

# Aula 7 - Evapo(transpi)ração

Prof. Fábio Marin

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
Departamento de Engenharia de Biosistemas  
LEB 306 – Meteorologia Agrícola

USP

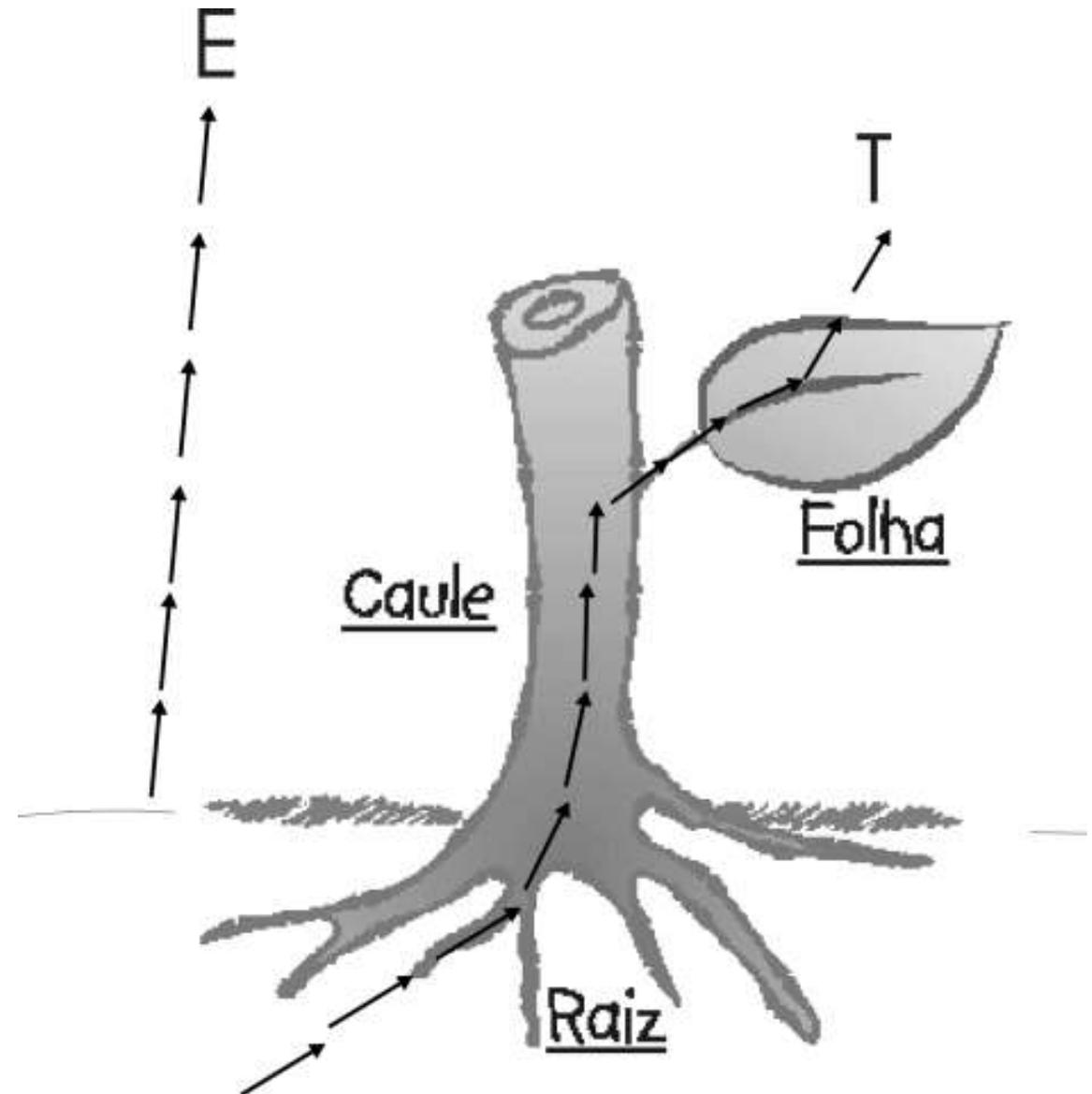


ESALQ

# Evapotranspiração - Definições

- **Evapotranspiração (ET)**
- – Processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera através da evaporação (E) e da transpiração (T)

- $ET = E + T$



# Evapotranspiração - Definições

- **Evaporação (E)** – Processo físico através do qual um líquido passa para o estado de vapor, que ocorre nos oceanos, lagos, rios, solo e vegetação.
- **Transpiração (T)** – Processo de evaporação que ocorre através da superfície das plantas, especialmente das folhas. Nas folhas, a transpiração ocorre através dos estômatos.

## A Força Motriz da ET

Diferença de potencial entre os diferentes compartimentos que compõem o percurso da água no sistema solo-planta-atmosfera

**Potencial total ( $\Psi$ )** é a soma dos potenciais parciais:

### Potenciais parciais:

Temperatura ( $\Psi_t$ )

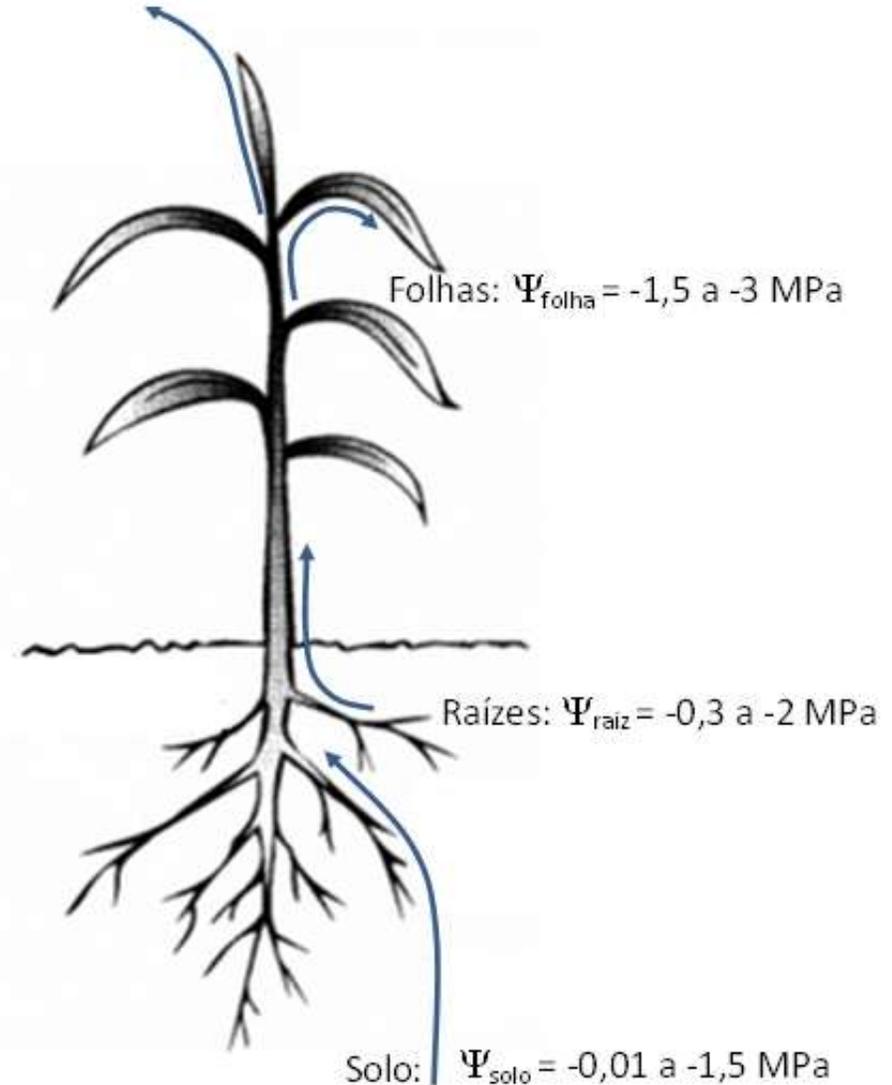
Soluto ( $\Psi_s$ )

