

$$P - E + T + Q + Dr = \Delta A_z$$

## 2. Evaporação, interceção, transpiração e evapotranspiração

---

### 2.1 Conceitos

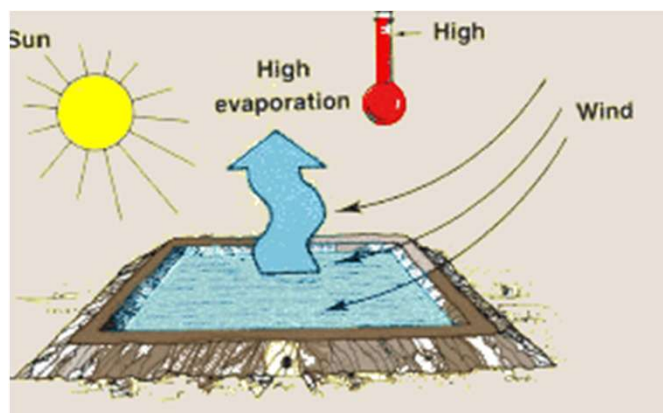
### 2.2 Medição da evaporação, interceção, transpiração e evapotranspiração

### 2.3 Cálculo da evaporação e evapotranspiração

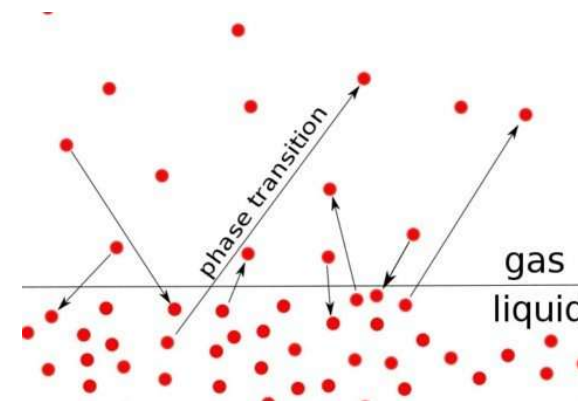
### 2.4 Valores médios para Portugal continental

## Evaporação (E)

- processo físico, em que a água passa do estado líquido para o estado gasoso, sendo removida da superfície evaporante;
- ocorre a partir de superfícies livres de água (lagos, rios) ou superfícies molhadas (solo, plantas);
- é um processo puramente físico, pelo que depende apenas de fatores climáticos.



## 2.1 CONCEITOS



## Para haver evaporação de água:

- Água
    - Plantas e solo molhados, superfície livre de massas de água (lagos, rios)
  - Energia (calor latente de evaporação)
    - *Radiação solar (curto comprimento de onda)*
    - *Radiação terrestre (longo comprimento de onda)* } Radiação líquida  $R_n$
- ➡ A distribuição da radiação solar pelo planeta varia com
- Latitude
  - Estação do ano
- Remoção do vapor de água
    - ➡ gradiente de humidade: transporte por difusão
    - ➡ Vento: transporte por convecção

- Evaporação mais elevada nas zonas tropicais relativamente às polares
- Evaporação mais elevada no verão que no inverno

Temperatura do ar e da superfície evaporante

- Evaporação mais elevada em
- zonas interiores do que próximo de massas de água;
  - zonas abertas, sujeitas à ação do vento.

## Transpiração (T)

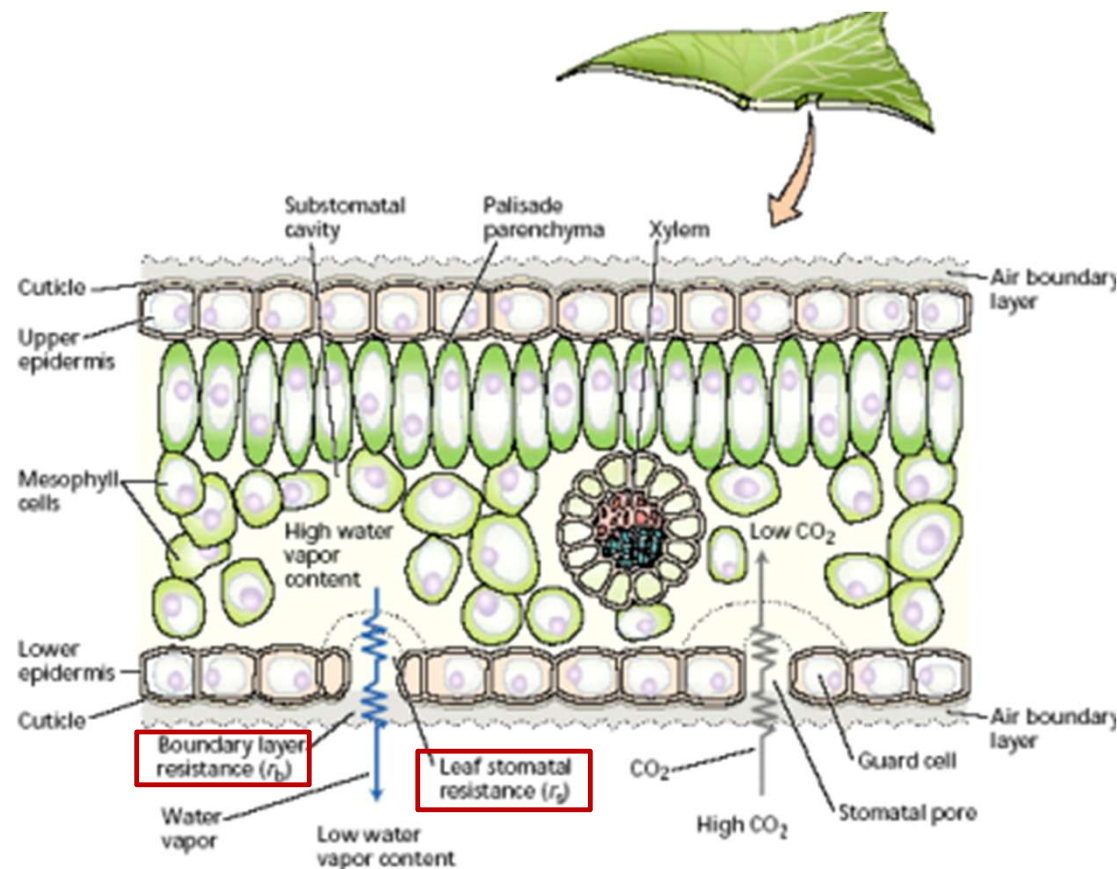
Consiste:

- vaporização da água contida nos tecidos das plantas e
- remoção do vapor para o exterior através dos estomas

É um processo com base

- física – depende dos fatores climáticos
- fisiológica - depende da abertura dos estomas →

- Tipo de cultura
- Fase do ciclo
- Disponibilidade de água no solo
- Práticas culturais



## Evapotranspiração de um coberto vegetal (ET)

Os processos de evaporação a partir do solo e transpiração das plantas ocorrem em simultâneo

