

UC Necessidades Hídricas e Sistemas de Rega / 1º ciclo de Eng. Agronómica
M.ª Rosário Cameira / Instituto Superior de Agronomia



**INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA**
Universidade de Lisboa

Departamento de Ciências e
Engenharia de Biosistemas



UC Necessidades hídricas e sistemas de rega

Aula 1

1. A Importância da rega em Portugal
2. Necessidades hídricas das culturas







UC Necessidades Hídricas e Sistemas de Rega / 1º ciclo de Eng. Agronómica
M.ª Rosário Cameira / Instituto Superior de Agronomia

1. A IMPORTÂNCIA DA REGA EM PORTUGAL

- 1.1 Porque é necessário regar em Portugal;
- 1.2 Evolução da área regada em Portugal;
- 1.3 Distribuição da área regada em Portugal;
- 1.4 Consumo de água na agricultura

Secção de Eng^a Rural

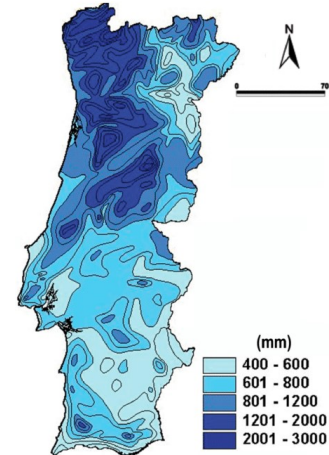
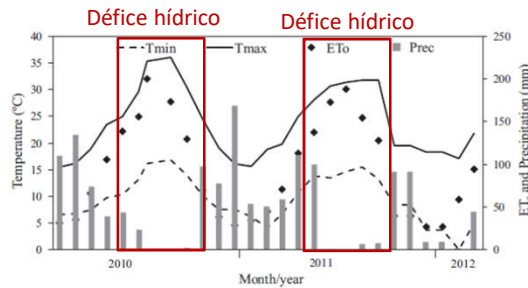
2

1. A IMPORTÂNCIA DA REGA EM PORTUGAL

1.1 PORQUE É NECESSÁRIO REGAR EM PORTUGAL

- Portugal tem precipitação média anual da ordem dos 700 mm;
- a distribuição *irregular no espaço* gera problemas de escassez de água em determinados periodos do ano em particular no sul e interior centro e norte.
- a distribuição *irregular no tempo* gera problemas de escassez de água no período de abril a setembro

ETo e precipitação: exemplo Beja



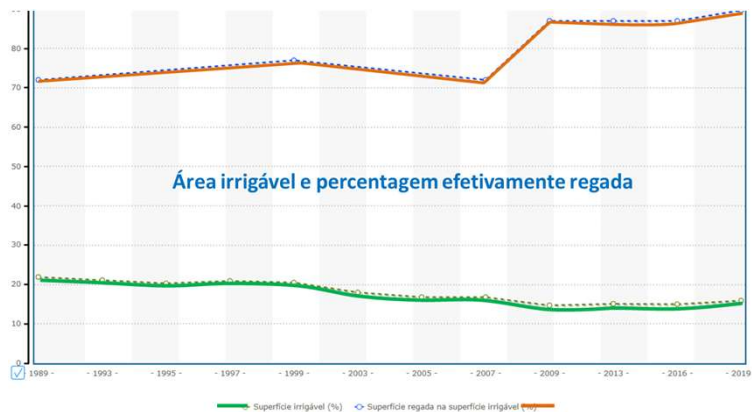
- o regadio surge como uma componente fundamental para a agricultura, sem o qual não é possível um conveniente desenvolvimento vegetativo das *culturas de primavera-verão*

1.2 EVOLUÇÃO DA ÁREA REGADA EM PORTUGAL

Percentagem da SAU que é irrigável e regada



<https://www.pordata.pt>

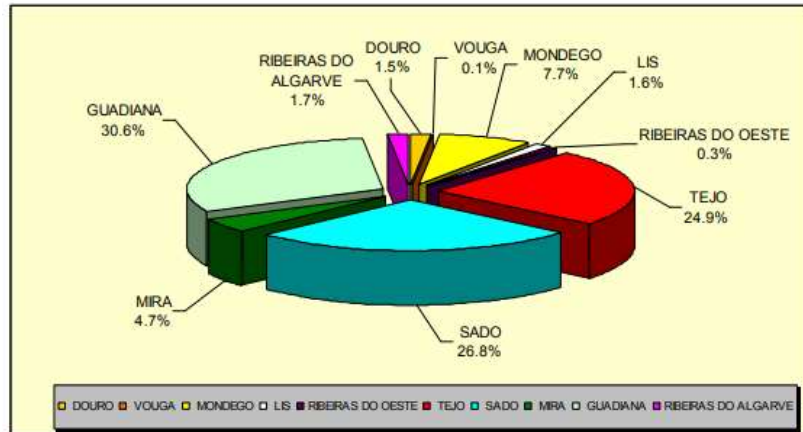


•**SUPERFÍCIE IRRIGÁVEL:** Superfície máxima da exploração que no decurso do ano agrícola, poderia, se necessário, ser regada por meio de instalações técnicas próprias da exploração e por uma quantidade de água normalmente disponível.

•**SUPERFÍCIE REGADA:** Superfície agrícola da exploração ocupada por culturas temporárias principais, culturas permanentes e prados e pastagens permanentes que foram regadas pelo menos uma vez no ano agrícola.

1.3 DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA REGADA EM PORTUGAL

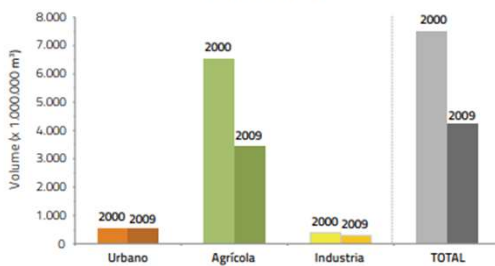
Área regada por bacia hidrográfica



Secção de Engº Rural

1.4 CONSUMO DE ÁGUA NA AGRICULTURA

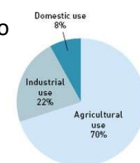
PROCURA nacional de água por setor 2000 e 2009



Fonte: PNA 2002 e PNA 2010 (versão preliminar)

- A adoção crescente de métodos de rega mais eficientes, a par da redução da área regada, contribuiu para a diminuição do uso da água pelo setor, que se situa em aproximadamente em 3,5 mil milhões de m³ em 2009.

No mundo



Em Portugal (PNA 2015)



O setor agrícola, não é apenas consumidor de água. Para além de produzir alimentos, tem um papel fundamental no ciclo da água, nomeadamente através da alteração do regime fluvial e da recarga dos sistemas aquíferos, e um contributo importantíssimo para os serviços dos ecossistemas.

2. NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS

- 2.1 Conceitos;
- 2.2 Obtenção da evapotranspiração de uma superfície cultivada;
- 2.3 O método dos coeficientes culturais; Coeficiente cultural simples
- 2.4 Evapotranspiração cultural para condições padrão
 - 2.4.1 Fatores que determinam o coeficiente cultural
 - 2.4.2 Variação do coeficiente cultural simples com as fases fenológicas
 - Correção do Kc ini de acordo com o padrão de humedecimento do solo
 - Correção do Kc mid de acordo com o clima
 - Correção do Kc mid de acordo com a data de colheita e o clima
 - 2.4.3 Curva do Kc simples

2. NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS

2.1 CONCEITOS

$$\text{Necessidades hídricas} = \text{Evapotranspiração} = \text{Evaporação} + \text{Transpiração} = ET$$

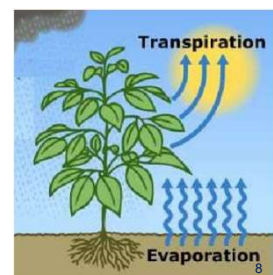
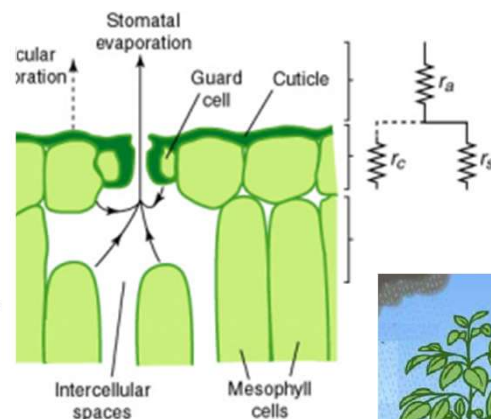
Evaporação (E): processo físico, em que a água passa do estado líquido para o estado gasoso

A evaporação pode ocorrer a partir de superfícies livres de água (lagos, rios) ou superfícies molhadas (solo, plantas) e todos os obstáculos que interceptam água

Transpiração (T): perda de água na forma de vapor pelas plantas (e animais)

É um processo com base física mas também fisiológica, já que é controlada pela abertura dos estomas

Evapotranspiração de um coberto vegetal (ET): transpiração das plantas + evaporação do solo



□ **Evapotranspiração de referência, ET_0** (Allen et al., 1998):

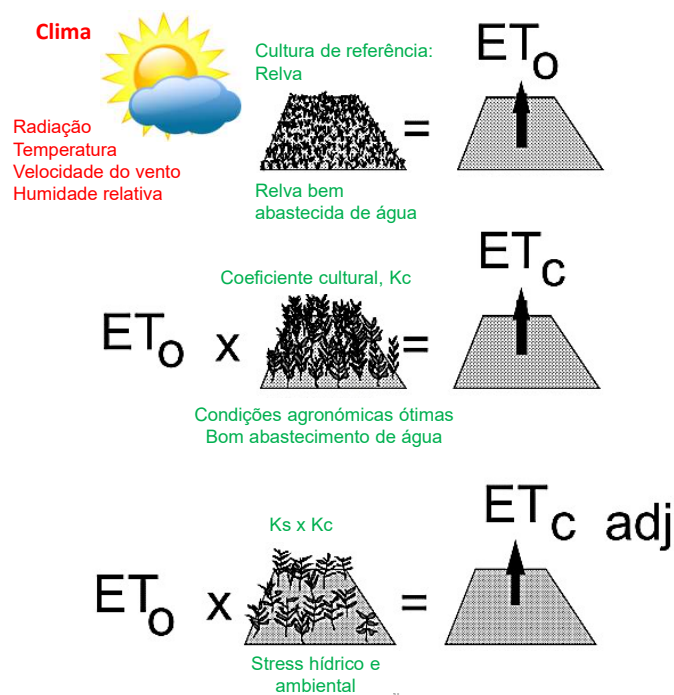
taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, para a qual se assume uma **altura de 0.12 m, uma resistência de superfície constante de 70 s m^{-1} e um albedo de 0.23**, semelhante à evapotranspiração de um extenso **coberto de relva verde de altura uniforme, em crescimento activo,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

□ **Evapotranspiração cultural em condições padrão, ET_c** (Allen et al., 1998):

taxa de evapotranspiração de culturas sem doenças, bem fertilizadas, cultivadas em grandes campos, com condições ideais de água do solo, e alcançando a plena produção para o clima em questão.

□ **Evapotranspiração em condições não padrão, $ET_c \text{ adj}$** (Allen et al., 1998):

taxa de evapotranspiração das culturas cultivadas em condições de gestão e ambientais que diferem das condições padrão. (ex. presença de pragas e de doenças, salinidade do solo, baixa fertilidade do solo, escassez ou excesso de água, densidade deficiente).



❑ Quais as condições necessárias para haver **evaporação de água**:

- Superfície húmida
 - plantas, solo
- Energia (calor latente de evaporação)
 - R_n (*radiação líquida*)
 - Varia com a latitude*
 - Estação do ano*
 - Hora do dia*
 - Nebulosidade*
- Remoção do vapor de água
 - gradiente de humidade
 - $\frac{e_s \text{ superfície} - (e_s - e_a)_{ar}}{L}$
 - transporte (difusão / convecção)
 - r_a e r_s (*resistências à passagem do vapor de água*)
 - velocidade do vento

❑ Determinação da evapotranspiração de referência ET_o

a) Equação FAO/ Penman-Monteith

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

← Apenas para a cultura de referência:
Relva bem abastecida de água cobrindo todo o solo

↑
Inclui as diversas resistências que caracterizam esta situação

ET_o reference evapotranspiration [mm day^{-1}],
 R_n net radiation at the crop surface [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$],
 G soil heat flux density [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$],
 T mean daily air temperature at 2 m height [$^{\circ}\text{C}$],
 u_2 wind speed at 2 m height [m s^{-1}],
 e_s saturation vapour pressure [kPa],
 e_a actual vapour pressure [kPa],
 $e_s - e_a$ saturation vapour pressure deficit [kPa],
 Δ slope vapour pressure curve [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$],
 γ psychrometric constant [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Cálculo da evapotranspiração de referência diária com o método FAO Penman-Monteith

Altura da medição do vento, z_m =	2.50 m								
Latitude =	38.05 °								
Latitude (radianos) =	0.66 rad								
Altitude, z =	74.00 m								
Dia Juliano inicial	120.00								

Data =	01/05/2003	02/05/2003	03/05/2003	04/05/2003	05/05/2003	06/05/2003	07/05/2003	08/05/2003	09/05/2003
T_{max} (°C)	24.60	24.30	29.30	24.40	20.10	20.90	22.70	26.40	29.50
T_{min} (°C)	8.90	6.70	4.90	10.60	9.50	7.80	6.30	10.10	7.40
H_{max} (%)	96.10	96.90	99.20	94.10	94.30	89.40	93.10	89.80	97.00
H_{min} (%)	27.40	32.20	31.40	36.10	44.30	32.80	34.30	31.60	27.80
Vento, U_{2m} (m/s)	0.90	1.20	0.90	0.80	1.90	2.80	1.40	0.90	0.90
Radiação global, R_g (MJm ⁻² d ⁻¹)	21.90	23.80	26.10	12.10	12.20	18.00	20.30	24.20	25.40

