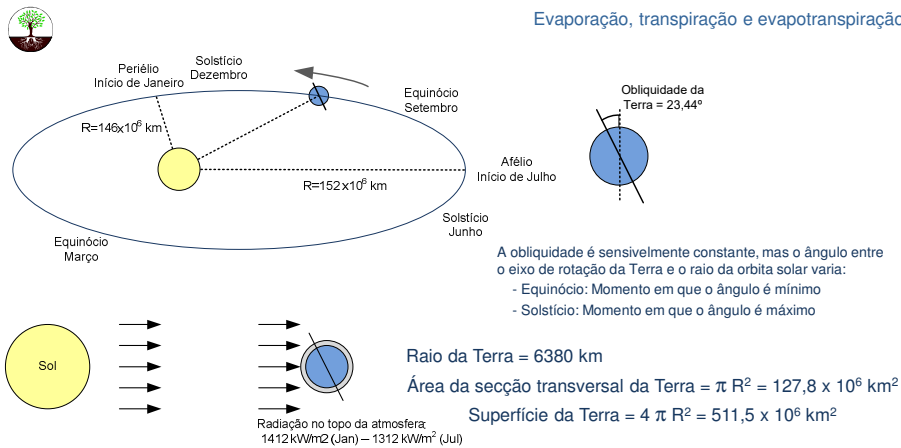
**EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL** ou de **REFERÊNCIA DE PENNAM**: ... superfície de solo completamente coberta por relva (**vegetação fresca**), de cor verde e de altura uniforme. A evapotranspiração potencial torna-se, assim, fundamentalmente dependente de fatores climáticos e, como tal, suscetível de avaliação (**GRANDEZA CLIMÁTICA**).

- Evapotranspiração potencial
- Evapotranspiração real
- Evapotranspiração de uma cultura de referência
- Evapotranspiração cultural



**ETP ≥ ETR**

**(Por ETR estar sempre condicionada pela disponibilidade de água para o processo)**

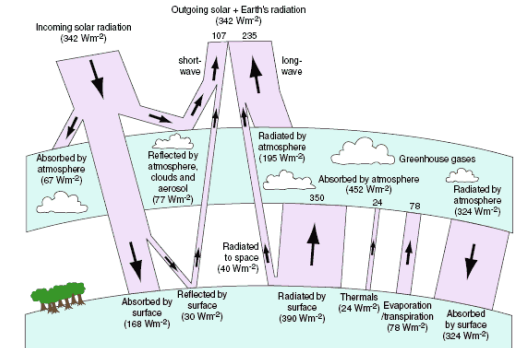


- **Potência recebida =  $1.366 \text{ kW/m}^2 \times 127,8 \times 10^6 \text{ km}^2 = \sim 175.000 \text{ TW}$**
- **Fluxo por unidade de área =  $175.000 \text{ TW} / 511,5 \times 10^6 \text{ km}^2 = \sim 342 \text{ W/m}^2$**
- **Valor médio =  $342 \text{ W/m}^2 = 30 \text{ MJ/m}^2/\text{dia}$**  (os valores reais dependem da latitude e época do ano)

**NOTA: O fluxo médio recebido é 1366 KW por m<sup>2</sup> de superfície iluminada pelo sol e 342 W por m<sup>2</sup> de superfície total do planeta. O quociente entre estes dois valores é 4 e resulta do ratio das áreas ( $4 \pi R^2$ ) / ( $\pi R^2$ )**



- **Exo-atmosfera**
  - Out: 342 W/m<sup>2</sup>
  - In: 342 W/m<sup>2</sup> (107+235)
- **Superfície terrestre**
  - In: 522 W/m<sup>2</sup> (168+30+324)
  - Out: 522 W/m<sup>2</sup> (30+40+350+24+78)
- **Atmosfera**
  - In (da exo-atmosfera): 144 W/m<sup>2</sup> (67+77)
  - In (da superfície terrestre): 452 W/m<sup>2</sup> (350+24+78)
  - In (total): 596 W/m<sup>2</sup>
  - Out (para exo-atmosfera): 272 W/m<sup>2</sup> (77+195)
  - Out (para a superfície terrestre): 324 W/m<sup>2</sup>
  - Out (total): 596 W/m<sup>2</sup>



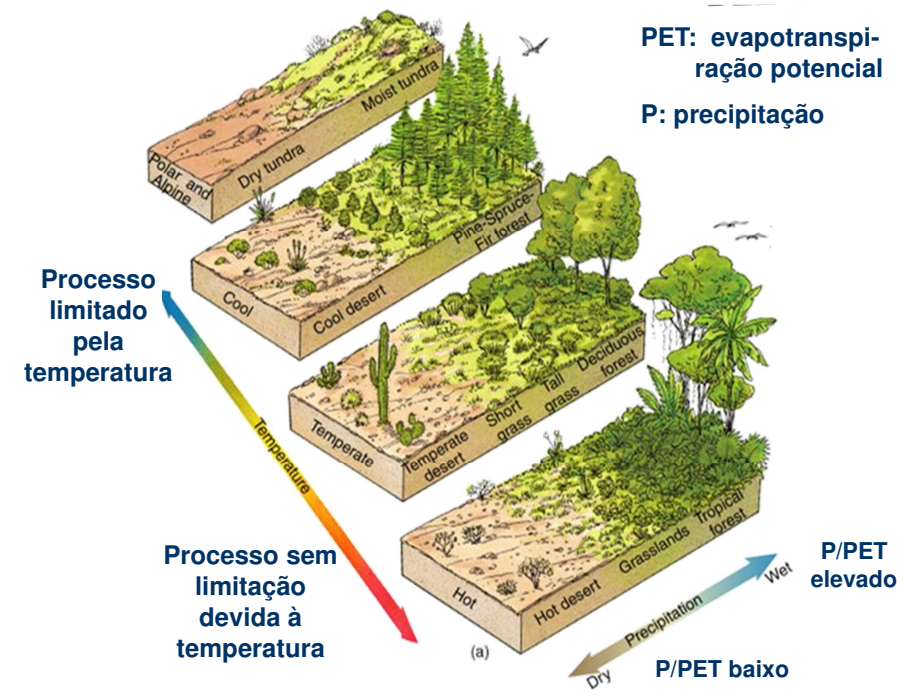
Fluxo por unidade de área =  $\sim 342 \text{ W/m}^2$   
 Potência recebida =  $342 \text{ W/m}^2 \times 511,5 \times 10^6 \text{ km}^2 = \sim 175.000 \text{ TW}$   
 Energia recebida por ano =  $175.000 \text{ TW} \times 365 \times 24 = \sim 1533 \times 10^6 \text{ TWh}$





A EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL é SEMPRE MENOR OU IGUAL à POTENCIAL pois é condicionada pela existência ou não de água em quantidade suficiente para não “inibir” o processo.

Assim, a evapotranspiração real depende da evapotranspiração potencial e da disponibilidade ou aprovisionamento de água no solo, que representa a oportunidade para a evapotranspiração: se tal água não existir, não ocorrerá evapotranspiração, independentemente das condições atmosféricas serem ou não favoráveis ao processo.



..... a evapotranspiração real depende da evapotranspiração potencial e da disponibilidade ou aprovisionamento de água no solo.....

$$\text{Evapotranspiração de referência de Penman} = \text{Evaporação a partir de extensas superfícies de água} \times \text{Fator K}$$

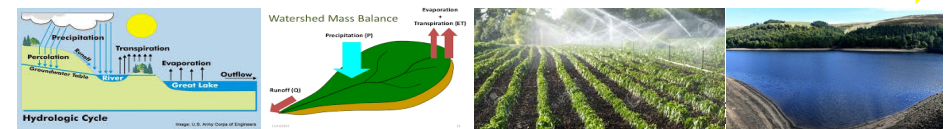
Para outras culturas – que não a relva de cor verde e altura uniforme – o fator cultural K pode ser superior ou não à unidade; por ex. arroz que pode atingir 1.6.



A evapotranspiração potencial pode ser avaliada a partir da evaporação, como anteriormente referido, ou por aplicação de fórmulas próprias. Mediante o conhecimento, só possível em áreas muito restritas, do estado de humidade do solo é possível relacionar as evapotranspirações real e potencial.

### INTERESSE

- Intervém no **balanço hidrológico** da bacia hidrográfica pelo que é indispensável para a avaliação de disponibilidades.
- Fundamental para estabelecimento das **necessidades** ou **dotações** de rega (regar é ...).
- Pode ser responsável por **perdas de água a partir da superfície livre de albufeiras** muito significativas pelo que tem de necessariamente considerada no dimensionamento destas origens de água.





## A evaporação e a evapotranspiração podem ser avaliadas:

- ↪ **diretamente**, por meio de dispositivos específicos (**evaporímetros e evapotranspirômetros**),
- ↪ por aplicação de **fórmulas**, frequentemente de natureza empírica.

### Fórmulas empíricas para cálculo da evaporação:

- ↪ do **tipo aerodinâmico**, que têm em conta os fatores atmosféricos condicionantes da evaporação, fazendo intervir a velocidade do vento e o “poder evaporante” da atmosfera,
- ↪ as que fazem também intervir o **balanço energético**, limitando a evaporação à que é compatível com a energia disponível para o processo.

A aplicação das anteriores fórmulas requer que se conheçam os valores de um maior ou menor número de grandezas meteorológicas, com ênfase para a velocidade do vento, a temperatura e a humidade relativa do ar, a radiação solar, a nebulosidade e a insolação. A medição destas grandezas é levada a cabo em estações meteorológicas integradas uma rede de monitorização da responsabilidade do Instituto de Meteorologia, IM.



## Avaliação da evaporação e a evapotranspiração (continuação)

### DIRECTAMENTE:

Evaporímetros:

Piche  
Tina Classe A  
Tina GGI – 3000  
Tina flutuante  
... coeficiente do evaporímetro ...

### Evapotranspirômetros ou lisímetros

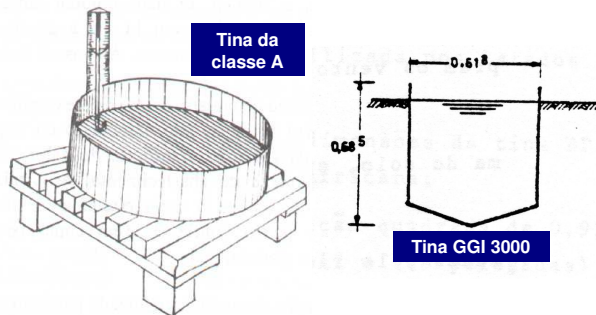
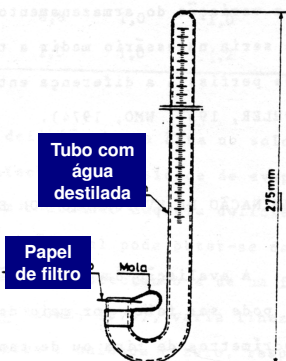
### FÓRMULAS

- Evaporação a partir de superfícies de água pouco profundas – fórmula de Penman
- Evapotranspiração potencial – fórmulas de Thornthwaite e de Turc
- Evapotranspiração cultural de referência – fórmula de Penman-Monteith ...