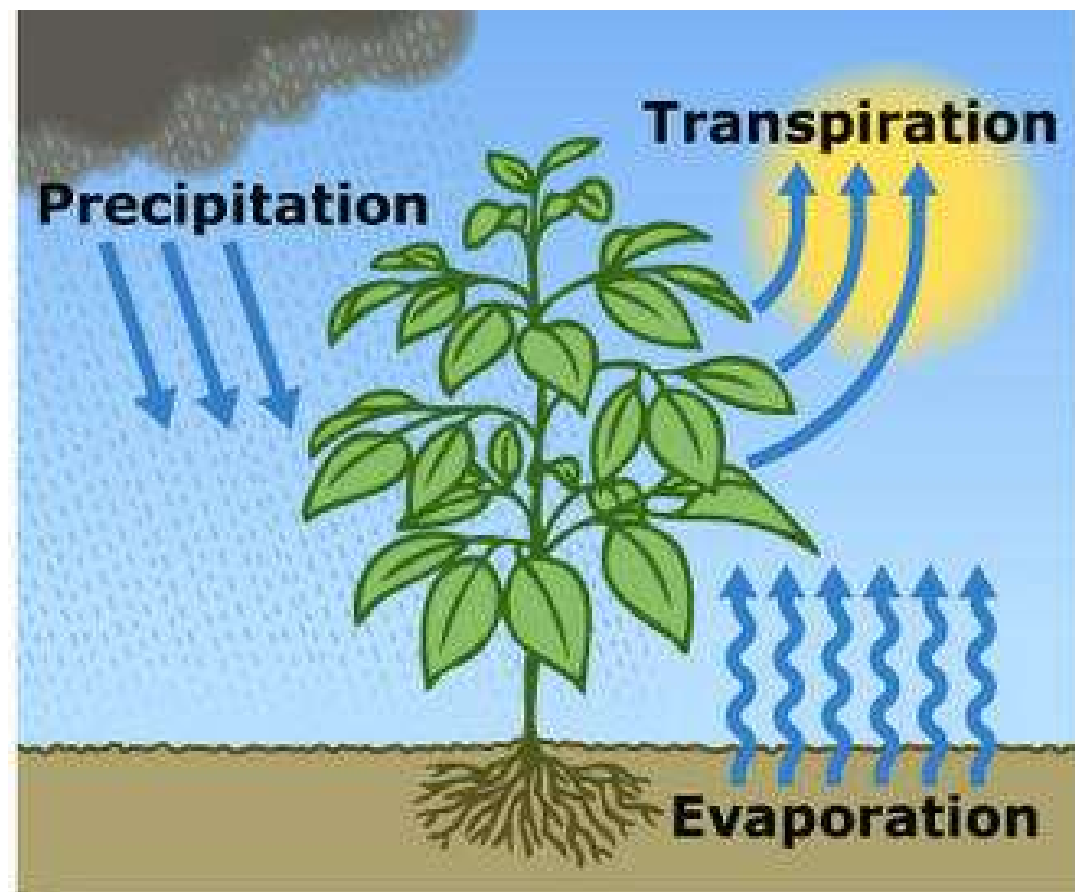
$$E + T = ET$$

Unidades mais usuais para **ET**

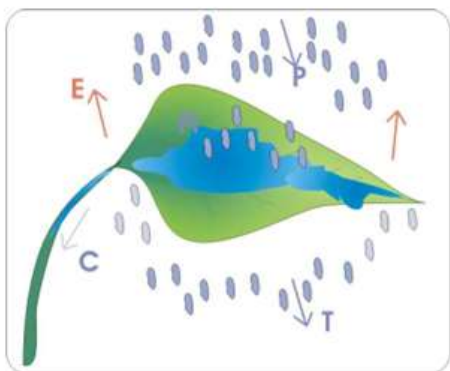
- densidade de fluxo de massa:
  - mm dia<sup>-1</sup>
  - m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>

- densidade de fluxo de energia  $\lambda ET$ 
  - W/m<sup>2</sup>
  - MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>

Calor latente de vaporização da água a 20 °C = 2.45 MJ kg<sup>-1</sup>







## INTERCEÇÃO

Parte da água de uma chuvada que é **retida pela vegetação** (ou outra superfície, como um telhado, estradas, etc) e **que se evapora** (não contribui para a infiltração nem para o escoamento superficial)



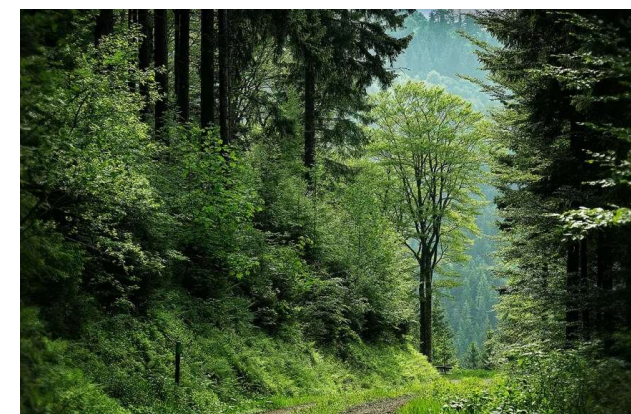
Pode representar uma fração importante **da precipitação total anual** em floresta:

- florestas de resinosas: 15 – 40% (folha perene)
- florestas de folhosas: 10 – 25% (folha caduca)
- vegetação herbácea: até 10 – 20% de cada chuvada



A quantidade de água intercetada depende de:

- características da chuvada (intensidade, duração, tamanho das gotas)
- espécie, idade e densidade do coberto vegetal
- capacidade evaporativa da atmosfera
- velocidade do vento



## ❖ Importância do conhecimento da evaporação/evapotranspiração/interceção

São termos do **balanço hidrológico ao nível das bacias hidrográficas, ao nível dos reservatórios e ao nível das parcelas agrícolas/florestais**

### Exemplos de aplicação:

- A **E** é responsável por **perdas de água** importantes nos reservatórios (albufeiras, lagoas), pelo que deve ser considerada na fase de dimensionamento de barragens e outros reservatórios, assim como durante a sua gestão;
- A **ET** é essencial para a determinação das necessidades de rega das culturas (projeto e gestão de regadios coletivos ou individuais).



## 2.2 MEDIÇÃO DA EVAPORAÇÃO, INTERCEÇÃO, TRANSPIRAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

---

### ❖ Medição da evaporação de superfícies livres de água (lagos, albufeiras)

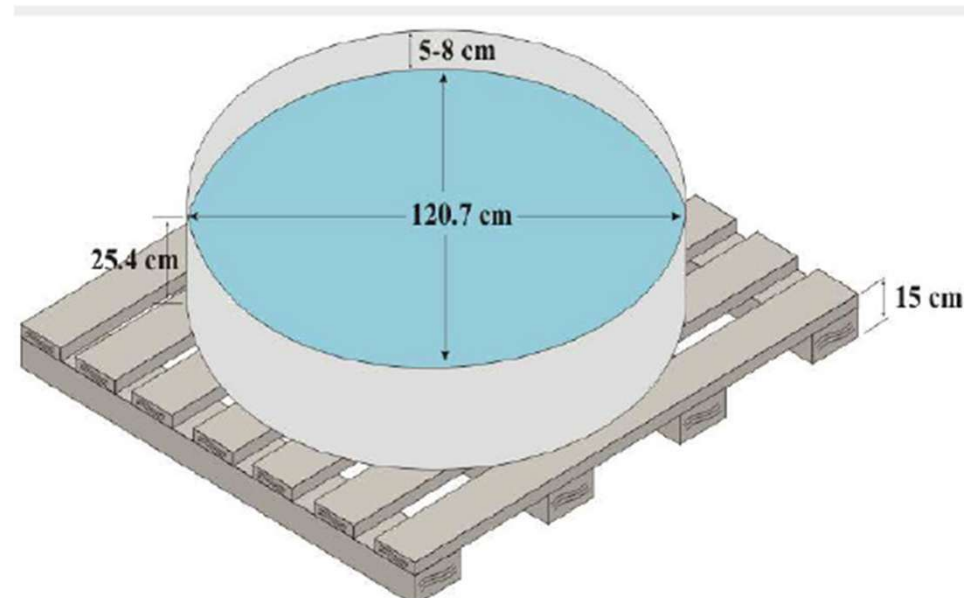
- Tinas evaporimétricas
- Evaporímetros
- Balanço hidrológico