Dia após início	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dia Juliano	121	122	123	124	125	126	127	128	129
T_{mean}	16.75	15.50	17.10	17.50	14.80	14.35	14.50	18.25	18.45

Declive da curva de pressão de vapor, Δ (kPa °C ⁻¹) =	0.121	0.113	0.124	0.126	0.109	0.106	0.107	0.132	0.133
Pressão atmosférica, P (kPa) =	100.428	100.428	100.428	100.428	100.428	100.428	100.428	100.428	100.428
Constante psicrométrica, γ (kPa °C ⁻¹) =	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067
Pressão de saturação de vapor, $e_s(T_{max})$ (kPa) =	3.094	3.039	4.077	3.057	2.354	2.473	2.760	3.443	4.124
Pressão de saturação de vapor, $e_s(T_{min})$ (kPa) =	1.141	0.982	0.867	1.279	1.188	1.059	0.955	1.237	1.030
Pressão de saturação de vapor para 24 h, e_a (kPa) =	2.117	2.010	2.472	2.168	1.771	1.766	1.857	2.340	2.577
Pressão de vapor real, e_a (kPa) =	0.972	0.960	1.070	1.153	1.081	0.879	0.918	1.099	1.073
Velocidade média do vento a 2m de altura, U_2 (m s ⁻¹) =	0.859	1.146	0.859	0.764	1.814	2.674	1.337	0.859	0.859
Inclinação solar, δ (rad) =	0.261	0.266	0.271	0.277	0.282	0.287	0.292	0.297	0.301
Distância relativa Terra-Sol, d_r =	0.984	0.983	0.983	0.982	0.982	0.981	0.981	0.981	0.980
Auxiliar para ângulo solar, X =	0.956	0.954	0.953	0.951	0.949	0.947	0.945	0.943	0.941
Ângulo solar ao pôr do sol, ω_s (rad) =	1.781	1.786	1.790	1.795	1.799	1.804	1.808	1.812	1.817
Radiação no topo da atmosfera, R_a (MJ m ⁻² dia ⁻¹) =	37.996	38.148	38.297	38.443	38.587	38.727	38.864	38.998	39.129
Rad. solar de curto comp. onda para céu limpo, R_{so} (MJ m ⁻² dia ⁻¹) =	28.553	28.667	28.780	28.889	28.997	29.102	29.206	29.306	29.405
Auxiliar para radiação líquida de l.c.o =	34.690	34.135	35.073	35.015	33.685	33.511	33.640	35.424	35.660
Emissividade líquida da superfície, e' =	0.202	0.203	0.195	0.190	0.194	0.209	0.206	0.193	0.195
Fator de nebulosidade, f =	0.685	0.771	0.874	0.215	0.218	0.485	0.588	0.765	0.816
Radiação líquida de longo comp. onda, R_{el} (MJ m ⁻² dia ⁻¹) =	4.802	5.336	5.985	1.431	1.428	3.393	4.075	5.235	5.675
Densidade de fluxo de calor do solo, G (MJ m ⁻² dia ⁻¹) =	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Radiação líquida, R_n (MJ m ⁻² dia ⁻¹) =	12.061	12.990	14.112	7.886	7.966	10.467	11.556	13.399	13.883
Numerador para ET_o =	0.800	0.850	0.961	0.567	0.614	0.948	0.766	0.940	1.020
Denominador para ET_o =	0.207	0.206	0.210	0.210	0.217	0.233	0.204	0.218	0.219
ET_o (mm/dia) =	3.858	4.128	4.579	2.693	2.836	4.063	3.756	4.311	4.651

13

☐ Determinação da evapotranspiração de referência ET_o

b) Equação de Hargreaves - Samani

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

ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹)

T – temperaturas mensais (°C)

R_a – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m⁻² d⁻¹)

λ – calor latente de vaporização (MJ kg⁻¹)

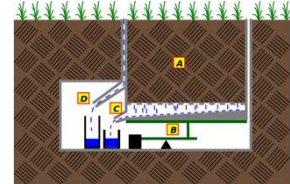
KR_s – coeficiente de ajustamento da radiação

- 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), $KR_s = 0.16$;
- para zonas "costeiras", situadas na ou perto da costa, $KR_s = 0.19$;
- em termos médios, utiliza-se $KR_s = 0.17$

2.2 OBTENÇÃO DA TAXA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE CULTIVADA

☐ Métodos de medição

- balanço de energia (razão de Bowen);
- método das flutuações instantâneas;
- balanço da água do solo determinado em campos cultivados ou lisímetros;
- lisímetros de pesagem



☐ Métodos de estimação

- Equação de Penman-Monteith

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

energia
gradiente de humidade
transporte do vapor de água

Há que obter valores para o *albedo* e as *resistências aerodinâmica e de superfície* às características da cultura específica (muito difícil).

Secção de Eng^o Rural

O *albedo* e as *resistências* (sobretudo a *resistência de superfície*) são difíceis de estimar porque variam continuamente durante a estação de crescimento, com as condições climáticas, com o desenvolvimento da cultura, e com a humidade da superfície do solo.

Havendo falta de informações consolidadas sobre as resistências aerodinâmicas e do copado para as diversas superfícies cultivadas, o método FAO Penman-Monteith é usado apenas para estimar ETo



- A FAO recomenda o uso do **método dos coeficientes culturais** para calcular a evapotranspiração cultural, ETC

Secção de Eng^o Rural

16

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

- ET_c evapotranspiração cultural [mm d^{-1}],
- Coeficiente cultural K_c [adimensional],
- ET_o evapotranspiração de referência [mm d^{-1}].