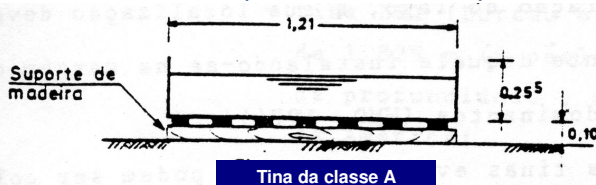


## Determinação da evaporação por evaporímetros

### Evaporímetro de Piche



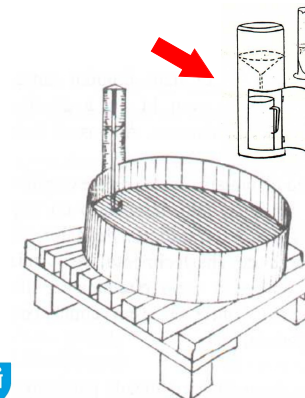
### Tinas evaporimétricas (... tinas flutuantes ...)



## Avaliação da evaporação por balanço volumétrico.

### Instalação das tinas

- ↪ Necessariamente equipada com um udómetro ou um udógrafo.
- ↪ Local horizontal e livre de obstáculos.
- ↪ Tina colocada sobre um isolante térmico.



- ↪ Se colocadas acima do solo ➡ muito afetadas pela radiação solar sobre as paredes e pelas trocas de calor com o exterior.
- ↪ Se enterradas ➡ muito afetadas pela entrada de detritos e pela Ação de animais.





### Determinação da evaporação por evaporímetros – Observações

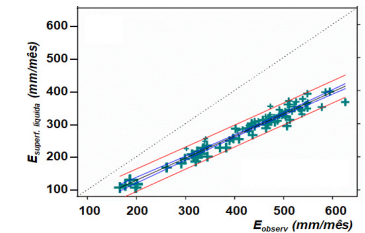
- ✓ A medição da evaporação é indiretamente fornecida por balanço volumétrico.
- ✓ Para a correção das variações de nível na tina é necessário conhecer o volume de água nela diretamente precipitado, pelo que é fundamental dotar a instalação de um aparelho medidor da precipitação – udómetro ou udógrafo.
- ✓ As medições são muito influenciadas pela geometria e localização do dispositivo, bem como pelo meio envolvente. Deste modo é necessário o estudo e conseqüente estabelecimento de coeficientes que correlacionem, quer os resultados fornecidos pelos diferentes tipos de evaporímetros, quer tais resultados com os valores efetivos da evaporação.



Evaporação a partir de um lago (existente ou a criar) =

Valor medido na tina X Coeficiente da tina, C

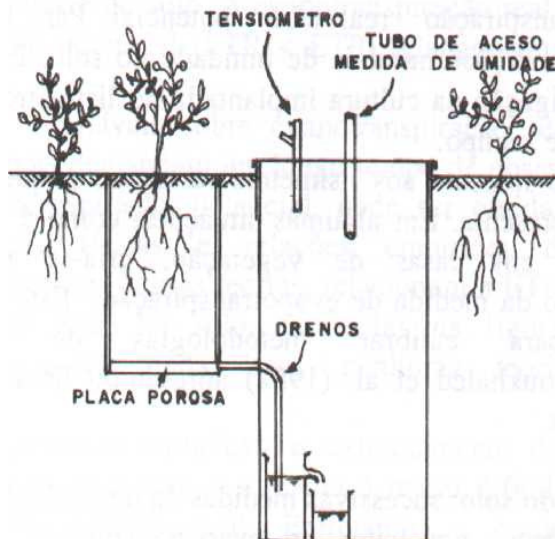
$$\text{Coeficiente da tina } C = \frac{E_{\text{superfície de água}}}{E_{\text{evaporímetro}}} < 1$$



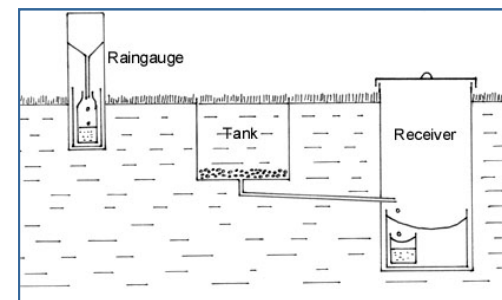
- ✓ **Efeito de oásis:** influência do transporte horizontal de energia calorífica por massas de ar provenientes da zona circundante.
  - ✓ **Radiação solar** sobre as paredes e trocas de calor entre a água e as paredes da tina.
  - ✓ **Efeito do bordo da tina** na velocidade do vento e no acréscimo da turbulência.
- O coeficiente da tina e geralmente definido numa base anual (tina GGI 3000 C=0,80; tina flutuante C=1,00)