Gravitacional ( $\Psi_g$ )

Mátrico ( $\Psi_\tau$ )

Pressão ( $\Psi_p$ )

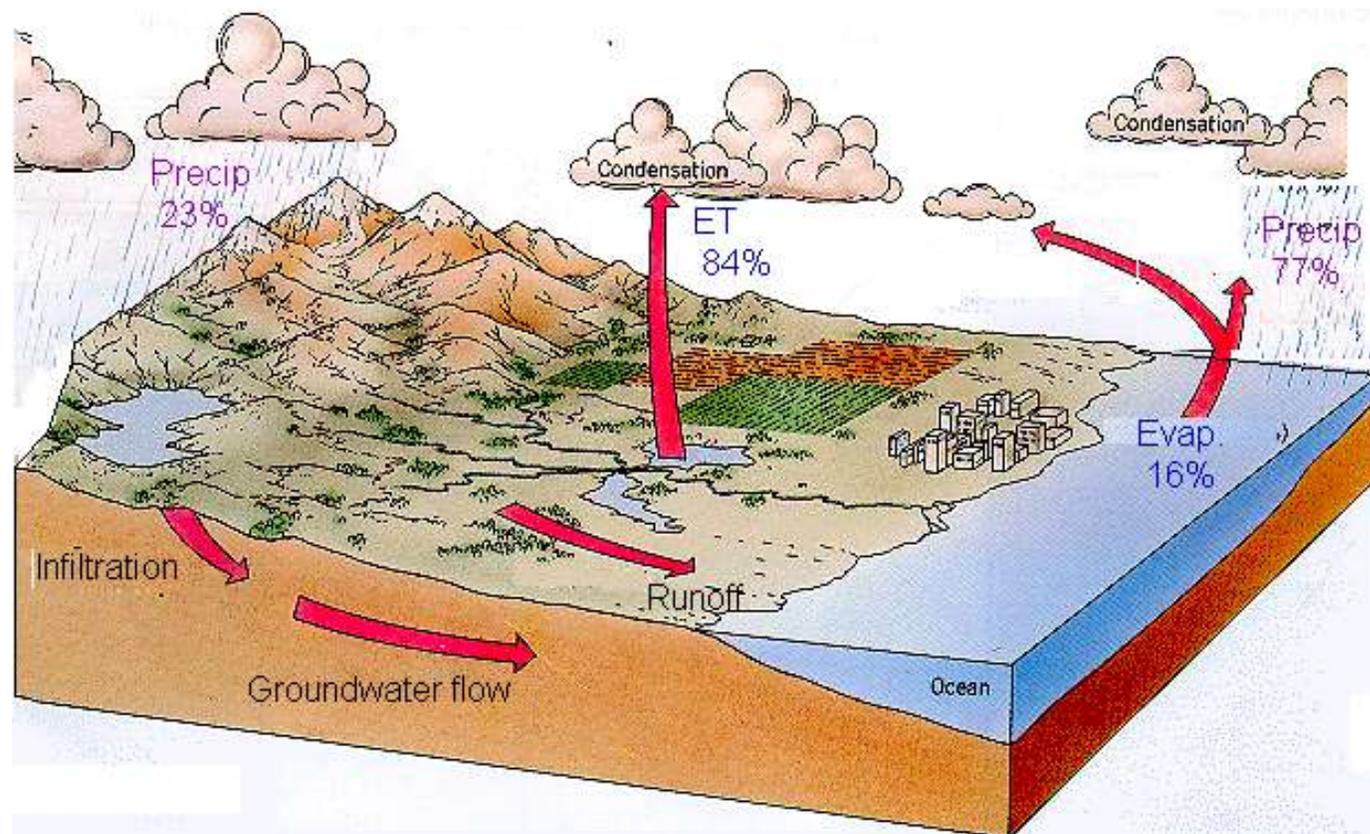
Atmosfera:  $\Psi_{atmosfera} = -50$  MPa