Secção de Eng^o Rural

2.3 MÉTODO DOS COEFICIENTES CULTURAIS

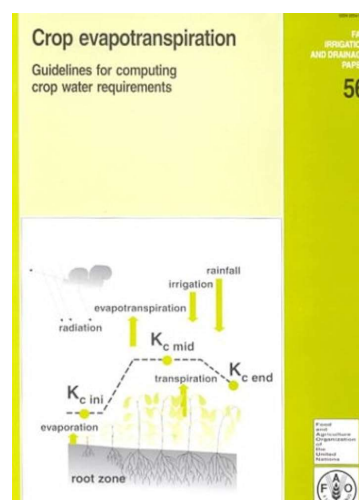
Fase	Mês	Dia	ET_o (mm dia^{-1})	K_c	ET_c (mm dia^{-1})
Sementeira	5	26	3.05	0.3	0.91
	5	27	2.76	0.3	0.83
	5	28	3.52	0.3	1.06
	5	29	3.97	0.3	1.19
	5	30	5.28	0.3	1.58
	5	31	5.57	0.3	1.67
	6	1	5.58	0.3	1.67
	6	2	5.67	0.3	1.70
	6	3	5.18	0.3	1.55
	6	4	5.58	0.3	1.67
	6	5	5.71	0.3	1.71
	6	6	5.27	0.3	1.58
	6	7	6.51	0.3	1.95
	6	8	5.09	0.3	1.53
	6	9	5.56	0.3	1.67
	6	10	6.01	0.3	1.80
	6	11	6.45	0.32	2.08
	6	12	6.06	0.35	2.09
	6	13	5.94	0.37	2.18
	6	14	5.53	0.39	2.16
	6	15	6.40	0.41	2.64
	6	16	6.30	0.44	2.74
	6	17	7.52	0.46	3.44
	6	18	6.33	0.48	3.04
	6	19	7.14	0.50	3.59
	6	20	6.42	0.53	3.37
	6	21	3.81	0.55	2.08
	6	22	5.92	0.57	3.37
6	23	6.11	0.59	3.62	
6	24	4.39	0.62	2.70	
6	25	3.53	0.64	2.25	
6	26	4.11	0.66	2.71	
6	27	4.33	0.68	2.96	
6	28	4.73	0.71	3.33	

17

- O coeficiente cultural K_c **varia predominantemente com as características específicas da cultura e em extensão limitada com o clima;**
- Tal facto possibilita a transferência de **valores padrão** de K_c entre locais e entre climas;
- Esta tem sido a razão para a aceitação do método dos coeficientes culturais

As **condições padrão** referem-se a:

- culturas cultivadas em grandes áreas e
- com excelentes condições agrónomicas (densidade, fertilização, ausência de pragas e doenças ...) e de água do solo;

Secção de Eng^o Rural

18

As diferenças na Evapotranspiração (evaporação + transpiração) entre as culturas e a superfície de relva de referência (ET_o) podem ser integradas:

- a) num único coeficiente, o coeficiente cultural simples (K_c) ou
- b) separadas em dois coeficientes: um cultural basal (K_{cb}) e um coeficiente de evaporação do solo (K_e),

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

A aproximação a seguir deve ser seleccionada em função do objectivo do cálculo, da precisão exigida, dos dados disponíveis e o passo de tempo

Critérios para a escolha do método a) ou b)

método	Coeficiente cultural simples K _c	Coeficiente cultural dual K _{cb} + K _e
Objetivo do cálculo	- Programação e projeto da rega; - Condução da rega em tempo real para aplicações não frequentes de água (rega de superfície e por aspersão); - Esquemas de rega simples.	- Investigação; - Condução da rega de alta frequência; - Culturas esparsas (ex. pomares); - Rega de suplemento; - Estudos detalhados de balanço hídrico.
Passo de tempo	Diário, decendial, mensal	Diário

19

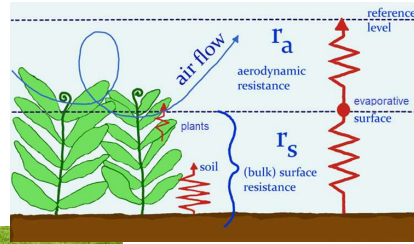
2.4 MÉTODO DO COEFICIENTE CULTURAL SIMPLES PARA O CÁLCULO EVAPOTRANSPIRAÇÃO CULTURAL EM CONDIÇÕES PADRÃO (ET_c)

- Porque é que a ET_o não nos fornece a evapotranspiração cultural?
- Em que difere a evapotranspiração cultural (ET_c) da evapotranspiração de referência (ET_o)?
- De um modo geral podemos dizer que é devido às diferenças entre a cultura que estamos a estudar e a relva que é a cultura de referência usada para o cálculo da ET_o

Em particular essas diferenças manifestam-se:

- na altura da cultura (1)
 - no grau de cobertura do solo (2)
 - na estrutura das plantas e do copado (3)

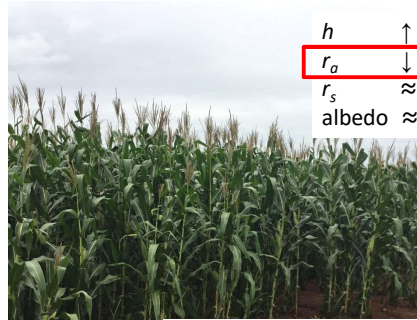
(1) **Altura da cultura:**
influencia o termo de resistência aerodinâmica, r_a , da equação de Penman-Monteith e portanto a transferência de vapor da cultura para a atmosfera.



$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$



Cultura de referência: $h = 12 \text{ cm}$
 $r_s = 70 \text{ s/m}$
albedo = 0.23



r_a tanto mais pequeno quanto maior

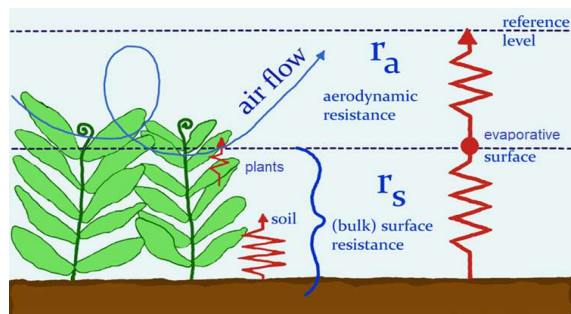
- a altura da cultura
- a velocidade do vento

Secção de Engª Rural

(2) **Grau de cobertura do solo:**
Influencia o albedo (reflexão) da superfície cultura-solo (também é influenciado pela humidade superficial do solo)

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

A humidade da superfície do solo e a fração de solo coberto por vegetação influenciam também a resistência de superfície r_s .



Secção de Engª Rural

Porque o albedo (α) é tão importante e deve ser obtido para cada situação?

- É a razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela.
- É adimensional, sendo medido numa escala que vai de zero, para nenhuma reflexão (superfície perfeitamente negra) até 1, para uma reflexão perfeita por uma (superfície branca).

albedo (α) da
superfície cultura-solo

$$R_n = R_{ns} + R_{nl}$$

radiação líquida da superfície, R_n ,
principal fonte de energia para o
processo de evaporação.

$$R_{ns} = R_{solar} - \alpha R_{solar}$$

Tipo de coberto	albedo
Solo seco e claro	0.40
Solo escuro e húmido	0.05
Culturas agrícolas	0.18 – 0.25
Florestas	
folha caduca	0.15 – 0.20
coníferas	0.05 – 0.15

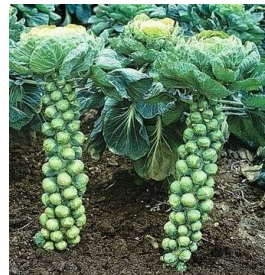


de Engº Rural

23

(3) Estrutura das plantas e do coberto

A área da folha (número de estomas) e a idade influenciam a resistência de superfície à transferência do vapor, r_s , e a resistência aerodinâmica, r_a ;