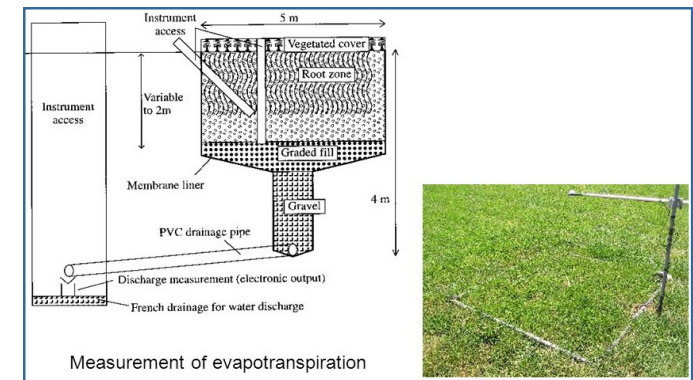
### Evaporação e transpiração – avaliação direta



**Evapotranspirómetro:** recipiente contendo solo e no qual a perda de água por evapotranspiração é também medida volumetricamente, pela diferença entre a quantidade de água que atinge o evapotranspirómetro e a que o abandona, na fase líquida, pelo fundo e por escoamento à superfície



Evapotranspirómetro





### Fórmula de Penman (1948) para a evaporação a partir de superfícies de água pouco profundas

$$E = \frac{\Delta E_m + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (\text{mm/dia})$$

- ✓ E – **evaporação diária** (mm/dia).
- ✓  $E_m$  – **evaporação equivalente à energia disponível** (mm/dia).
- ✓  $E_a$  – **evaporação fornecida por uma fórmula empírica do tipo Dalton** (mm/dia).
- ✓  $\Delta$  - **tangente trigonométrica da curva de tensão de saturação do vapor de água em função da temperatura do ar** (mm Hg / °C).
- ✓  $\gamma$  - **constante psicométrica** ( $\gamma = 0,485$  mm Hg).



### Fórmula de Penman para a evaporação (cont.)

$$E = \frac{\Delta E_m + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (\text{mm/dia})$$

$E_m$  – **Evaporação equivalente à energia disponível** (mm/dia).

$$E_m = \frac{24 \times 60 \times R}{L}$$

(fórmula homogénea)

- ✓ L – **calor latente de evaporação de 0,1 cm<sup>3</sup> de água** ( $L=59$  cal).
- ✓ R – **energia disponível para a evaporação** (balanço de energia radiante) (cal/cm<sup>2</sup>/min).



### Fórmula de Penman para a evaporação (cont.)

$$E = \frac{\Delta E_m + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (\text{mm/dia})$$

$E_m$  – **Evaporação equivalente à energia disponível** (mm/dia).

$$E_m = \frac{24 \times 60 \times R}{L}$$

(fórmula homogénea)

- ✓ L – **calor latente de evaporação de 0,1 cm<sup>3</sup> de água** ( $L=59$  cal).
- ✓ R – **energia disponível para a evaporação** (balanço de energia radiante) (cal/cm<sup>2</sup>/min).

$$R = R_c (1-r) - \sigma T_a^4 \left( 0,56 - 0,09 \sqrt{e_a} \right) \left( 0,10 + 0,90 \frac{n}{N} \right)$$

- ✓  $R_c$  – **radiação solar global** (direta e difusa) (cal/cm<sup>2</sup>/min) (**CÁLCULO+MEDIÇÃO**).
- ✓ r – **coeficiente de reflexão ou albedo** (para a água  $r=0,05$ ).
- ✓  $\sigma$  – **constante de Stefan-Boltzmann** ( $\sigma=0,8132 \times 10^{-10}$  cal/cm<sup>2</sup>/min/°K<sup>4</sup>).
- ✓  $T_a$  – **temperatura absoluta do ar** (°K) (**MEDIÇÃO**).
- ✓  $e_a$  – **tensão do vapor de água do ar à temperatura  $T_a$**  (mm de Hg) (**MEDIÇÃO**).
- ✓ n – **número de horas de sol descoberto** (**MEDIÇÃO**).
- ✓ N – **insolação astronómica** (duração astronómica do dia) (**TABELAS**).



### Fórmula de Penman para a evaporação (cont.)

$$E = \frac{\Delta E_m + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (\text{mm/dia})$$

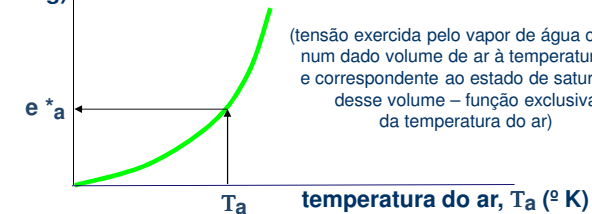
$E_a$  – **Evaporação fornecida por uma fórmula empírica do tipo Dalton** (mm/dia).

$$E_a = (a + b v) (e_a^* - e_a)$$

(fórmula não homogénea)

- ✓ a, b – **parâmetros estimados para o lugar**.
- ✓ v – **velocidade do vento a 2 m do solo** (m/s) (**MEDIÇÃO**).
- ✓  $(e_a^* - e_a)$  – **défice de saturação** (mm Hg).
- ✓  $e_a^*$  – **tensão de saturação do ar** (mm) (**TABELAS** ou **FÓRMULAS**).
- ✓  $e_a$  – **tensão do vapor de água à temperatura do ar,  $T_a$**  (mm Hg) (**MEDIÇÃO**).