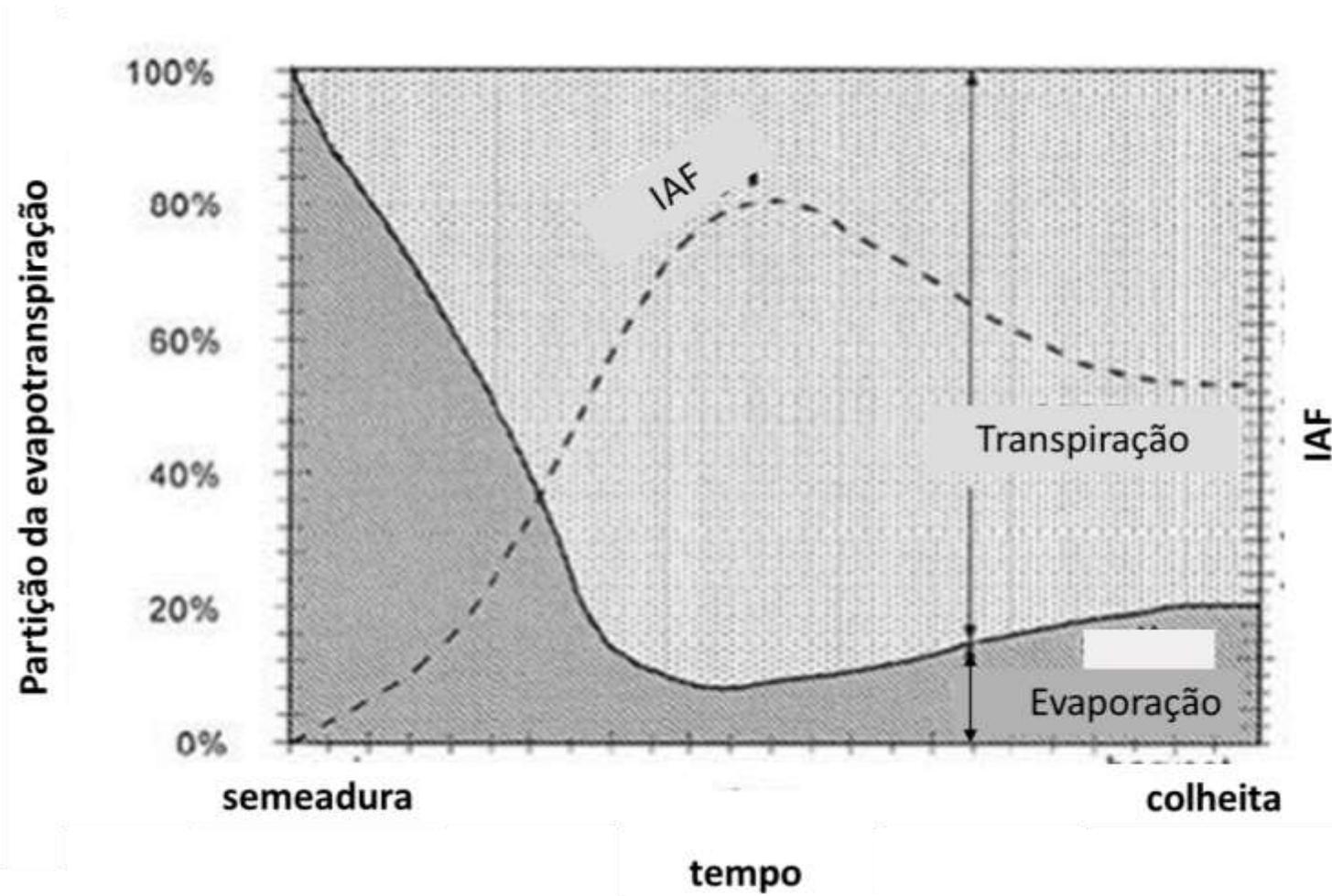


# Potenciais da água

- ✓ **Potencial Térmico** ( $\Psi_T$ ): função da variação do potencial químico da água devido à diferença entre a temperatura do sistema em um determinado estado e a temperatura da água no estado tomado como padrão. Desprezado por considerar-se que os processos são isotérmicos ou quase. Temperatura de referência tomada como a própria temperatura do sistema.
- ✓ **Potencial de Solutos** ( $\Psi_s$ ): representa o efeito dos solutos dissolvidos sobre o potencial hídrico. As moléculas dipolares da água são atraídas e retidas pelos solutos (cátions e ânions), induzindo um decréscimo na atividade da água. Assim, o potencial osmótico tem quase sempre valor negativo.  $\Psi_s$  é zero quando a água é pura.
- ✓ **Potencial de Pressão** ( $\Psi_p$ ): quando a pressão for positiva há aumento do  $\Psi$ . Pressão positiva dentro da célula equivale ao potencial de turgescência. O  $\Psi_p$  pode ser também igual a zero, como nas células em estado de plasmólise incipiente.
- ✓ **Potencial Mátrico** ( $\Psi_m$ ): define as influências que as forças superficiais e espaços (colóides, proteínas, macromoléculas, etc.) presentes nas células e espaços intercelulares. O  $\Psi_m$  é, em geral, negativo, podendo ser zero em sistemas isentos de partículas coloidais.
- ✓ **Gravidade** – O  $\Psi_g$  representa o potencial gravitacional e expressa a ação do campo gravitacional sobre a energia livre da água. Ele é definido como o trabalho necessário para manter a água suspensa em determinado ponto em relação a atração da gravidade.

Evapotranspiração é parte importante do ciclo hidrológico e representa a água que retorna à atmosfera na forma de vapor





Partição da evapotranspiração em culturas agrícolas

## Evapotranspiração de Referência (ETo)

**Evapotranspiração de Referência (ETo)** – Lâmina que seria utilizada por uma superfície coberta por vegetação hipotética, com altura de 8-15cm, albedo de 23%, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem restrição de água.

**(ETo)** - função de variáveis meteorológicas (radiação solar, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, etc.). Desse modo, é também uma variável meteorológica.

# Evapotranspiração real (ETr)

**Evapotranspiração real (ETr)** –  
quantidade de água  
efetivamente utilizada por uma  
superfície vegetada

$$E_{To} \geq E_{Tr}$$

## Evapotranspiração de cultivo (ETc)

**Evapotranspiração de cultivo (ETc)** ou **Evapotranspiração máxima** – é a evapotranspiração de uma cultura em dada fase de seu desenvolvimento, sem restrição hídrica, em condições ótimas de crescimento e com ampla área de bordadura para evitar a advecção de calor sensível (H) de áreas adjacentes. Assim ETc depende das condições meteorológicas, expressas por meio da ETP (ou ETo), do tipo de cultura (maior ou menor resistência à seca) e da área foliar. Como a área foliar da cultura padrão é constante e a da cultura real varia, o valor de Kc também irá variar.

$$ETc = Kc * ETo$$

# Duração de fases fenológicas para diferentes culturas e fases fenológicas

## Length of growth stages

FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24 provides general lengths for the four distinct growth stages and the total growing period for various types of climates and locations. This information has been supplemented from other sources and is summarized in Table 11.

In some situations, the time of emergence of vegetation and the time of effective full cover can be predicted using cumulative degree-based regression equations or by more sophisticated plant growth models. These types of models should be verified or validated for the local area or for a specific crop variety using local observations.