24

2.4.1 Fatores que determinam o coeficiente cultural

O K_c é um coeficiente empírico que integra os efeitos atrás descritos

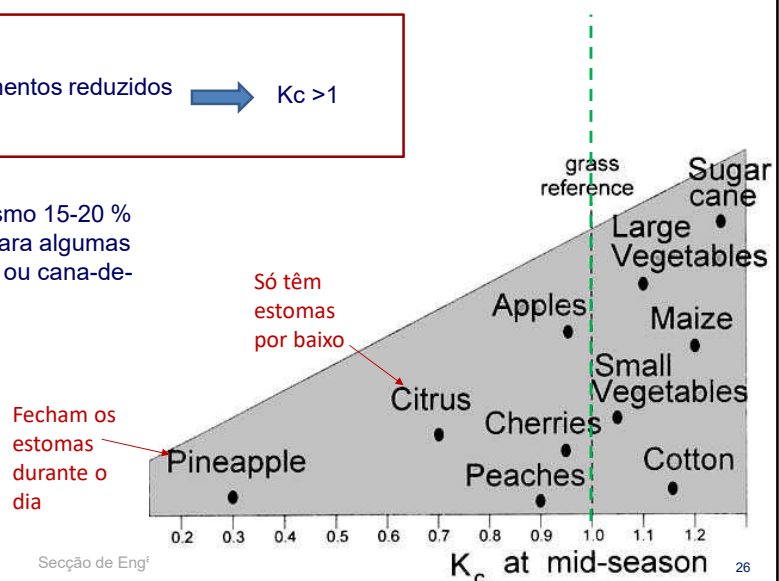
- Cultura;
- Evaporação do solo;
- Estado de desenvolvimento da cultura.

a) Tipo de cultura

Devido às diferenças no albedo, nas propriedades aerodinâmicas e nas propriedades das folhas e do estomas

Exemplos:
Culturas com espaçamentos reduzidos → $K_c > 1$
Culturas mais altas

K_c é muitas vezes 5-10% ou mesmo 15-20 % superior à referência ($K_c = 1,0$) para algumas culturas altas, como milho, sorgo ou cana-de-açúcar.



b) Evaporação do solo

Culturas de cobertura total; K_c reflete principalmente diferenças na transpiração, uma vez que a contribuição da evaporação do solo é pequena.

Culturas de baixa cobertura:

- Depois da chuva ou rega, o efeito da evaporação é predominante sobre o da transpiração. Nesta situação, o K_c é determinado em grande parte pela frequência com que a superfície do solo é humedecida.
- Quando o solo está molhado durante a maior parte do tempo a evaporação da superfície do solo é considerável e o K_c pode ser superior a 1
- Quando a superfície do solo está seca, a evaporação é restrita e K_c será muito pequeno, podendo atingir o valor 0.1.

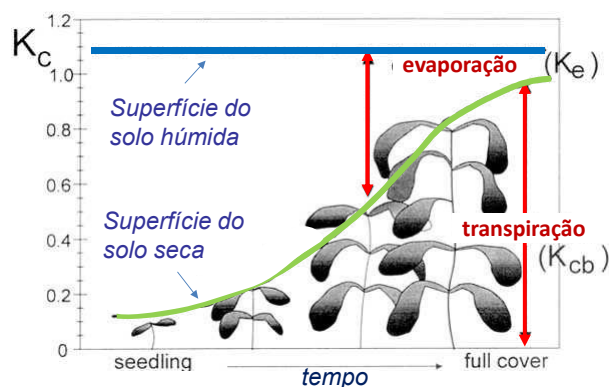
No caso de culturas de baixa cobertura, as diferenças de evaporação do solo entre a cultura em estudo e a de referência podem ser consideradas com maior precisão usando o método do coeficiente cultural dual.

Seção de Eng.º Rural

27

O efeito da evaporação do solo no K_c :

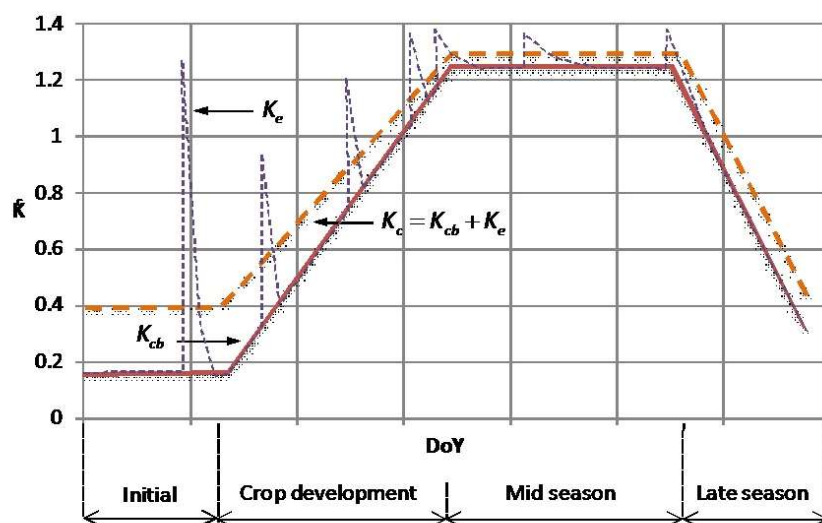
- solo descoberto vs solo coberto
- solo seco vs solo húmido



Linha horizontal - K_c quando a superfície do solo é mantida continuamente molhada;

Linha curva - K_c quando a superfície do solo é mantida seca, mas a cultura recebe água suficiente para sustentar a transpiração completa

Seção de Eng.º Rural

Secção de Eng^a Rural

29/48

c) Estádio de desenvolvimento da cultura

o K_c para uma determinada cultura varia ao longo do período de crescimento.

Porquê?

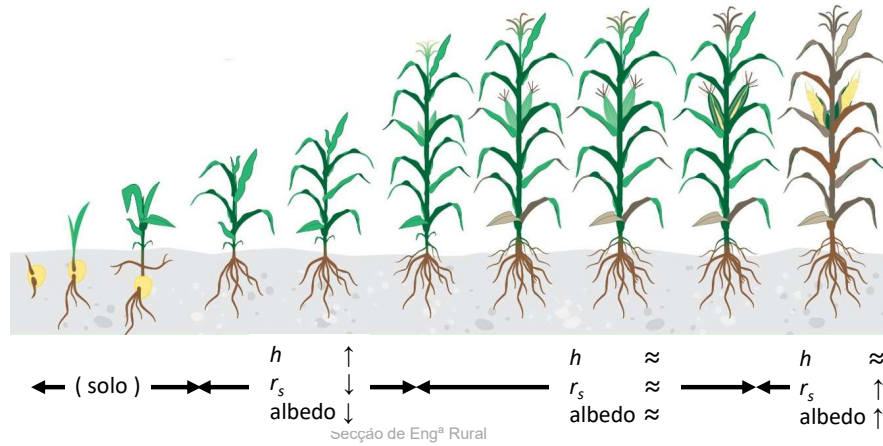
- O aumento da capacidade de transpiração depende do aumento da superfície estomática e, portanto, do desenvolvimento da área foliar;
- O aumento do grau de cobertura do solo implica diminuição da evaporação;

O período de crescimento duma cultura anual pode ser dividido em quatro fases de crescimento distintas:

- inicial,
- desenvolvimento da cultura,
- intermédio e
- final.