$e_a^*$  (mm Hg)







**Fórmula de Penman para a evaporação (cont.)**

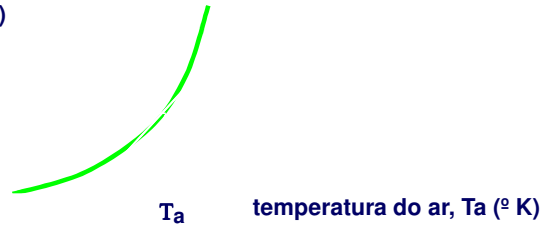
$$E = \frac{\Delta E_m + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (\text{mm/dia})$$

- ✓  $\Delta$  - tangente trigonométrica da curva de tensão de saturação do vapor de água em função da temperatura do ar (mm Hg / °C).
- ✓  $\gamma$  - constante psicométrica ( $\gamma = 0,485$  mm Hg).

$e^*_{a}$  (mm Hg)

$e^*_{a}$

(tensão exercida pelo vapor de água contido num dado volume de ar à temperatura  $T_a$  e correspondente ao estado de saturação desse volume – função exclusiva da temperatura do ar)



**Observações ou medições necessárias à aplicação da fórmula de Penman**

- ✓  $R_C$  – radiação solar global (quantidade de energia que incide na superfície terrestre por unidade de área e unidade de tempo).
- ✓  $T_a$  – temperatura do ar.
- ✓ Humidade do ar ( $e_a$ ).
- ✓  $v$  - velocidade do vento a 2 m do solo.
- ✓  $n$  - número de horas de sol descoberto,  $n$

$$R_C = \left( \alpha + \beta \frac{n}{N} \right) R_A$$

(equação de Angström;  $\alpha$  e  $\beta$  coeficientes de Angstrom)

- ✓  $R_A$  – radiação solar no topo da atmosfera ou extraterrestre (cal/cm²/min) (TABELAS).
- ✓  $N$  – insolação astronómica (TABELAS).

Porto (Serra do Pilar)  $R_C = \left( 0,18 + 0,66 \frac{n}{N} \right) R_A$

Lisboa  $R_C = \left( 0,20 + 0,60 \frac{n}{N} \right) R_A$

Coimbra (Geofísico)  $R_C = \left( 0,27 + 0,66 \frac{n}{N} \right) R_A$

Faro  $R_C = \left( 0,10 + 0,80 \frac{n}{N} \right) R_A$



**N – insolação astronómica (duração astronómica do dia) expressa em unidades de 12 h de um mês com 30 dias.**

latITUDE	Mês											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0 <sup>N</sup>												
0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
10	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
15	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
20	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94
25	0,93	0,89	1,03	1,06	1,15	1,14	1,17	1,12	1,02	0,99	0,91	0,91
26	0,92	0,88	1,03	1,06	1,15	1,15	1,17	1,12	1,02	0,99	0,91	0,91
27	0,92	0,88	1,03	1,07	1,16	1,15	1,18	1,13	1,02	0,99	0,90	0,90
28	0,91	0,88	1,03	1,07	1,16	1,16	1,18	1,13	1,02	0,98	0,90	0,90
29	0,91	0,87	1,03	1,07	1,17	1,16	1,19	1,13	1,03	0,98	0,90	0,89
30	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
31	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,18	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
32	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	1,03	0,98	0,88	0,87
33	0,88	0,86	1,03	1,09	1,19	1,20	1,22	1,15	1,03	0,97	0,88	0,86
34	0,88	0,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	1,03	0,97	0,87	0,86
35	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
36	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	0,96	0,86	0,84
37	0,86	0,84	1,03	1,10	1,22	1,23	1,25	1,17	1,03	0,97	0,85	0,83
38	0,85	0,84	1,03	1,10	1,23	1,24	1,25	1,17	1,04	0,96	0,84	0,83
39	0,85	0,84	1,03	1,11	1,23	1,24	1,26	1,18	1,04	0,96	0,84	0,82
40	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
41	0,83	0,83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04	0,96	0,82	0,80
42	0,82	0,83	1,03	1,12	1,26	1,27	1,28	1,19	1,04	0,95	0,82	0,79
43	0,81	0,82	1,02	1,12	1,26	1,28	1,29	1,20	1,04	0,95	0,81	0,77
44	0,81	0,82	1,02	1,13	1,27	1,29	1,30	1,20	1,04	0,95	0,80	0,76
45	0,80	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
46	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74
47	0,77	0,80	1,02	1,14	1,30	1,32	1,33	1,22	1,04	0,93	0,78	0,73
48	0,76	0,80	1,02	1,14	1,31	1,33	1,34	1,23	0,93	0,93	0,77	0,72
49	0,75	0,79	1,02	1,14	1,32	1,34	1,35	1,24	1,05	0,93	0,76	0,71