**TABLE 11. Lengths of crop development stages\* for various planting periods and climatic regions (days)**

Crop	Init. (L <sub>ini</sub> )	Dev. (L <sub>dev</sub> )	Mid (L <sub>mid</sub> )	Late (L <sub>late</sub> )	Total	Plant Date	Region
<b>a. Small Vegetables</b>							
Broccoli	35	45	40	15	135	Sept	Calif. Desert, USA
Cabbage	40	60	50	15	165	Sept	Calif. Desert, USA
Carrots	20	30	50/30	20	100	Oct/Jan	Arid climate
	30	40	60	20	150	Feb/Mar	Mediterranean
	30	50	90	30	200	Oct	Calif. Desert, USA
Cauliflower	35	50	40	15	140	Sept	Calif. Desert, USA
Celery	25	40	95	20	180	Oct	(Semi) Arid
	25	40	45	15	125	April	Mediterranean
	30	55	105	20	210	Jan	(Semi) Arid
Crucifers <sup>1</sup>	20	30	20	10	80	April	Mediterranean
	25	35	25	10	95	February	Mediterranean
	30	35	90	40	195	Oct/Nov	Mediterranean
Lettuce	20	30	15	10	75	April	Mediterranean
	30	40	25	10	105	Now/Jan	Mediterranean
	25	35	30	10	100	Oct/Nov	Arid Region
	35	50	45	10	140	Feb	Mediterranean

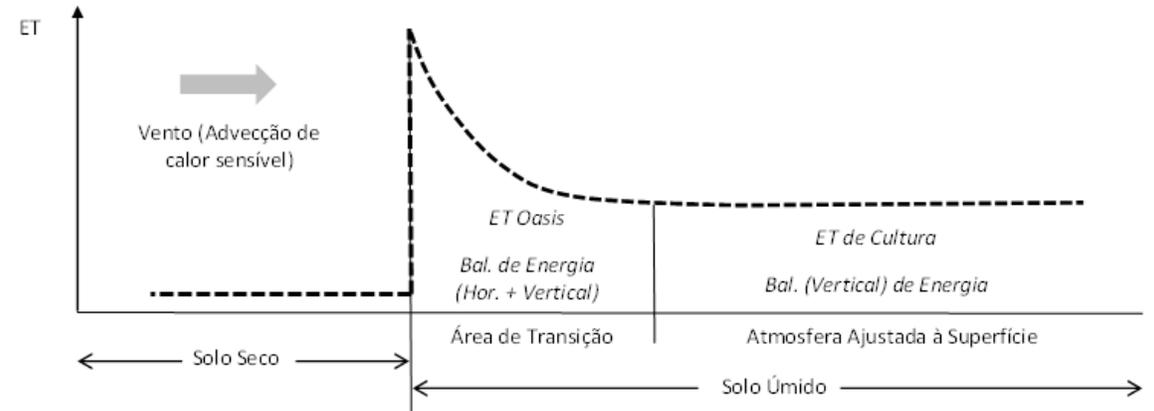


Para encontrar outras cultura, consulte a Tabela 11 disponível em <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm#length%20of%20growth%20stages>

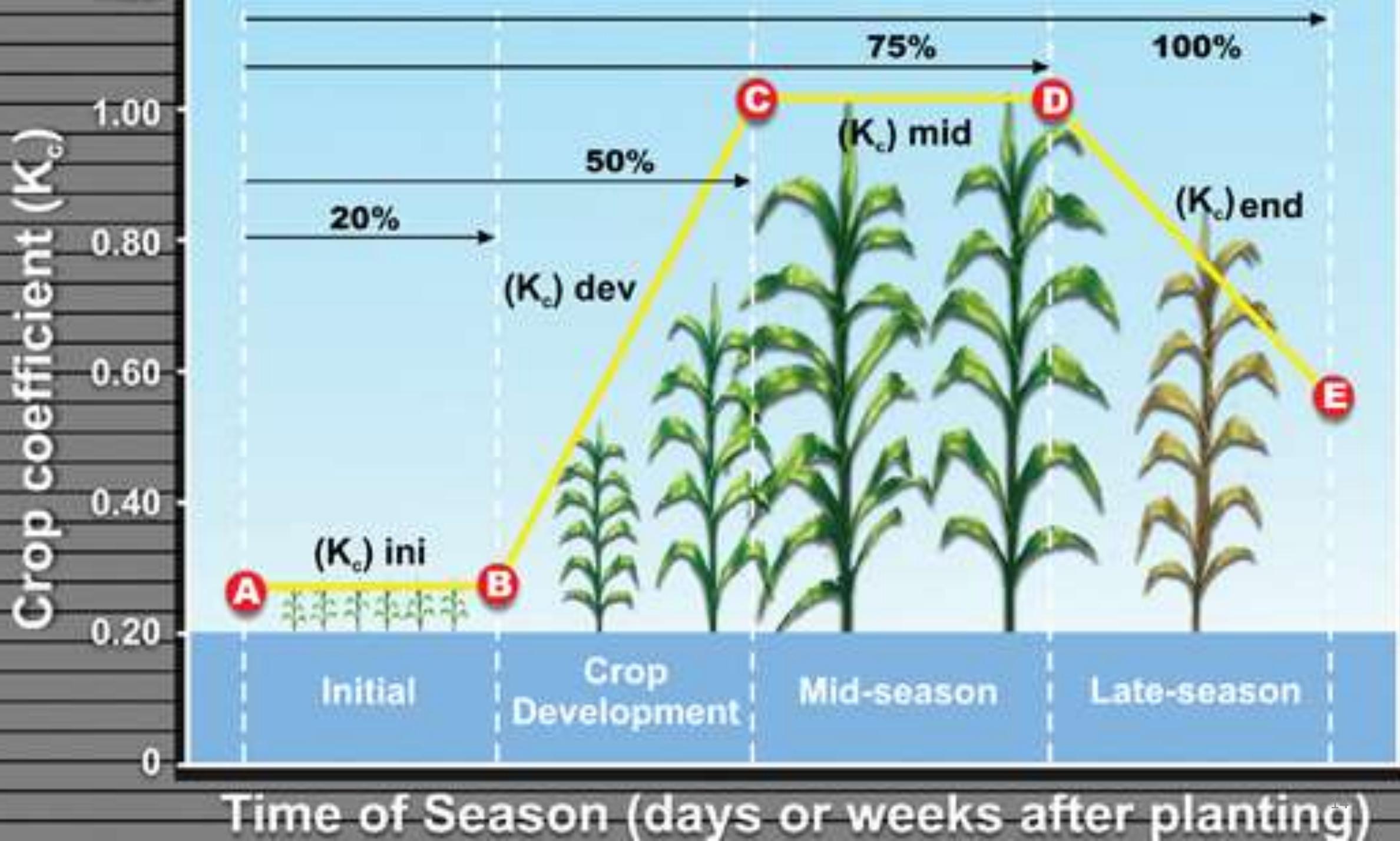
# Duração de fases fenológicas para diferentes culturas e fases fenológicas