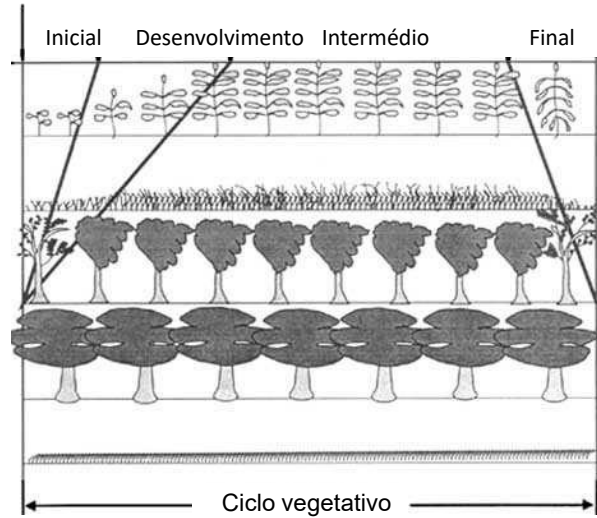
Secção de Eng^a Rural

30



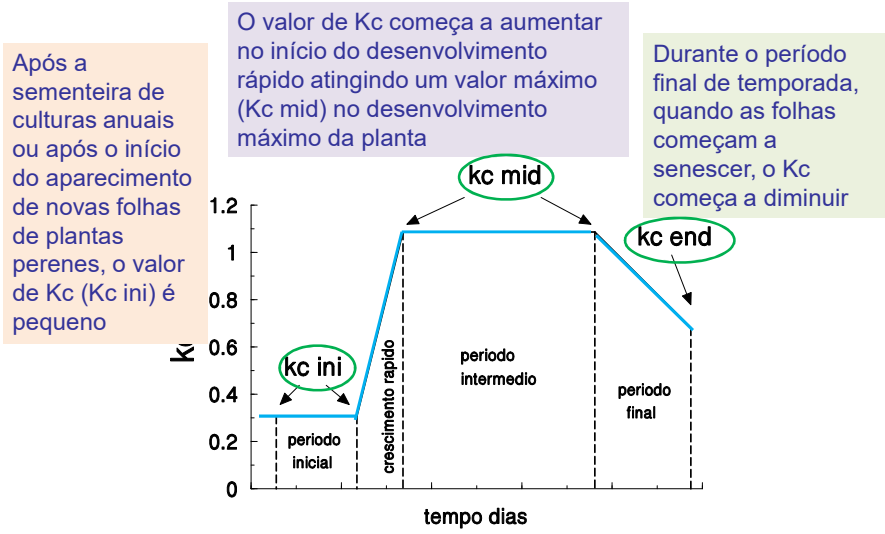
Tipo de cultura

- Anual
- Perene
Pastos
- Árvores de
folha caduca
- Árvores de
folha perene
- Relva de
referência



Estádios de crescimento das culturas para diferentes tipos de culturas

Curva típica do coeficiente cultural simples



Se o objetivo for o projeto da rega, esta curva dos Kc simples é suficiente

Duração dos estádios de desenvolvimento para diferentes regiões climáticas (FAO 56)

Crop	Init. (L-ini)	Dev. (L-dev)	Mid (L-mid)	Late (L-late)	Total	Plant Date	Region
a. Small Vegetables							
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
	25	40	95	20	180	Oct	(Semi) Arid
	25	40	45	15	125	April	Mediterranean
Celery	30	55	105	20	210	Jan	(Semi) Arid
	20	30	20	10	80	April	Mediterranean
	25	35	25	10	95	February	Mediterranean
Crucifers†	30	35	90	40	195	Oct/Nov	Mediterranean
	20	30	15	10	75	April	Mediterranean
	30	40	25	10	105	Nov/Jan	Mediterranean
Lettuce	25	35	30	10	100	Oct/Nov	Arid Region
	35	50	45	10	140	Feb	Mediterranean

Os valores na tabela são úteis apenas como um guia geral e para fins de comparação. Os comprimentos listados dos estádios de crescimento são valores médios para as regiões e períodos especificados e destinam-se para servir apenas como exemplos. Observações locais de desenvolvimento das planta devem ser usadas, sempre que possível, para incorporar os efeitos da variedade vegetal, do clima e das práticas culturais.

Coeficientes culturais para culturas em condições padrão (FAO 56)

Crop	K_{cini}^1	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$	Maximum Crop Height (h) (m)
a. Small Vegetables	0.7	1.05	0.95	
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. Vegetables - Solanum Family (Solanaceae)	0.6	1.15	0.80	
Egg Plant		1.05	0.90	0.8
Sweet Peppers (bell)		1.05 ²	0.90	0.7
Tomato		1.15 ²	0.70-0.90	0.6
c. Vegetables - Cucumber Family (Cucurbitaceae)	0.5	1.00	0.80	
Cantaloupe	0.5	0.85	0.60	0.3
Cucumber				
- Fresh Market	0.6	1.00 ²	0.75	0.3
- Machine harvest	0.5	1.00	0.90	0.3
Pumpkin, Winter Squash		1.00	0.80	0.4
Squash, Zucchini		0.95	0.75	0.3
Sweet Melons		1.05	0.75	0.4

Secção de Eng^o Rural

35

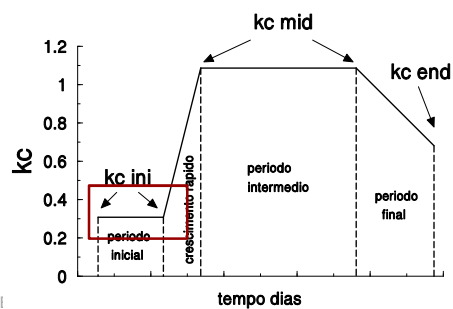
2.4.2 Variação do coeficiente cultural simples com as fases fenológicas

A. Fase inicial ($K_{c\ ini}$) : Desde sementeira até cobertura do solo de 10%Fatores de que depende o $K_{c\ ini}$:

- Período de tempo entre eventos de humedecimento:** quanto menor for o período de tempo entre eventos de humedecimento maior será o $K_{c\ ini}$;
- Poder de evaporação da atmosfera,** ou seja, ETo . Quanto maior o poder de evaporação da atmosfera, mais rapidamente o solo vai secar entre aplicações de água e tanto menor será o $K_{c\ ini}$;
- Magnitude do evento:** $K_{c\ ini}$ será menor para eventos ligeiros do que para grandes eventos de humedecimento;

Dependendo dos fatores acima referidos, o $K_{c\ ini}$ pode variar entre:

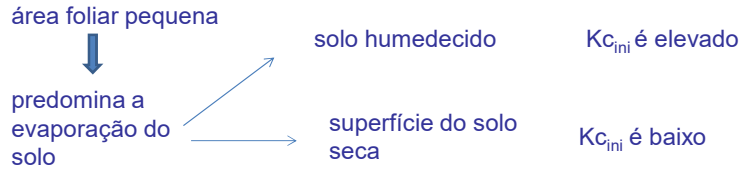
0.1 e 1.15.