## Tinas evaporimétricas



Tina Classe A



Estrado de madeira (ou superfície isolante): para minimizar as trocas de energia com o solo

A evaporação é determinada através da equação do balanço:

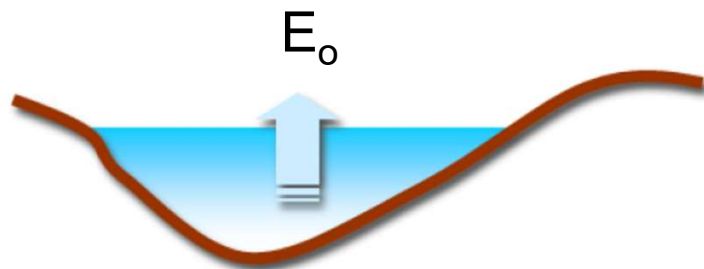
$$P + R - E = \Delta Az$$

E – evaporação

P – precipitação

R – água usada para repor o nível na tina

$\Delta Az$  – variação da água armazenada na tina



$$E_o = K_{tina} E_{tina}$$

$E_o$  – evaporação do lago/albufeira

$K_{tina}$  – coeficiente da tina

$E_{tina}$  – evaporação medida na tina



Valores de  $K_{tina}$  em Portugal:

- Outubro e Novembro: 0.7
- Dezembro a Março: 0.6
- Abril e Maio: 0.7
- Junho a Setembro: 0.8

$K_{tina} < 1$  porque:

- Energia recebida pelos lados e fundo → maior temperatura da água → maior evaporação
- Efeito de oásis (transporte de energia por massas de ar provenientes das zonas circundantes)
- Efeito do bordo da tina sobre a turbulência do ar

## Evaporímetro de Piche

- Instalado em abrigo meteorológico
- Menor correlação com a evaporação de grandes superfícies de água que as tinas



Disco de papel poroso



$$E_{tina} = 915,245 + 0,422E_{Piche}$$

valores anuais, mm  
(sul do país)

## Balanço de massa

$$(V_p + V_a) - (V_E + Dr + V_e) = \Delta Az$$

$\Delta Az$  – variação do volume armazenado de água

$V_p$  – volume da precipitação

$V_a$  – volume de água afluente

$V_e$  – volume de água efluente

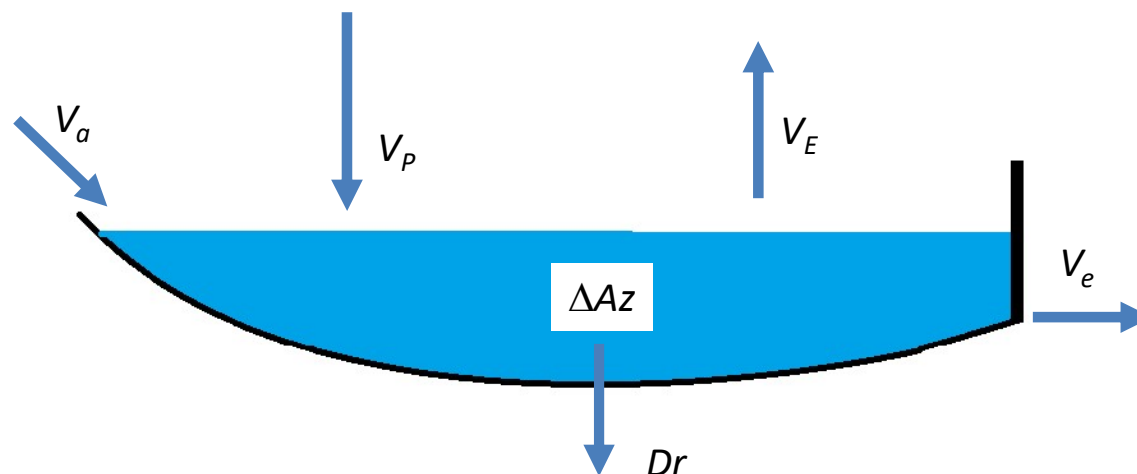
$Dr$  – volume de água infiltrada

$V_E$  – volume de água evaporada

$$E = \frac{V_E}{A \Delta t}$$

Usa-se fundamentalmente para calibrar o método da tina

Escala das grandes massas de água, como lagoas e lagos  
(para valores anuais, de preferência)



De um modo geral,

- Os reservatórios (naturais ou artificiais) não têm instrumentação suficiente para estimar os componentes desta equação de balanço, nomeadamente os escoamentos afluentes (que podem ser múltiplos, e superficiais e subterrâneos) e as perdas por infiltração.
- Os reservatórios artificiais (albufeiras de barragens) têm medições dos volumes efluentes.



## ❖ Medição da evapotranspiração

A medição da evapotranspiração é mais complicada que a da evaporação da água porque intervém adicionalmente o mecanismo de transpiração das plantas, mas podem usar-se aproximações semelhantes.

Assim, a evapotranspiração pode ser obtida a partir da equação para o **balanço de massa**, para um dado intervalo de tempo, aplicada a diferentes sistemas e escalas espaciais:

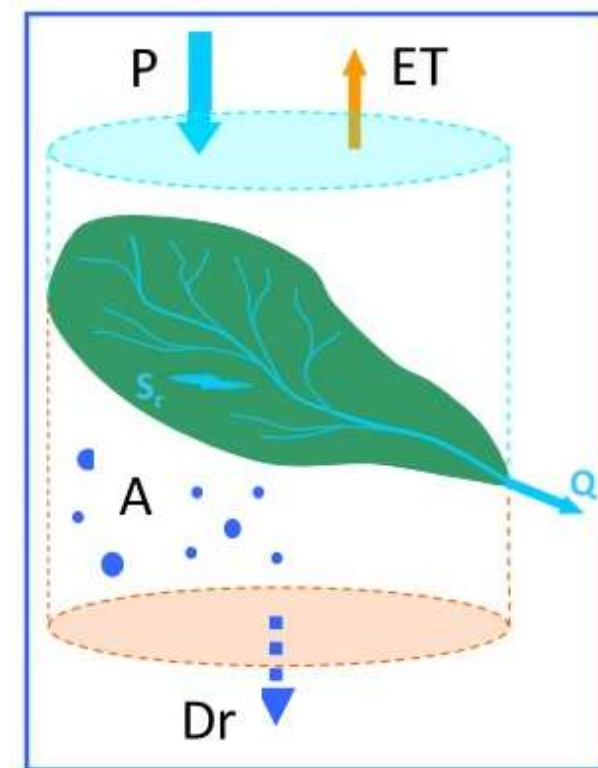
- a) a nível de uma **bacia hidrográfica**,
- b) num pequeno volume de solo cultivado – **lisímetros**.

**a) ao nível da bacia hidrográfica** (para valores anuais, de preferência – ano hidrológico)

A equação do balanço de massa aplicada a uma bacia hidrográfica e resolvida em ordem à evapotranspiração conduz a:

$$ET = P - Q - Dr - \Delta Az$$

em que  $P$  é a precipitação,  $Q$  o escoamento na secção de jusante do curso de água,  $Dr$  o escoamento subterrâneo perdido através das fronteiras da bacia e  $\Delta Az$  a variação do armazenamento no período considerado.