**TABLE 12. Single (time-averaged) crop coefficients,  $K_c$ , and mean maximum plant heights for non stressed, well-managed crops in subhumid climates ( $RH_{min} \approx 45\%$ ,  $u_2 \approx 2$  m/s) for use with the FAO Penman-Monteith  $ET_0$ .**

Crop	$K_{c\ ini}^1$	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$	Maximum Crop Height (h) (m)
<b>a. Small Vegetables</b>	<b>0.7</b>	<b>1.05</b>	<b>0.95</b>	
Broccoli		1.05	0.95	0.3
Brussel Sprouts		1.05	0.95	0.4
Cabbage		1.05	0.95	0.4
Carrots		1.05	0.95	0.3
Cauliflower		1.05	0.95	0.4
Celery		1.05	1.00	0.6
Garlic		1.00	0.70	0.3
Lettuce		1.00	0.95	0.3
Onions				
- dry		1.05	0.75	0.4
- green		1.00	1.00	0.3
- seed		1.05	0.80	0.5
Spinach		1.00	0.95	0.3
Radish		0.90	0.85	0.3
<b>b. Vegetables - Solanum Family (<i>Solanaceae</i>)</b>	<b>0.6</b>	<b>1.15</b>	<b>0.80</b>	
Egg Plant		1.05	0.90	0.8
Sweet Peppers (bell)		1.05 <sup>2</sup>	0.90	0.7
Tomato		1.15 <sup>2</sup>	0.70-0.90	0.6
<b>c. Vegetables - Cucumber Family (<i>Cucurbitaceae</i>)</b>	<b>0.5</b>	<b>1.00</b>	<b>0.80</b>	



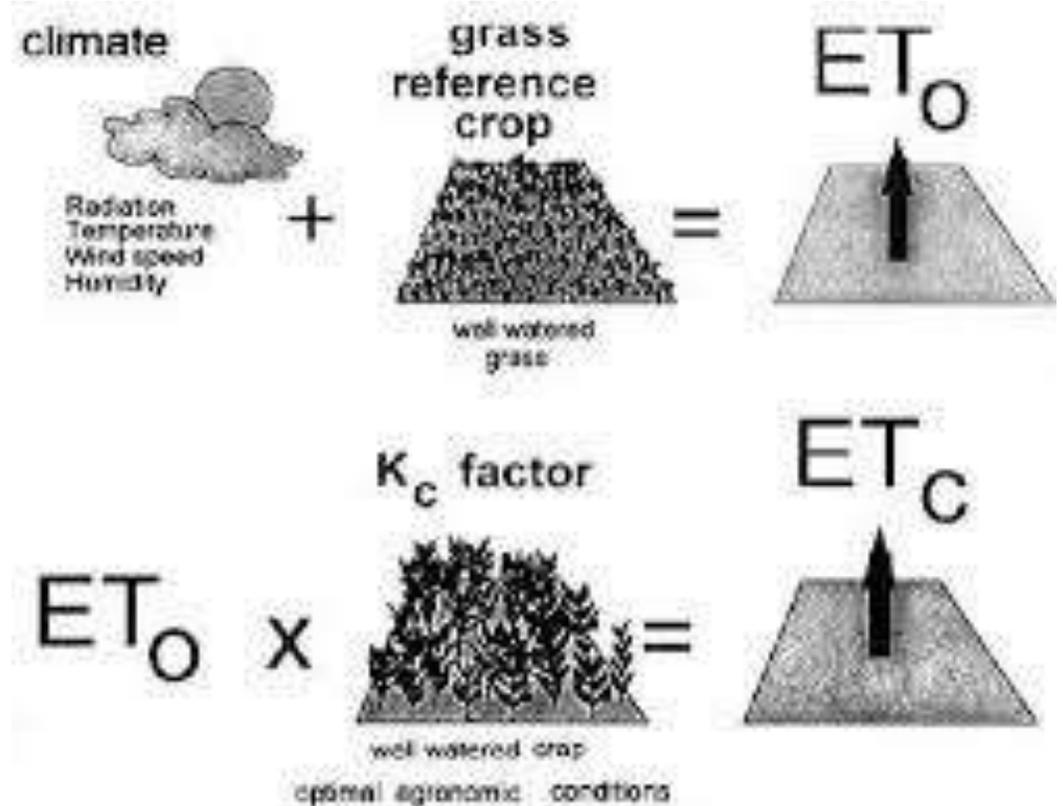
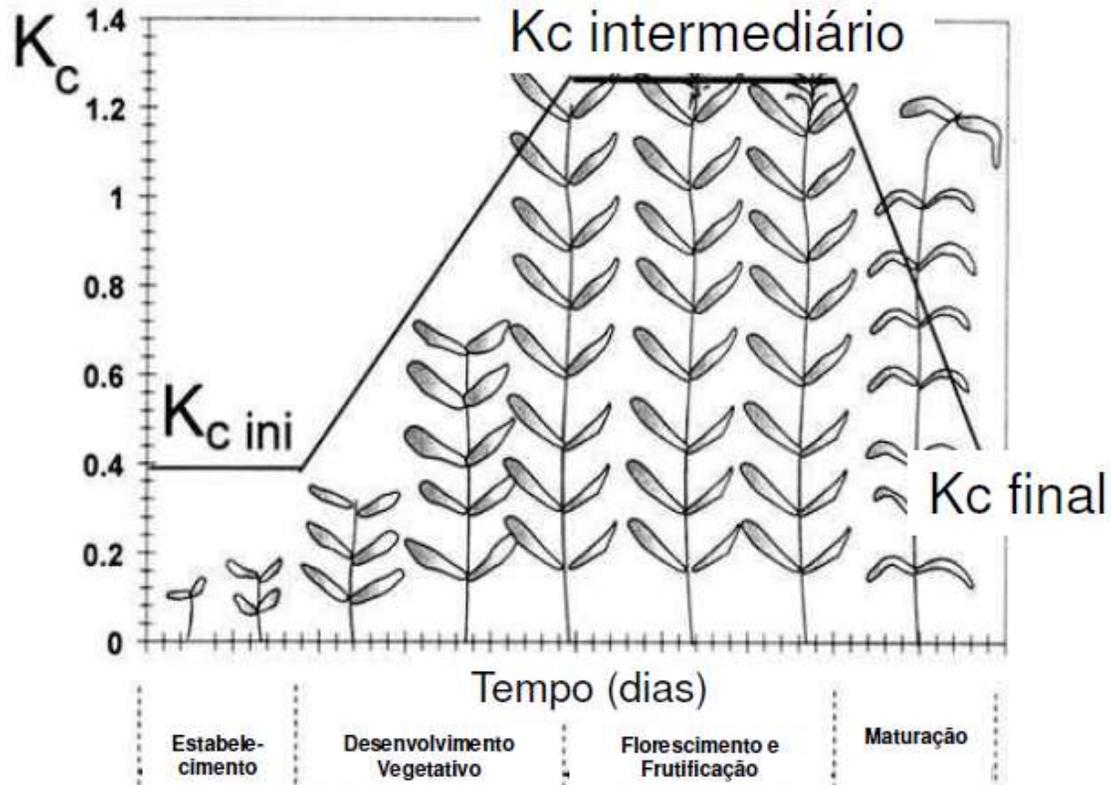
# Evapotranspiração de Oasis