Secção de I

36

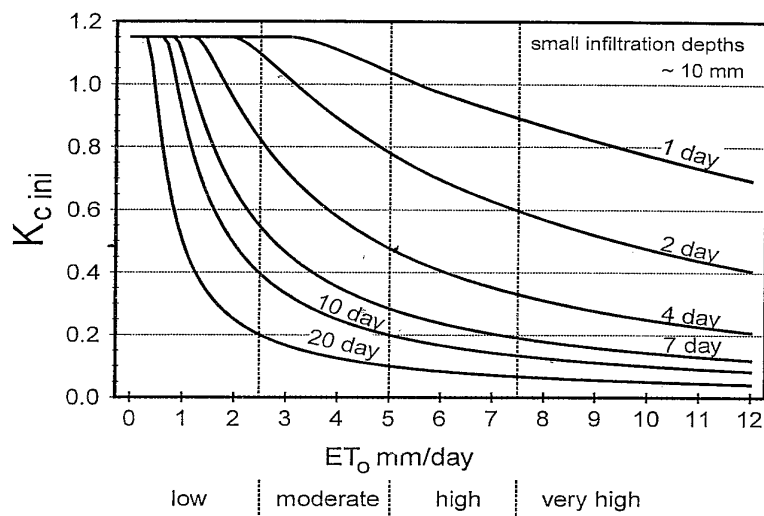
Os valores tabelados de $K_{c\ ini}$ são apenas aproximações e devem ser corrigidos considerando:



Estimativas gerais para $K_{c\ ini}$ em função da frequência de humedecimento, da ET_0 e da magnitude do evento para um solo de textura média.

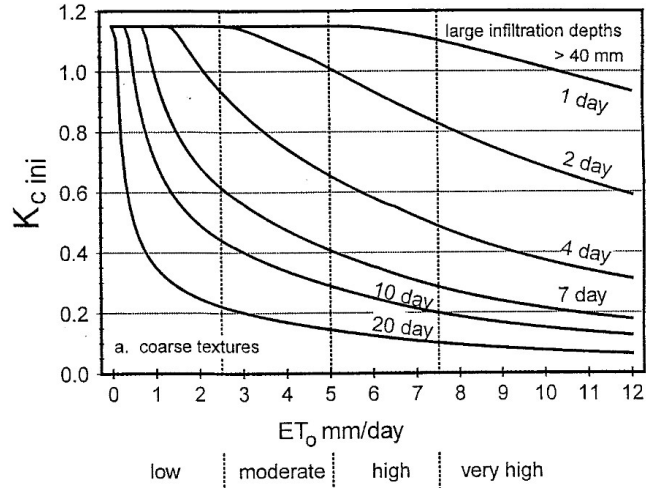
Intervalo entre eventos	Poder evaporativo (ET_0)			
	baixo 1-3 mm/dia	moderado 3-5 mm/dia	elevado 5-7 mm/dia	Muito elevado > 7 mm/dia
< semanal	1.2 - 0.8	1.1 - 0.6	1.0-0.4	0.9 - 0.3
semanal	0.8	0.6	0.4	0.3
> semanal	0.7 - 0.4	0.4 - 0.2	0.3 - 0.2	0.2 - 0.1

1) Eventos ligeiros de humedecimento:
precipitação e rega de alta frequência



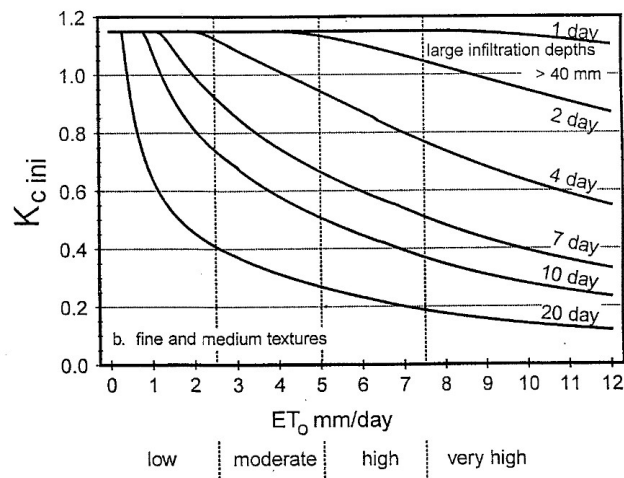
2) Eventos **significativos** de humedecimento:
> 40 mm, rega de superfície e por aspersão

a) Em solos arenosos



Secção de Eng^a Rural

b) Em solos limosos e argilosos



Secção de Eng^a Rural

3) Eventos médios de humedecimento (dotações, D, entre 10 e 40 mm):

$$K_{c\ ini} = K_{c\ ini\ 1} + \frac{[K_{c\ ini\ 2} - K_{c\ ini\ 1}]}{(40 - 10)} (D - 10)$$

sendo

$K_{c\ ini\ 1}$ o valor de $K_{c\ ini}$ para alturas de 10 mm

$K_{c\ ini\ 2}$ o valor de $K_{c\ ini}$ para alturas infiltradas de 40 mm e

D a altura de água média infiltrada (mm)

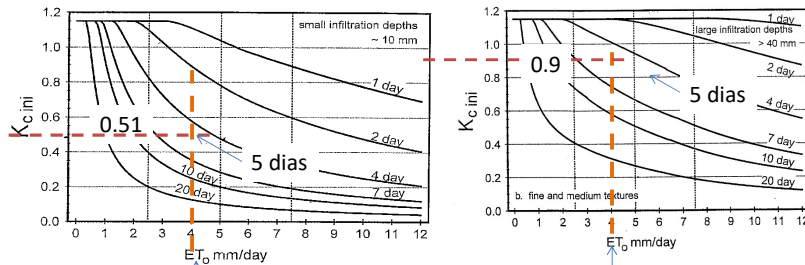
Exercício 1:

Determine o valor de $K_{c\ ini}$ para as seguintes condições.