É possível medir com um erro aceitável a quantidade de **água precipitada** sobre a bacia e, caso exista uma estação hidrométrica, o volume de **escoamento saído** na secção de jusante da bacia

Para intervalos de tempo inferiores ao ano, a variação do armazenamento deixa de ser desprezável, pelo que a equação do balanço só será aplicável se houver **medições** extra dos teores em água na bacia, o que não é efectuado normalmente pela APA.



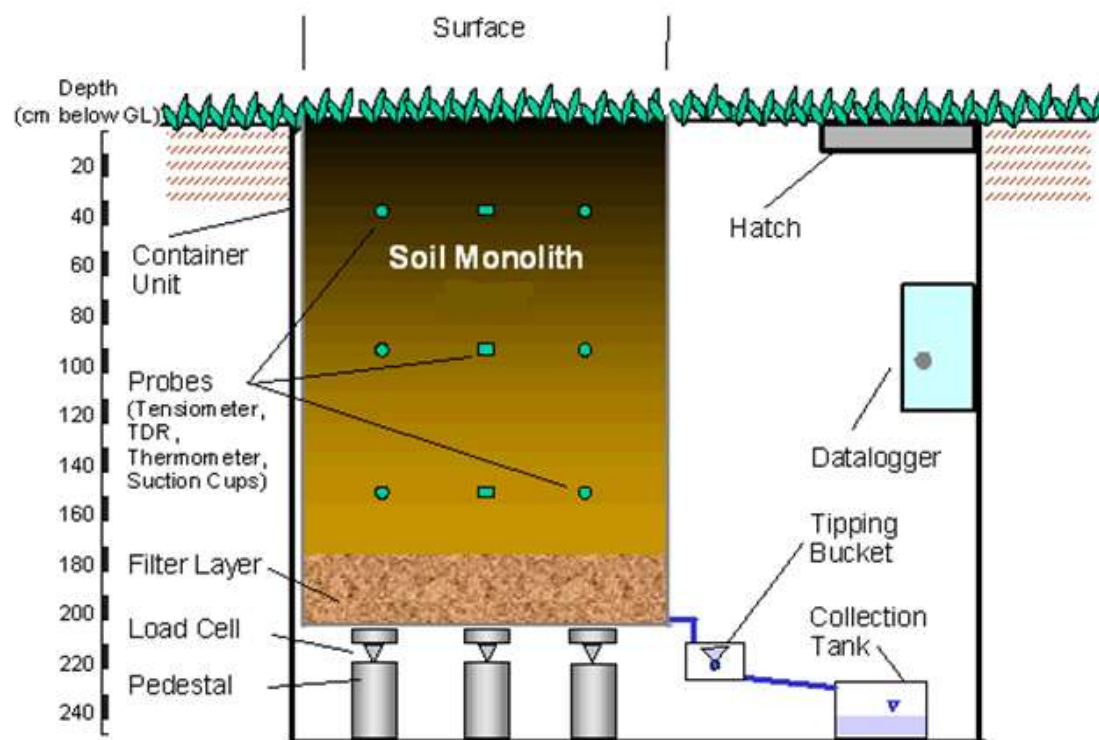
Estação hidrométrica para medição do escoamento

## b) ao nível de um campo cultivado

### Lisímetros

- de pesagem
- de drenagem

$$ET = P + R - Dr - \Delta Az$$



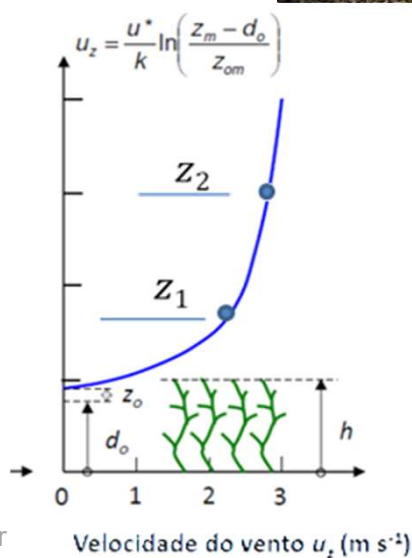


## B. Medição indireta

- Método do balanço de energia (razão de Bowen)

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}$$

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)}$$



Método aerodinâmico (baseado nas equações de transporte)

$$ET = \frac{k^2 \rho_a (q_1 - q_2) (u_2 - u_1)}{\left[ \ln \left( \frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right) \right]^2}$$

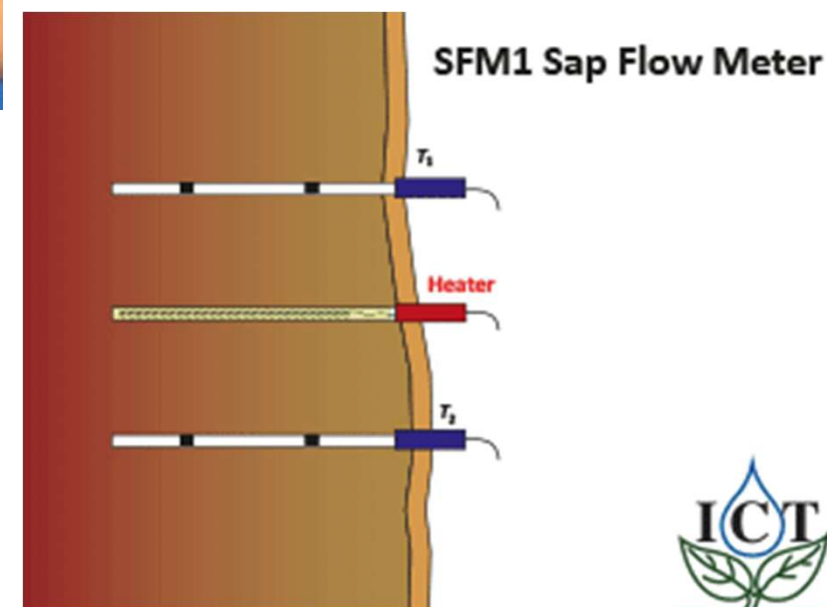
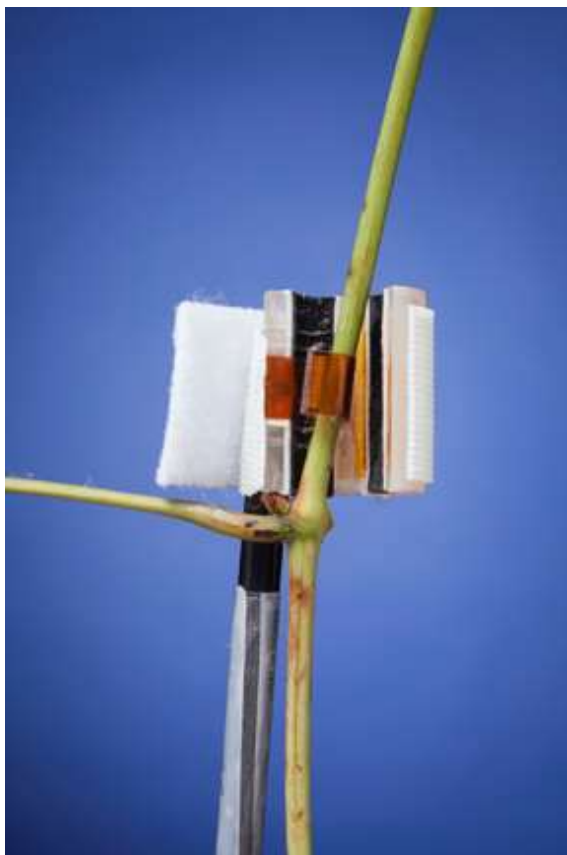
- Método das flutuações instantâneas (eddy covariance)