# Coeficiente de Cultivo

<b>Cultura</b>	<b>Kc Inicial</b>	<b>Kc Interm.</b>	<b>Kc Final</b>
Cevada	0.30	1.15	0.25
grão de bico	0.40	1.00	0.35
algodão	0.35	1.15-1.20	0.70-0.50
Milho	0.30	1.20	0.35
Amendoim	0.40	1.15	0.60
Sorgo	0.30	1.00-1.10	0.55
Amendoim	0.40	1.15	0.50
Girassol	0.35	1.15	0.35
Trigo	0.30	1.15	0.25

# Resumo

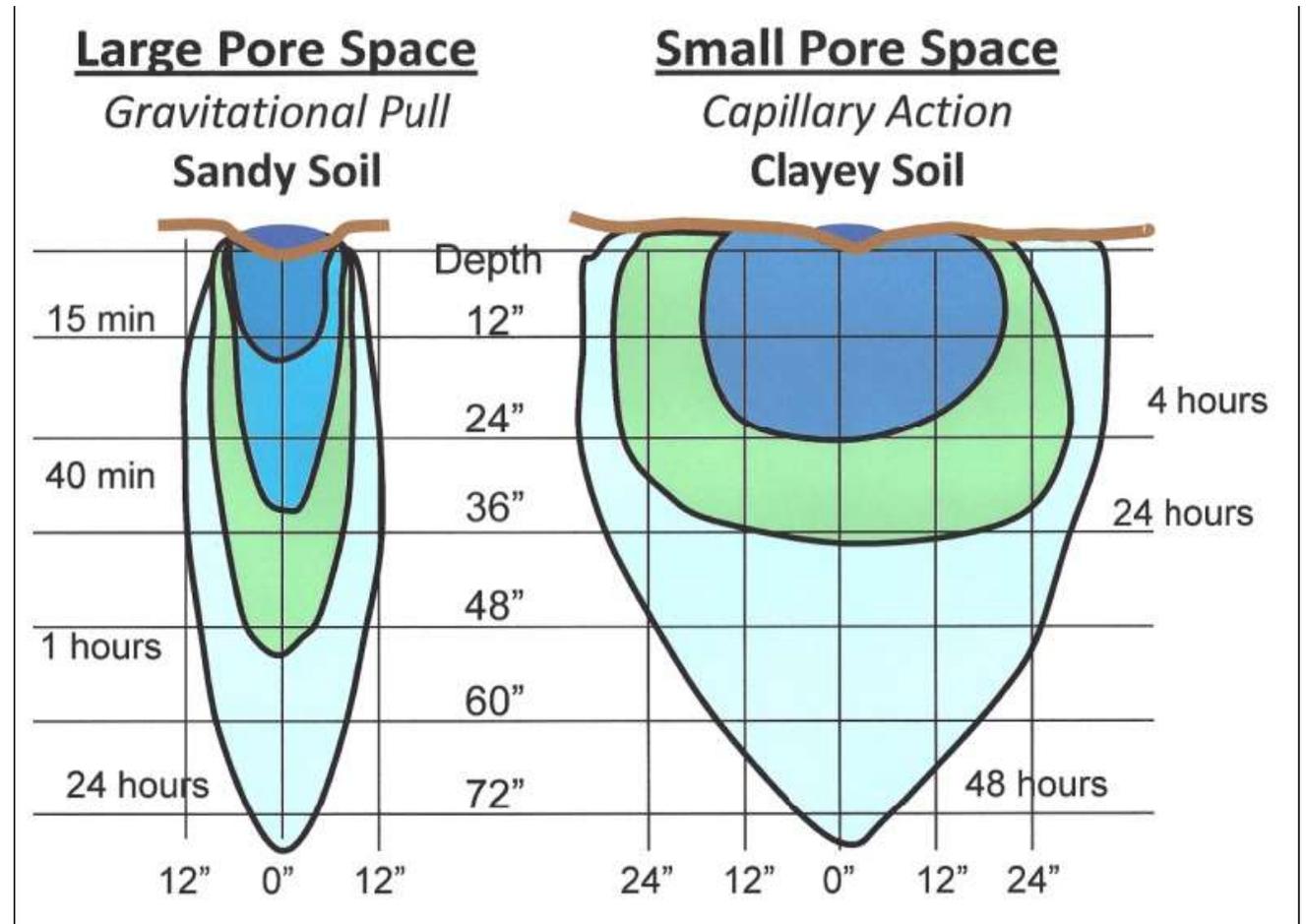


# Fatores Determinantes da evapotranspiração

- Climáticos
  - Saldo de Radiação
  - Temperatura
  - Umidade do Ar
  - Vento
- Planta
  - Espécie
  - Coeficiente de Reflexão
  - Estádio de Desenvolvimento
  - Altura da Planta
  - Prof. Sistema Radicular