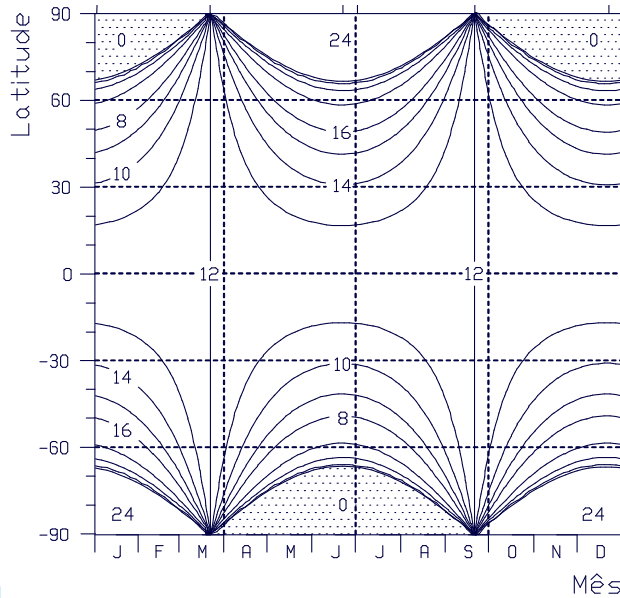


**$R_A$  – radiação solar no topo da atmosfera ou radiação extraterrestre (cal/cm²/dia).**

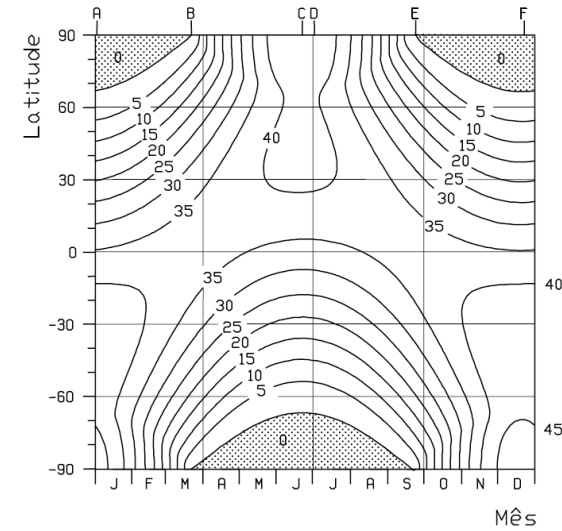
Lat. (°)		Mês											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
60	N	85	210	405	650	865	970	925	750	510	280	120	55
50		215	355	540	745	905	980	950	820	625	425	260	185
40		365	495	655	815	935	985	965	870	720	550	400	325
30		505	620	750	870	950	975	960	905	800	665	545	675
20		640	730	825	895	930	935	930	910	855	760	665	615
10	N	760	829	875	895	890	875	880	890	880	849	780	740
0		860	890	895	870	825	795	805	840	880	890	860	845
10	S	935	930	895	829	730	695	710	770	850	910	930	930
20		990	945	860	745	635	575	595	680	800	900	965	965
30		1020	930	800	645	515	445	470	575	725	870	985	1035
40		1020	895	720	530	380	305	330	450	625	810	970	1050
50		1005	835	620	400	245	170	195	315	510	735	940	1045
60	S	975	755	495	260	110	55	75	180	380	640	890	1030



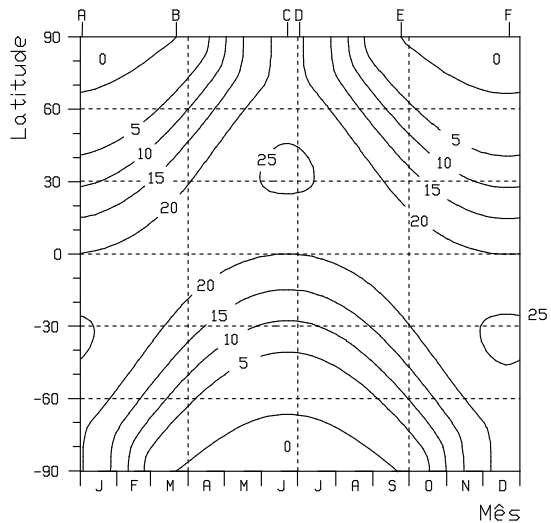




**N – insolação astronômica (duração astronômica do dia) (h)**



**Radição solar no topo da atmosfera,  $R_A$  (MJ/m²/dia)\***  
 Quantidade de energia que incide no topo da atmosfera por unidade de área e unidade de tempo  
 Nota\*: 1 cal = 4.184 J  
 1 J = 0.239005736 cal



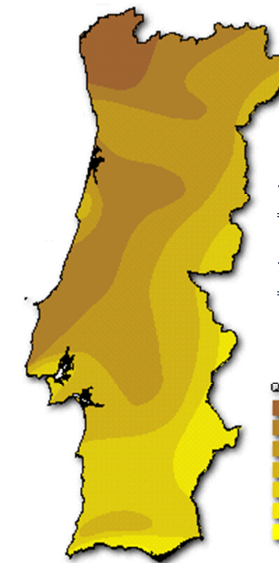
**Radição solar global,  $R_C$  (MJ/m²/dia)\***  
 Quantidade de energia que incide na superfície terrestre por unidade de área e unidade de tempo  
 Nota\*: 1 cal = 4.184 J  
 1 J = 0.239005736 cal

\* Para uma atenuação média na ausência de nebulosidade de 40%

$$R_C = \left( \alpha + \beta \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot R_A$$

$$\frac{n}{N} = 1$$

$\alpha, \beta \rightarrow$  Atenuação  $\approx$  40%



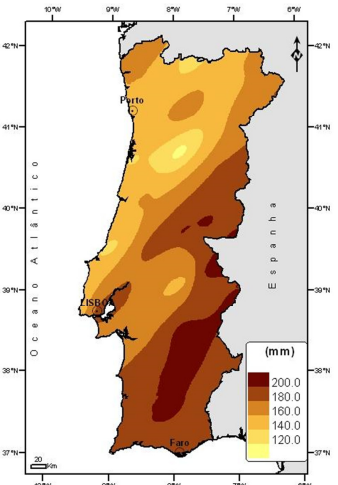
140 kcal/cm²/ano  
 = 5858 MJ/m²/ano = 186 W/m²