$$E = \lambda \overline{(\rho_a w)' q'}$$



## ❖ Medição da transpiração

### Medição do fluxo de seiva

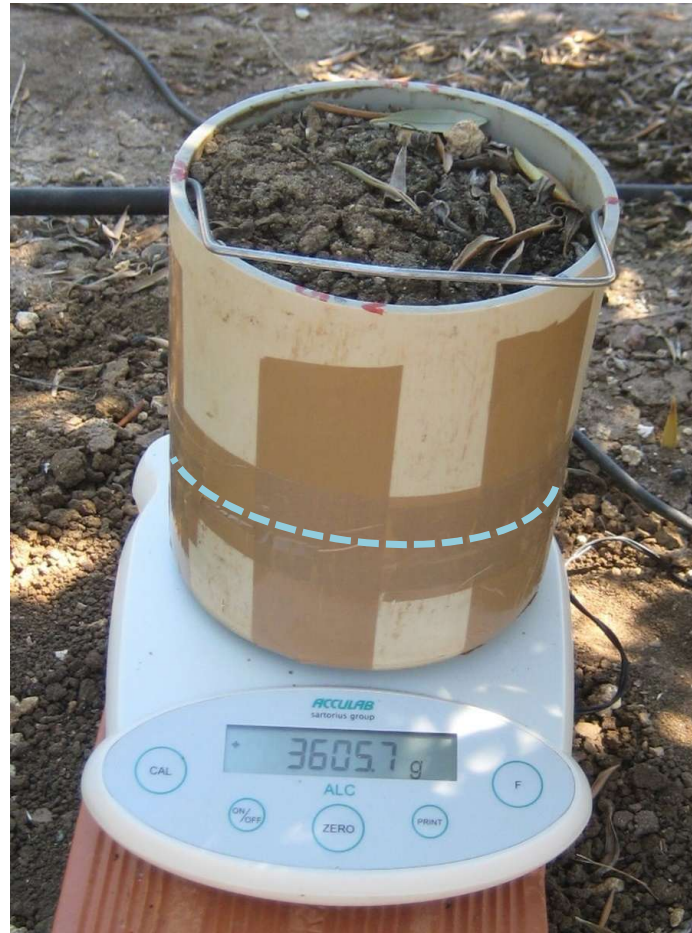


[Click Here For More Information](#)



## ❖ Medição da evaporação do solo

### Mini-lisímetros



## ❖ Medição da intercepção

Equação do balanço de massa

$$V_{\text{Int}} = V_P - V_{\text{solo}} - V_{\text{tronco}}$$

(considerando uma chuvada inteira,  $\Delta A_z = 0$ )

(b)



(a)



(c)



Medição da intercepção em pinhal, através da medição da: (a) precipitação sobre o pinhal, (b) precipitação que atinge o solo e (c) precipitação que escorre dos troncos (Fonte: David, 2018)



## 2.2 CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A FAO recomenda o uso do **método dos coeficientes culturais**

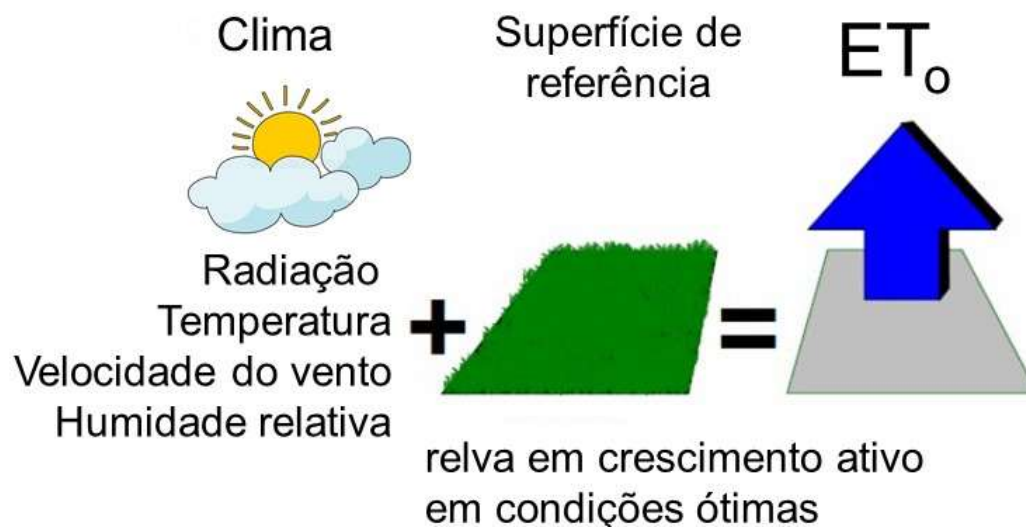
$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

- $ET_c$  evapotranspiração cultural [ $\text{mm d}^{-1}$ ],
  - Coeficiente cultural  $K_c$  [adimensional], 
  - $ET_o$  evapotranspiração de referência [ $\text{mm d}^{-1}$ ].
- Tipo de cultura
  - Fase do ciclo
  - Disponibilidade de água à superfície do solo
  - Práticas culturais

## Evapotranspiração de referência ( $ET_o$ )

taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma altura constante de 0.12 m, uma resistência de superfície constante de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e um albedo de 0.23, semelhante à evapotranspiração de um extenso coberto de relva verde de altura uniforme, em crescimento ativo, sem doenças, cobrindo totalmente o solo e bem abastecido de água.

Allen et al. (1998)  
 (FAO 56)



## Evapotranspiração de referência ( $ET_o$ )

- conceito introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, da fase do desenvolvimento e das práticas culturais.
- Apenas afetada por fatores climáticos
  - radiação
  - temperatura
  - humidade relativa
  - velocidade do vento
- É um fator climático, tal como a temperatura, a humidade relativa, etc.

Valores típicos de  $ET_o$  consoante as regiões climáticas (mm dia<sup>-1</sup>)

| REGIÕES                          | TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA (°C) |       |         |
|----------------------------------|-------------------------------|-------|---------|
|                                  | 10 °C                         | 20 °C | > 30 °C |
| <b>Tropicais e sub tropicais</b> |                               |       |         |
| • húmidas e sub-húmidas          | 2 – 3                         | 3 – 5 | 5 – 7   |
| • áridas e semi-áridas           | 3 – 4                         | 4 – 6 | 6 – 8   |
| <b>Temperadas</b>                |                               |       |         |
| • húmidas e sub-húmidas          | 1 – 2                         | 2 – 4 | 4 – 7   |
| • áridas e semi-áridas           | 1 – 3                         | 4 – 7 | 6 – 9   |



## Cálculo da $ET_o$

### a) Equação com base física: Equação FAO - Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{\Delta 0.408 (R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} (e_s - e_a) u_2}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

$\Delta$  – declive da curva de pressão de vapor, em kPa °C<sup>-1</sup>;

$\gamma$  – constante psicrométrica, em kPa °C<sup>-1</sup>;

$R_n$  – radiação líquida absorvida pelo coberto, em MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

$G$  – densidade de fluxo de calor para o solo, em MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>

$e_s$  – pressão de vapor de saturação, em kPa

$e_a$  – pressão real de vapor, em kPa

$u_2$  – velocidade média do vento a 2 m de altura, em m s<sup>-1</sup>

$T$  – temperatura média diária em °C

Dados necessários:

- Temperatura do ar
- Humidade relativa
- Radiação
- Velocidade do vento

Passo de tempo:

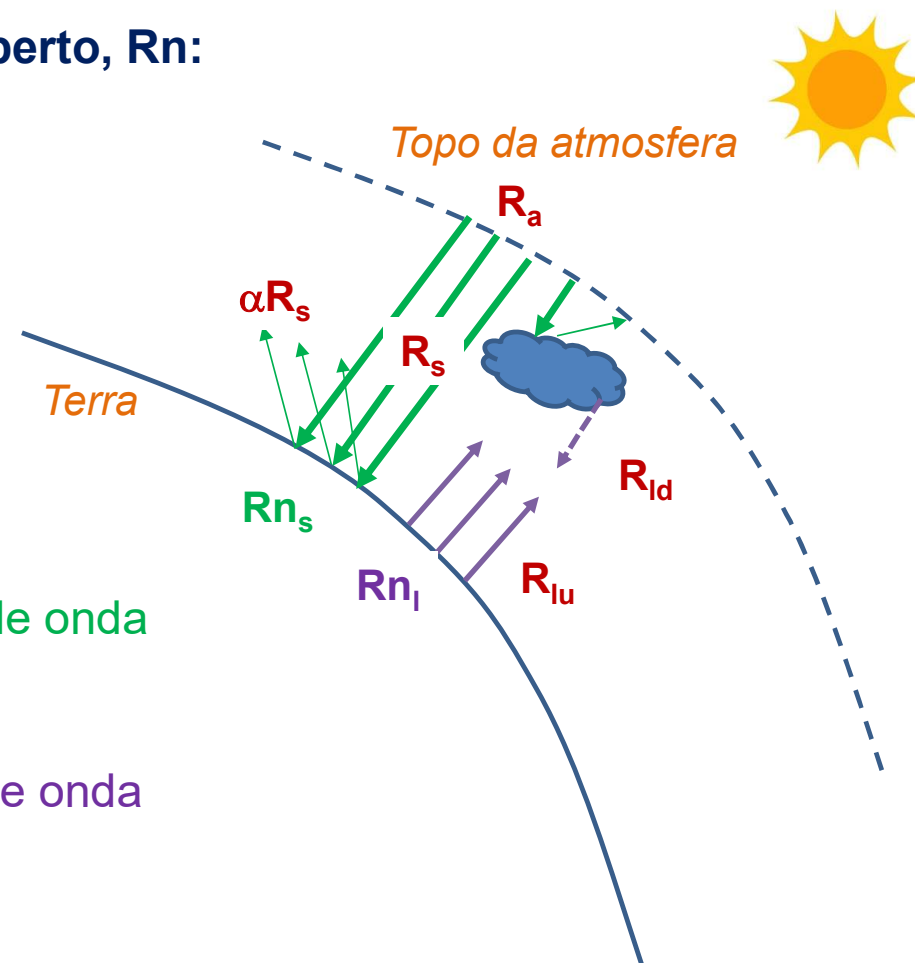
- diário
- semanal
- decendial
- mensal

## Determinação da radiação líquida absorvida pelo coberto, $R_n$ :

$$R_n = \underbrace{R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\uparrow}}_{R_{n_s}} - \underbrace{R_{lu\uparrow} + R_{ld\downarrow}}_{R_{n_l}}$$

$R_{n_s}$  - Fluxo líquido de radiação de curto comprimento de onda

$R_{n_l}$  - Fluxo líquido de radiação de longo comprimento de onda

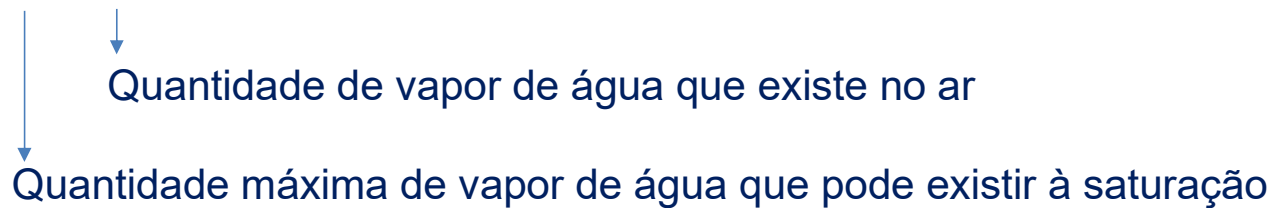


## Fluxo de calor para o solo (G)

- É a energia utilizada no aquecimento do solo.
- É + quando o solo aquece
- É – quando o solo arrefece
- É pequeno comparativamente com  $R_n$ , por isso, por vezes é ignorado, sobretudo para valores diários

## Défice de pressão de vapor (VPD)

$$VPD = (e_s - e_a)$$



Quantidade máxima de vapor de água que pode existir à saturação

Quantidade de vapor de água que existe no ar

## b) Equação empírica: Hargreaves – Samani (1985)

$$ET_o = 0.0135 k_{Rs} (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{méd} + 17.8) \frac{R_a}{\lambda}$$

$ET_o$  – evapotranspiração de referência (mm/dia)

$T$  – temperaturas do ar (°C)

$R_a$  – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

$\lambda$  – calor latente de vaporização (MJ kg<sup>-1</sup>)

$k_{Rs}$  – coeficiente de ajustamento da radiação

- a eq HS tem produzido resultados satisfatórios em diversas partes do mundo, apesar da sua aparente simplicidade
- método desenvolvido para períodos mensais
- na ausência de outros dados, tem sido igualmente aplicada a períodos diários
- necessita de calibração regional geralmente contra a eq FAO Penman-Monteith



- para locais no "interior", com domínio de massas terrestres (i.e., as massas de ar não são influenciadas por uma massa de água de grandes dimensões),  $k_{Rs} = 0.16$ ;
- para zonas "costeiras", situadas na ou perto da costa,  $k_{Rs} = 0.19$ ;
- em termos médios, utiliza-se  $k_{Rs} = 0.17$ .

*Estudos têm demonstrado que o vento é uma fonte importante da variabilidade no valor da  $ET_o$ , e como a equação de Hargreaves-Samani não contabiliza o vento, diverge sensivelmente de cálculos realizados com a equação FAO Penman-Monteith, quando aplicada a zonas ventosas.*

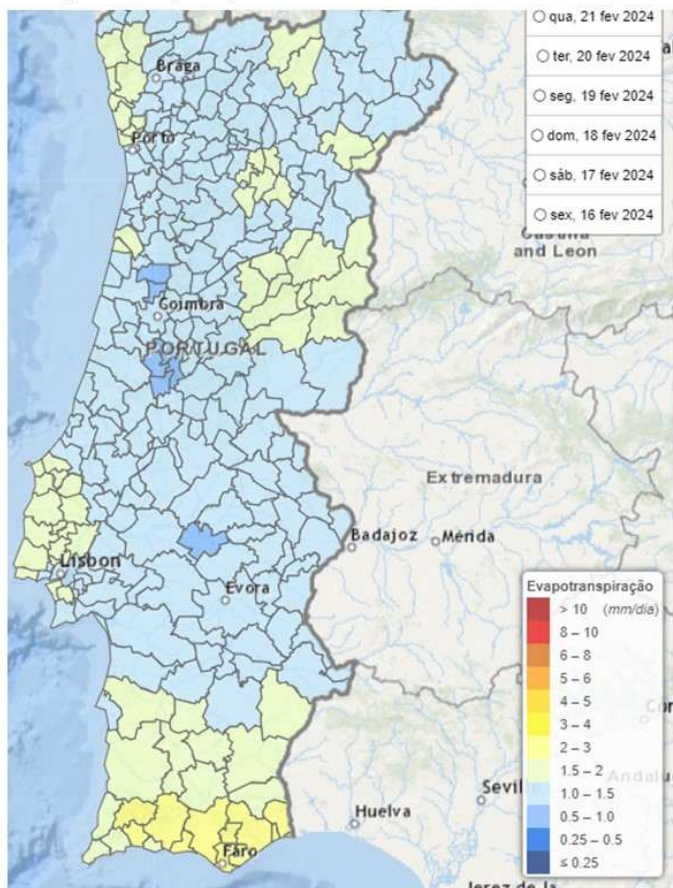
## Outras equações simplificadas para cálculo da $ET_o$