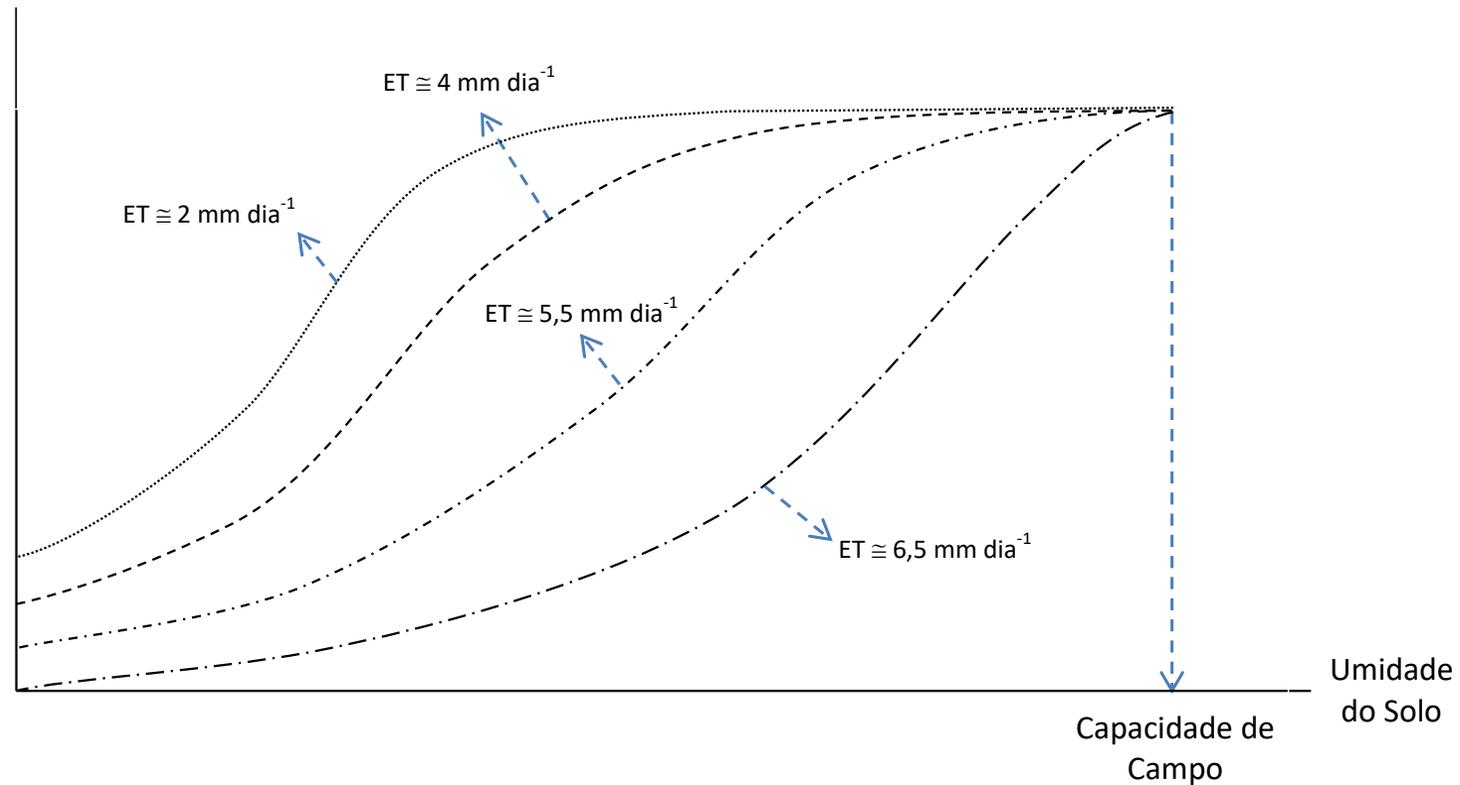
## Fatores Determinantes

- Manejo e Solo
- Espaçamento e Densidade de Plantio
- Orientação do Plantio
- Capacidade de Armazenamento do Solo
- Impedimento Físicos/Químicos

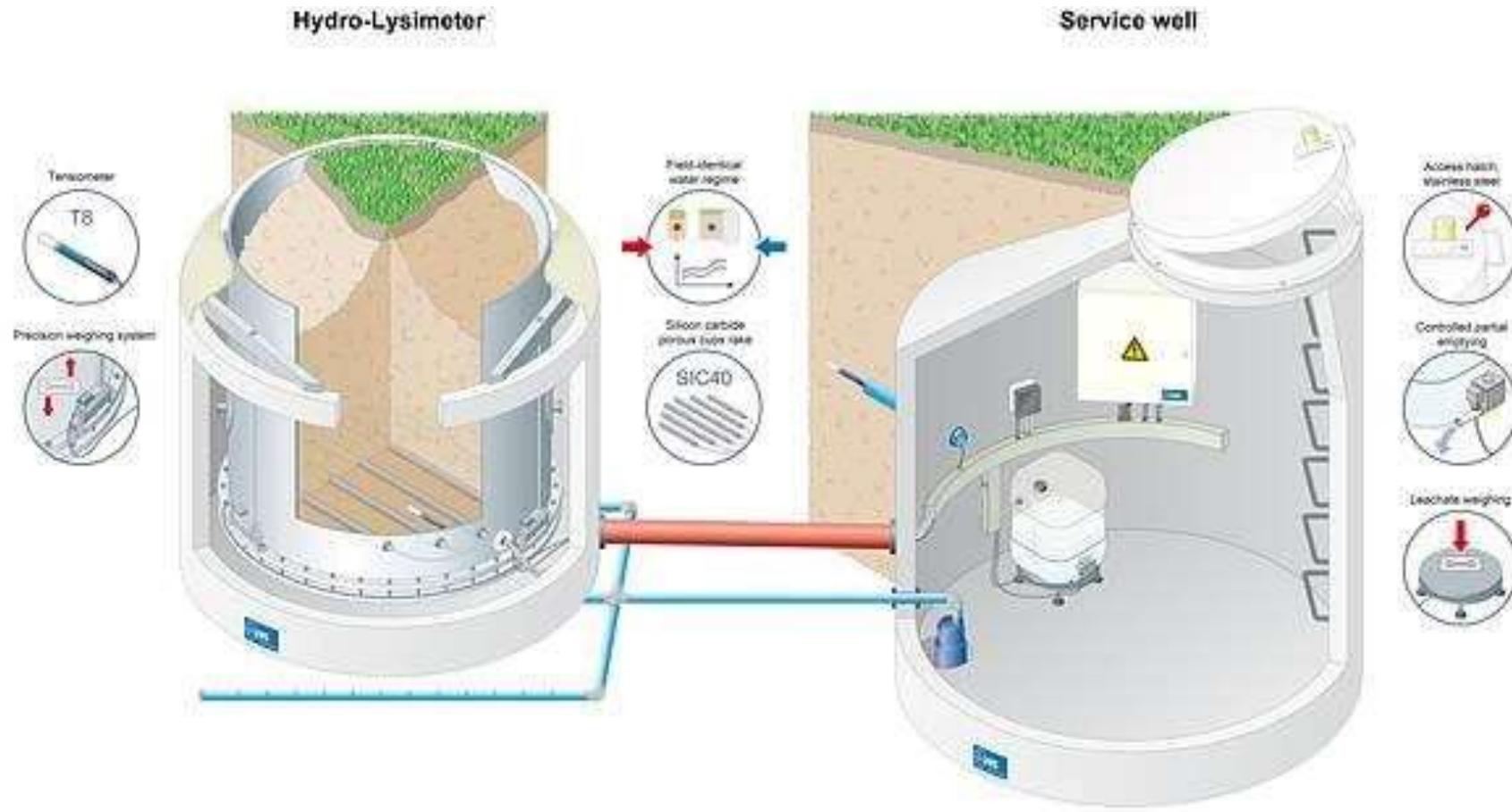


# Inter-relação Demanda Atmosférica – Suprimento de Água no Solo

Evapotranspiração  
real (ET<sub>r</sub>)