170 kcal/cm²/ano  
 = 7113 MJ/m²/ano = 226 W/m²

**Quantidade Total de Radiação Global**

- Inferior a 140 kcal/cm²
- Entre 140 e 145 kcal/cm²
- Entre 145 e 150 kcal/cm²
- Entre 150 e 155 kcal/cm²
- Entre 155 e 160 kcal/cm²
- Entre 160 e 165 kcal/cm²
- Superior a 170 kcal/cm²

**Evapotranspiração potencial (AGO 2010)**





Fórmula de Thornthwaite  
(1948)

$$E (30 \text{ d}, 12 \text{ h}) = 1,6 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^a \text{ (cm)}$$

- ✓ **E** – evapotranspiração potencial para um mês com 30 dias, cada dia com a insolação astronómica de 12 h (cm)
- ✓ **t** – temperatura média mensal do ar (° C) (MEDICÃO)
- ✓ **I** – índice térmico anual
- ✓ **a** – expoente empírico (unicamente função do índice térmico anual que, por sua vez, é apenas função dos índices térmicos mensais)

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

Índice térmico anual

$$i_j = \left( \frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

Índice térmico no mês j

- ✓ **t** – temperatura média mensal do ar no mês j (° C) (MEDICÃO).

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 77,1 \times 10^{-6} I^2 + 17,92 \times 10^{-3} I + 492,39 \times 10^{-3}$$



Fórmula de Thornthwaite  
(1948) (cont.)

$$E (30 \text{ d}, 12 \text{ h}) = 1,6 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^a \text{ (cm)}$$

**E** – evapotranspiração potencial para um mês com 30 dias, cada dia com a insolação astronómica de 12 h (cm).

Facto corretivo, **f** (tabela folhas teóricas),  
dependente do número de dias do mês, **Dm**, e  
da insolação astronómica média nesse mês, **N**

$$f = [(Dm/30) \times N/12]$$

(*N também pode ser obtido a partir  
do ábaco do slide 33*)

Latitude	Mês											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0°	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
10	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
15	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
20	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94
25	0,93	0,89	1,03	1,06	1,15	1,14	1,17	1,12	1,02	0,99	0,91	0,91
26	0,92	0,88	1,03	1,08	1,15	1,15	1,17	1,12	1,02	0,99	0,91	0,91
27	0,92	0,88	1,03	1,07	1,16	1,15	1,18	1,13	1,02	0,99	0,90	0,90
28	0,91	0,88	1,03	1,07	1,16	1,16	1,18	1,13	1,02	0,98	0,90	0,90
29	0,91	0,87	1,03	1,07	1,17	1,16	1,19	1,13	1,03	0,98	0,90	0,89
30	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
31	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,18	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
32	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	1,03	0,98	0,88	0,87



Fórmula de Turc  
(1948)

$$E = 0,40 \frac{t}{t + 15} (R_c + 50) \text{ (mm)}$$

- ✓ **E** – evapotranspiração potencial mensal (mm)
- ✓ **t** – temperatura média mensal do ar (° C) (MEDICÃO)
- ✓ **R<sub>c</sub>** – radiação solar global média diária durante o mês (cal/cm<sup>2</sup>/dia)

$$E = 0,37 \frac{t}{t + 15} (R_c + 50)$$

$$E \times \left( 1 + \frac{50 - h_r}{70} \right)$$

Mês de Fevereiro

Mês com humidade relativa do ar  
com valor médio inferior a 50%

- ✓ **h<sub>r</sub>** – humidade relativa do ar média mensal (%) (MEDICÃO).



$$E (30 \text{ d}, 12 \text{ h}) = 1,6 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^a$$

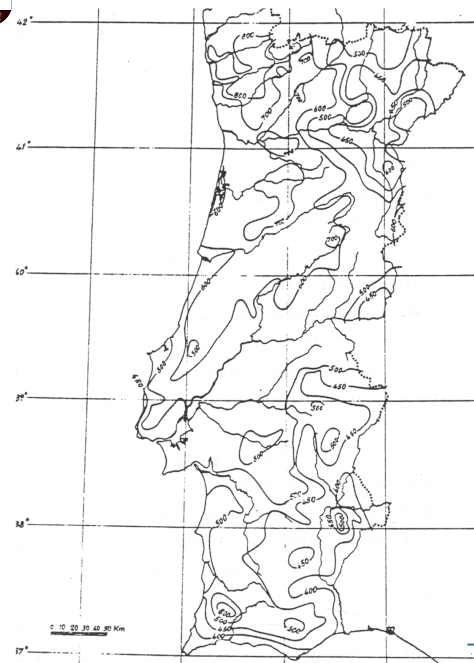
Fórmula de Thornthwaite (1948)

Fórmula de Turc (1948)

$$E = 0,40 \frac{t}{t + 15} (R_c + 50)$$

Em **Portugal Continental** a fórmula de **Thornthwaite**  
parece conduzir a estimativas da evapotranspiração potencial  
**bastante por defeito** e a fórmula de **Turc**, a estimativas  
**ligeiramente por excesso.**