- Equação de Priestley-Taylor – com base na radiação líquida
- Fórmula de Turc – originalmente criada para estimar o escoamento

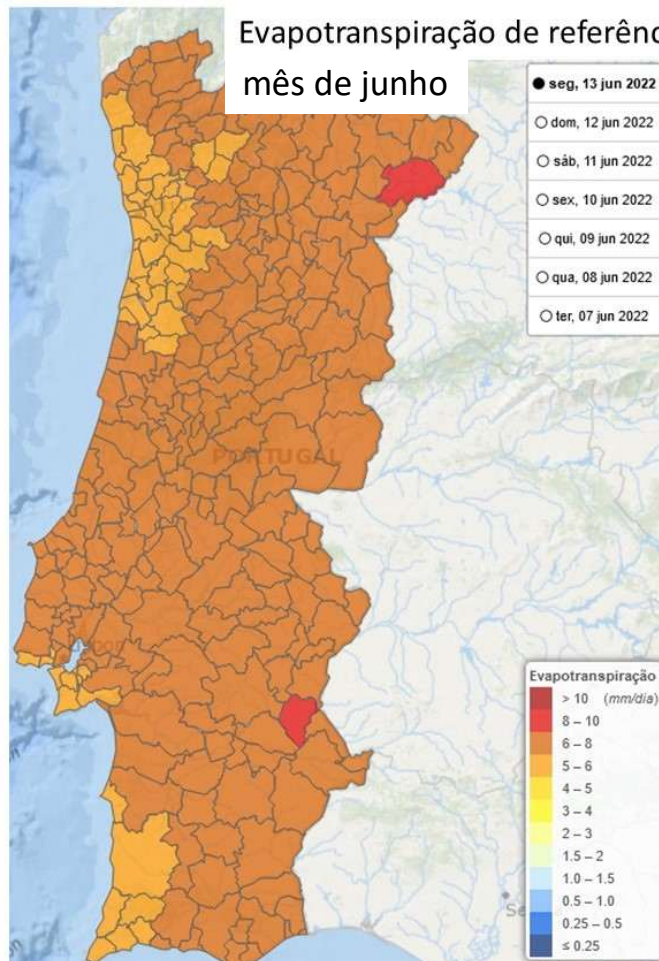
Erros de 10-15%

## 2.4 Valores médios de $ET_0$ para Portugal continental

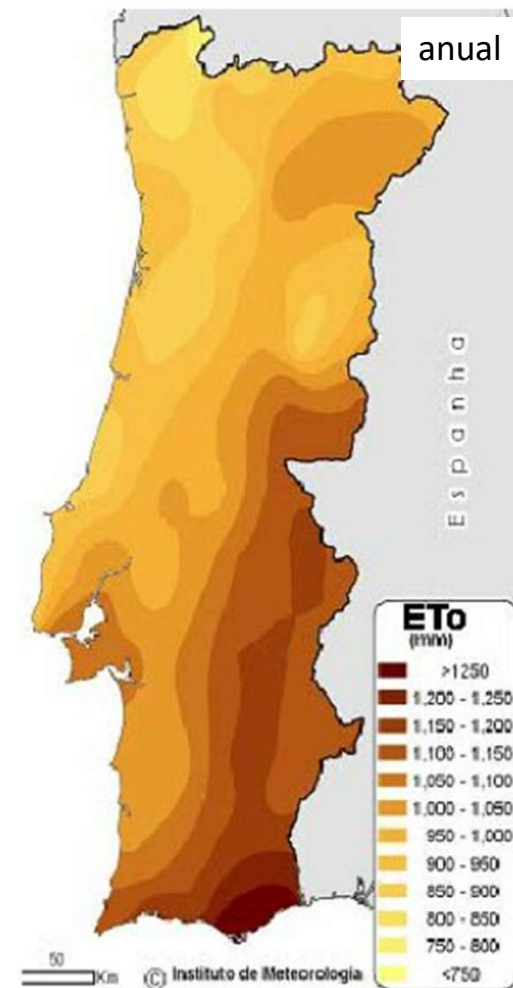
Evapotranspiração de referência- mês de fevereiro



Evapotranspiração de referência  
mês de junho



anual

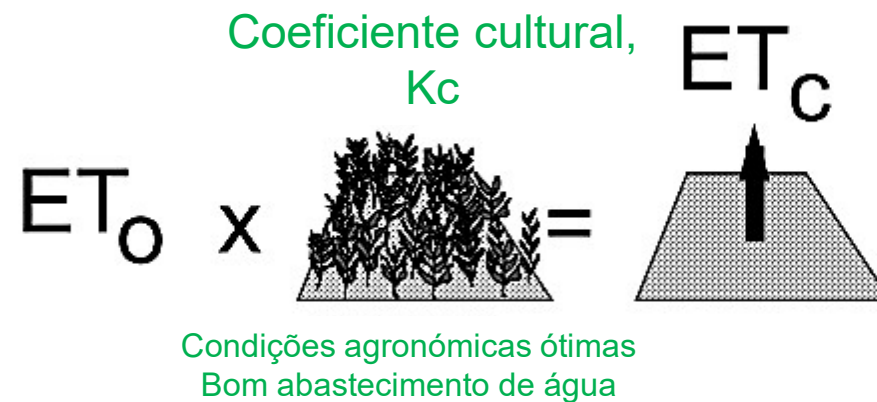


## Evapotranspiração cultural ( $ET_c$ )

$$ET_o \times K_c = ET_c$$

Coeficiente cultural,  $K_c$

Condições agronómicas ótimas  
Bom abastecimento de água



- O coeficiente cultural incorpora os efeitos específicos da vegetação na perda de água
- Depende pois do tipo de cultura/espécie, da fase do desenvolvimento e das práticas culturais.

## Espécies florestais

Resinosas *versus* folhosas

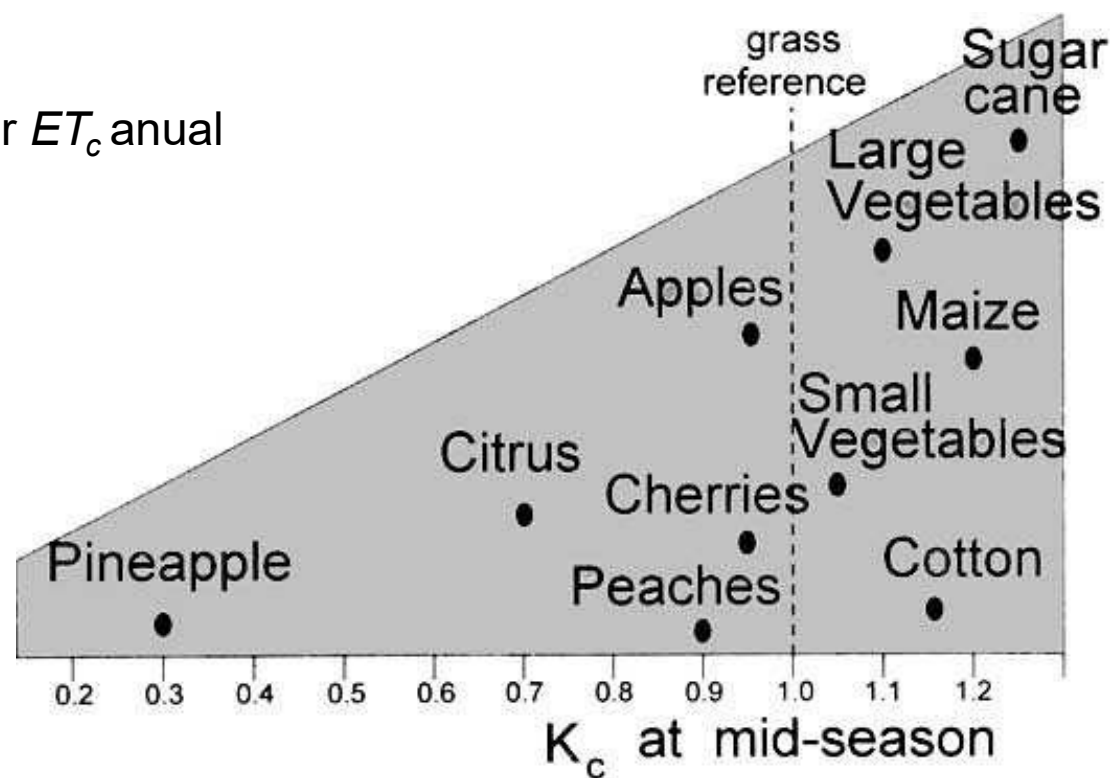
- Albedo menor
- Intercepção maior
- Persistência das folhas