# Medida da Evapo(transpi)ração - Lisímetros



# Medida da evapo(transpi)ração - Micrometeorologia



Medida da ETc com o Sistema de Razão de Bowen em Citros



Medida da ETc com o Sistema de Razão de Bowen em Cafezal



Medida da ET com o Sistema da Correlação de Turbilhões em Floresta

# Estimativa de ETo

## Método de Penman-Monteith



em que SR é o saldo de radiação ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), G é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ); DPV é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa);  $\Delta$  é a tangente à curva de pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ); T é a temperatura média diária ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $u_2$  é a velocidade do vento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) medida a 2m da superfície do solo.  $E\text{T}_o$  é dado em  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$

$$E\text{T}_o = \frac{0,408 \cdot s \cdot (SR - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot DPV}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

## Estimativa de $E_{To}$

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$$

→ Z é a altitude em metros, P é a pressão atmosférica em kPa

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P$$

→ P é a pressão atmosférica em kPa;  $\gamma$  é a constante psicrométrica kPa/°C

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp \left( \frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2}$$

→  $\Delta$  é a tangente à curva de saturação de vapor [kPa °C<sup>-1</sup>], e T é a temperatura do ar [°C],

## Método de Penman-Monteith

Data	10/11/2020			Data	10/02/2021		
r (albedo)	0.21			r (albedo)	0.23		
Tmax	32.9	oC		Tmax	29.7	oC	
Tmin	21.3	oC		Tmin	18.5	oC	
V. vento (	0.68	m/s		V. vento	1.26	m/s	
F Calor So	0.32	MJ/m <sup>2</sup> .d		F Calor So	0.56	MJ/m <sup>2</sup> .d	

# Tarefa 1

Calcule a ETo com o método de Penman-Monteith para os dois dias acima descritos:

# Estimativa de ETo (método aproximado)

## Método de Camargo com temperatura efetiva (Tef)

$$ETo = 0,01 * Qo * Tef * ND / 2,45$$

Qo é a Radiação Solar Extra-Terrestre (MJ/m<sup>2</sup>.d); Tef é a Temperatura efetiva do ar em °C; Tef = 0,36\*(3\*Tmax-Tmin); ND é o Número de dias do período considerado

# Estimativa de ETo - Método do Tanque Classe A

$$E_{To} = K_p * E_{CA}$$



TABELA 12.4 Coeficiente para Tanque Classe A (Kp), para diferentes bordaduras de vegetação baixa ao redor do tanque, e níveis de umidade relativa e velocidade do vento em 24 horas. Fonte: Doorenbos & Kassam (1994).

Vento (km/dia)	Bordadura (m)	Umidade Relativa do Ar		
		< 40%	40% a 70%	> 70%
Leve < 175	1	0,55	0,65	0,75
	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,70	0,80	0,85
	1000	0,75	0,85	0,85
Moderado 175 a 425	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,60	0,70	0,75
	100	0,65	0,75	0,80
	1000	0,70	0,80	0,80
Forte 425 a 700	1	0,45	0,50	0,60
	10	0,55	0,60	0,65
	100	0,60	0,65	0,70
	1000	0,65	0,70	0,75
Muito Forte > 700	1	0,40	0,45	0,50
	10	0,45	0,55	0,60
	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,55	0,60	0,65

# Seleção do método de estimativa da ET<sub>o</sub>

- Disponibilidade de dados climáticos: somente será possível o uso de determinado método se houverem dados disponíveis para tal.
- Escala de tempo: deve-se considerar a escala de tempo a ser utilizada. Para escalas mensais, as equações empíricas apresentam resultados tão satisfatórios como as equações de base física.
- Condição climática do local: certos métodos somente se aplicam a certas condições climáticas, apresentando grandes distorções nos ambientes para os quais eles não foram desenvolvidos. Ex: o método de Thornthwaite subestima ETP em climas secos e H&S superestima ETP em climas úmidos.

## Tarefa 2

- Calcule a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), em Piracicaba, acumulada em cada decêndio, pelo método de Camargo com Temperatura Efetiva, entre novembro de 2014 e abril de 2015.
- A partir dos coeficientes de cultura para milho, determine a evapotranspiração da cultura, simulando uma semeadura em 15 de novembro (ciclo total de 120 dias para colheita). Qual foi a ET<sub>c</sub> acumulada? Consulte <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm#TopOfPage> para encontrar valores de K<sub>c</sub>.

Mês	Decêndio	Tmax	Tmin	Qo (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	ET <sub>o</sub>	k <sub>c</sub>	ET <sub>c</sub>
NOV	1	30,4	17,8	40,8			
NOV	2	32,8	18,4	41,6			
NOV	3	31,5	20,3	42,1			
DEZ	1	33,6	20,9	42,5			
DEZ	2	31,9	18,5	42,7			
DEZ	3	33,1	21,7	42,8			
JAN	1	35,7	21,2	42,6			
JAN	2	33,2	20,1	42,3			
JAN	3	34,3	20,4	41,8			
FEV	1	36,3	21,0	41,1			
FEV	2	31,5	20,0	40,1			
FEV	3	32,3	19,9	38,9			
MAR	1	31,7	19,5	37,4			
MAR	2	32,9	19,8	35,8			
MAR	3	30,7	18,3	34,0			
ABR	1	32,3	17,7	32,1			
ABR	2	29,8	18,2	30,2			
ABR	3	26,4	15,0	28,3			

# Leitura

Obrigatória:

Pereira, Angelocci, Sentelhas. Meteorologia Agrícola. Apostila. ESALQ. 2007. Cap 12.

Disponível em [http://www.ler.esalq.usp.br/aulas/lce306/MeteorAgricola\\_Apostila2007.pdf](http://www.ler.esalq.usp.br/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf)