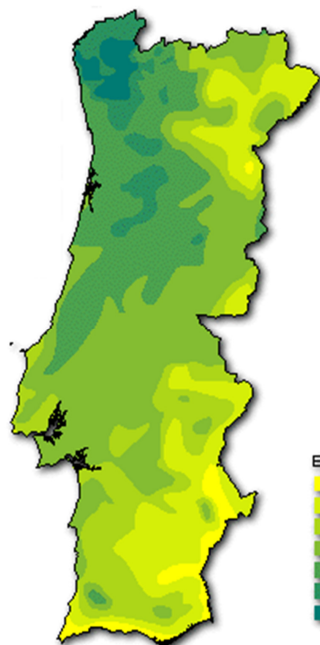
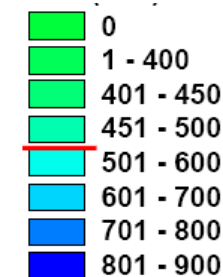
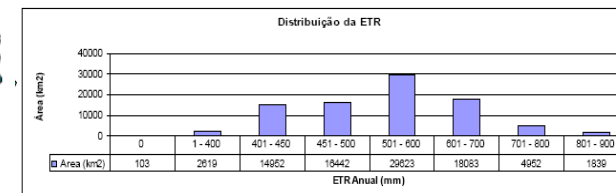
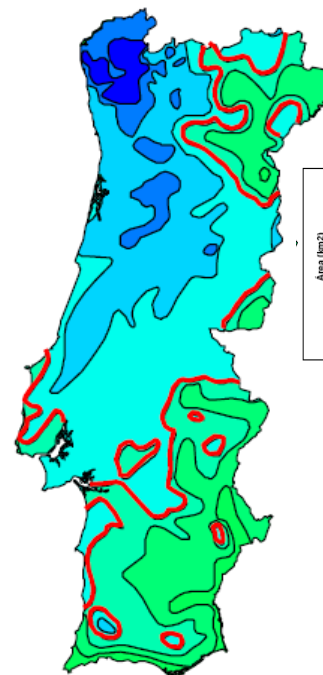




### Isolinhas da evapotranspiração real, ETR, anual média (mm)



### Isolinhas da evapotranspiração real, ETR, anual média (mm)



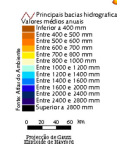
### Evapotranspiração real anual média (mm)

(variação do simples para o dobro, ou seja, muito menor variação do que a precipitação ou do que o escoamento)



#### PRECIPITAÇÃO

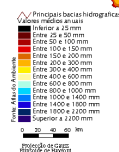
Quantidade total



Precipitação: de 400 mm a mais de 2800 mm



#### ESCOAMENTO



Escoamento: de 25 mm a mais de 2200 mm





PRECIPITAÇÃO  
Quantidade total

Evaporação, transpiração e evapotranspiração

ESCOAMENTO

Evapotranspiração  
real: de 400 mm a  
mais de 800 mm

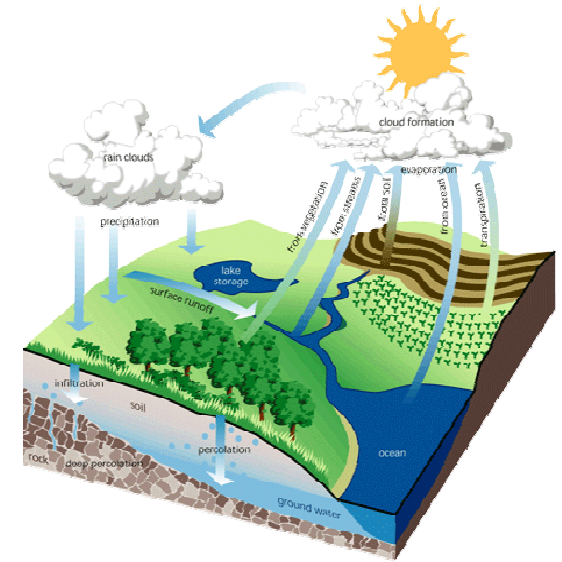
Evapotranspiração real  
condicionada/limitada pela falta de  
água para o processo

Precipitação  
400 mm  
de 2800

Escoamento: de 25 mm  
a mais de 2200 mm



Exercícios



## EXERCÍCIOS 9, 10 e 11

Evaporação, transpiração e evapotranspiração

Exercícios

9. Numa bacia hidrográfica com 100 km<sup>2</sup> de área, para a qual são transferidos de uma bacia vizinha cerca de 8 hm<sup>3</sup> por mês, a precipitação e o escoamento em determinado ano hidrológico foram de 1000 mm e 1300 mm, respetivamente. Estime em mm o valor da evapotranspiração real nesse ano. Justifique.  
(R: 660 mm).

10. Pretende-se transferir água de uma bacia hidrográfica em regime natural e com 100 km<sup>2</sup> de área para uma bacia vizinha. Sabendo que a precipitação e a evapotranspiração real anuais médias na bacia de origem são respetivamente de 1000 mm e 700 mm, estime o máximo caudal médio transferível em m<sup>3</sup>/s. Justifique.  
(R: aprox. 0.951 m<sup>3</sup>/s).

11. Os valores anuais médios da precipitação e do défice do escoamento numa bacia hidrográfica com a área de 40 km<sup>2</sup> foram estimados em 1500 e 850 mm, respetivamente. Determine o caudal anual médio na secção de referência da referida bacia em m<sup>3</sup>/s.  
(R: aprox. 0.824 m<sup>3</sup>/s).

Em determinada bacia hidrográfica portuguesa, com 45 km<sup>2</sup> de área, a precipitação anual média e o caudal médio diário, determinados com bastante rigor, são respetivamente 1200 mm e 2.85 m<sup>3</sup>/s. Comente os valores determinados e aponte duas possíveis razões que expliquem as suas grandezas relativas.

(R: Escoamento aprox. 1997.3 mm; contribuição das reservas subterrâneas, transvase)