resinosas têm maior  $ET_c$  anual

## Culturas agrícolas

- altura da cultura
- grau de cobertura do solo
- estrutura das plantas e do copado





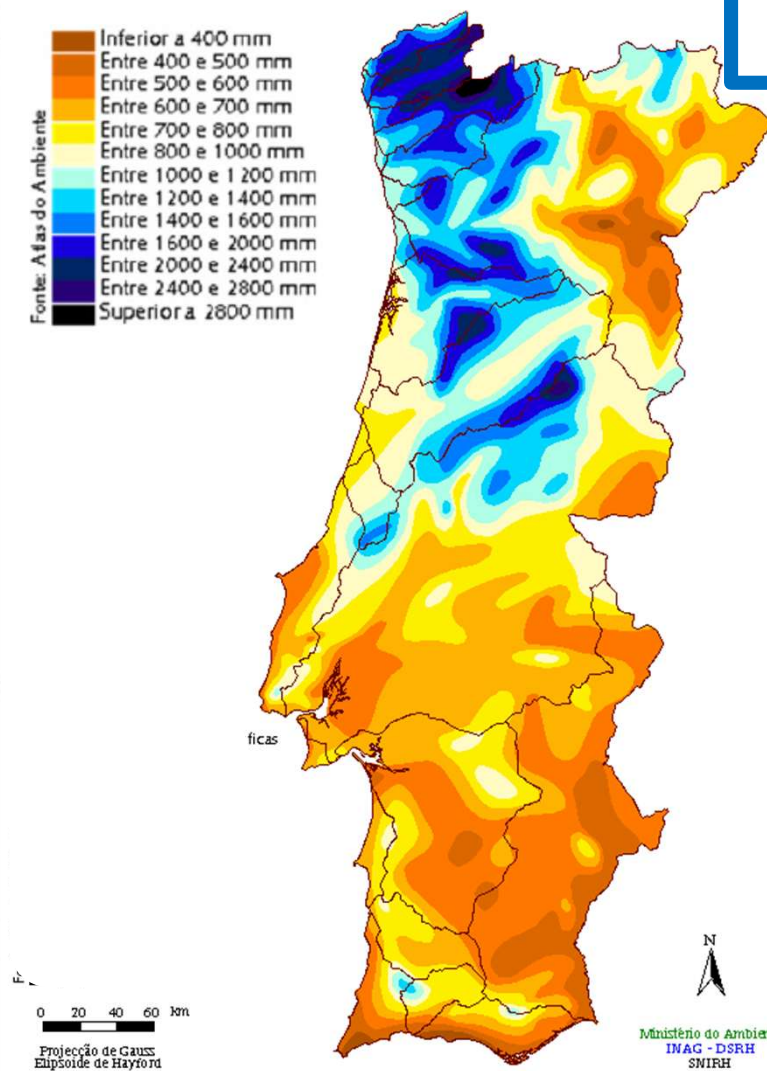
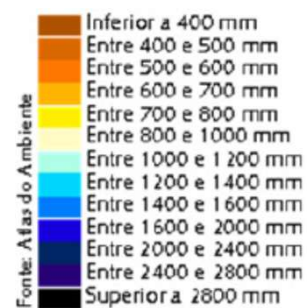
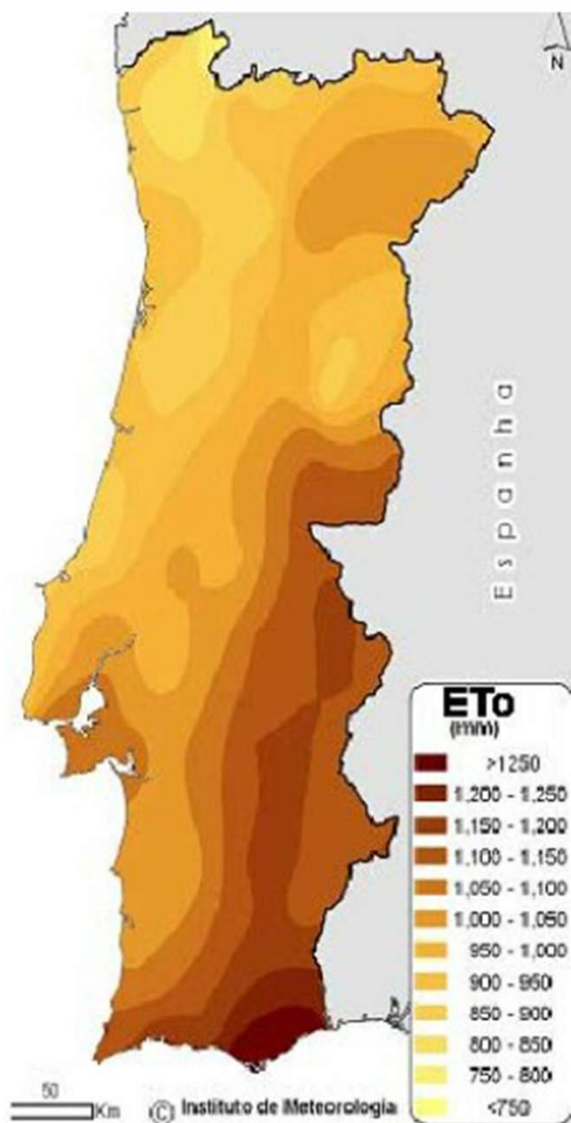
## Evapotranspiração ajustada ( $ET_{c \text{ adj}}$ )

- No caso das plantas (e também do solo) para além dos factores climáticos que controlam a evaporação surge um outro factor: **o fornecimento de água para manter o processo**
- Caso a renovação/disponibilidade de água seja insuficiente  $ET_{\text{real}} < ET_{\text{máxima}}$

$$ET_0 \times \begin{array}{c} K_s \times K_c \\ \text{Stress hídrico e} \\ \text{ambiental} \end{array} = ET_{c \text{ adj}}$$

Árvores/florestas possuem sistemas radiculares mais desenvolvidos em profundidade, conseguindo obter água a maiores profundidades e, conseqüentemente, manter a  $ET$  máxima ( $ET_c$ ) durante mais tempo que espécies herbáceas.

P



A evapotranspiração real é limitada pela disponibilidade de água para alimentar o processo