- O período inicial ocorreu no mês de Maio ($E_{To}=4\text{ mm dia}^{-1}$)
- Intervalo entre acontecimentos : 5 dias
- Altura média das precipitações/regas ocorridas: 18 mm
- Textura do solo: limosa

($K_{c\ ini} = 0.614$)

Resolução : interpolação linear entre os $K_{c\ ini}$ de 10 mm e 40 mm



$$K_{c\ ini\ (18)} = K_{c\ ini\ (10)} + \frac{K_{c\ ini\ (40)} - K_{c\ ini\ (10)}}{40 - 10} \times (18 - 10)$$

$$K_{c\ ini\ (18)} = 0.51 + \frac{0.9 - 0.51}{30} \times 8 = 0.614$$

K_{c ini} para árvores e arbustos

O K_{c ini} depende da:

- frequência de humedecimento do solo,
- cobertura do solo por infestantes,
- densidade das árvores e
- existência de mulch



Para um pomar o K_{c ini} pode ser:

- tão elevado quanto 0.8 ou 0.9, se existir cobertura do solo com infestantes,
- tão baixo quanto 0.3 ou 0.4 quando a superfície do solo é mantida nua e o humedecimento é pouco frequente.

Crop	K _{c ini} ¹	K _{c mid}	K _{c end}
m. Grapes and Berries			
Berries (bushes)	0.30	1.05	0.50
Grapes			
- Table or Raisin	0.30	0.85	0.45
- Wine	0.30	0.70	0.45
Hops	0.3	1.05	0.85
n. Fruit Trees			
Almonds, no ground cover	0.40	0.90	0.65 ¹⁸
Apples, Cherries, Pears ¹⁹			
- no ground cover, killing frost	0.45	0.95	0.70 ¹⁸
- no ground cover, no frosts	0.60	0.95	0.75 ¹⁸
- active ground cover, killing frost	0.50	1.20	0.95 ¹⁸
- active ground cover, no frosts	0.80	1.20	0.85 ¹⁸
Apricots, Peaches, Stone Fruit ^{19, 20}			
- no ground cover, killing frost	0.45	0.90	0.65 ¹⁸
- no ground cover, no frosts	0.55	0.90	0.65 ¹⁸
- active ground cover, killing frost	0.50	1.15	0.90 ¹⁸
- active ground cover, no frosts	0.80	1.15	0.85 ¹⁸
Avocado, no ground cover	0.60	0.85	0.75
Citrus, no ground cover ²¹			
- 70% canopy	0.70	0.65	0.70
- 50% canopy	0.65	0.60	0.65
- 20% canopy	0.50	0.45	0.55
Citrus, with active ground cover or weeds ²²			
- 70% canopy	0.75	0.70	0.75
- 50% canopy	0.80	0.80	0.80
- 20% canopy	0.85	0.85	0.85

(FAO 56)

²¹ These K_c values can be calculated from Eq. 98 for K_{c, min} = 0.15 and K_{c, full} = 0.75, 0.70 and 0.75 for the initial, mid season and end of season periods, and f_{c, eff} = f_c where f_c = fraction of ground covered by tree canopy (e.g., the sun is presumed to be directly overhead). The values listed correspond with those in Doorenbos and Pruitt (1977) and with more recent measurements. The midseason value is lower than initial and ending values due to the effects of stomatal closure during periods of peak ET. For humid and subhumid climates where there is less stomatal control by citrus, values for K_{c, ini}, K_{c, mid} and K_{c, end} can be increased by 0.1 - 0.2, following Rogers et al. (1983).

$K_{c\text{ ini}}$ para a cultura do arroz com alagamento

Quando a lâmina de água no canteiro de arroz apresenta uma profundidade de 0.10-0.20 m, a ET_c durante o estágio inicial é constituída principalmente por evaporação da água.

O $K_{c\text{ ini}}$ na tabela dos K_c da FAO (Tabela 12) é 1.05 para um clima sub-húmido com velocidade do vento calma a moderada.

O K_c ini deve ser ajustado para o clima local, conforme indicado no quadro seguinte (Quadro 14 do FAO 56)

$K_{c\text{ ini}}$ para a cultura do arroz e para vários tipos de clima

Humidade	Velocidade do vento		
	ligeira	moderada	forte
Árido e semiárido	1.10	1.15	1.20
Sub-húmido a húmido	1.05	1.10	1.15
Muito húmido	1.00	1.05	1.10

B. Fase de desenvolvimento das culturas

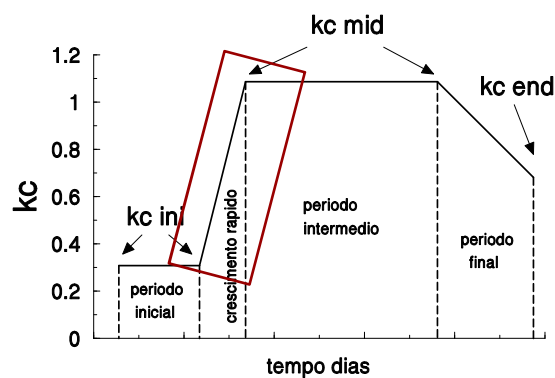
a cultura cobre cada vez mais do solo



evaporação torna-se mais restrita

transpiração torna-se gradualmente o processo principal

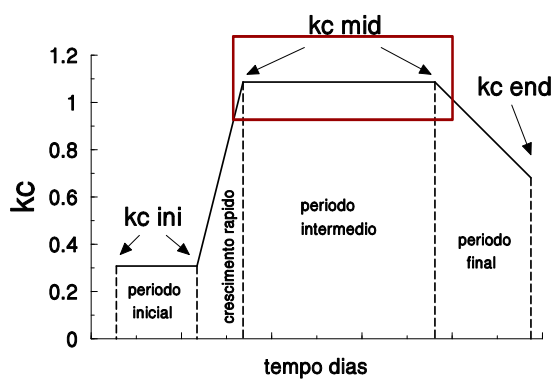
O valor de K_c vai variando de acordo com o desenvolvimento da planta



C. Fase intermédia

- Entre o início da cobertura total e o início da senescência;
- É o estágio mais longo para plantas perenes e para muitas anuais, mas pode ser relativamente curto para hortícolas, que são colhidas antes da maturação;

- O valor de K_c mid é relativamente constante;

Secção de Eng^a Rural

47

Correcção devido ao clima

Os valores de K_c tabelados (FAO 56) são valores típicos esperados para condições climáticas padrão, que se caracterizam por:

- clima sub-húmido;
- humidade relativa mínima do ar (RH_{min}) \approx 45% e
- vento moderado \Leftrightarrow velocidade média de 2 m/s.

$\left\langle \begin{array}{l} \text{climas mais áridos e maior velocidade de vento} \\ \text{climas mais húmidos e menores velocidades do vento} \end{array} \right. \Rightarrow K_c \begin{array}{l} \uparrow \\ \downarrow \end{array}$

Secção de Eng^a Rural

48

A utilização dos valores tabelados para outras condições requer a sua correcção através da equação:

$$Kc_{mid} = Kc_{mid(tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

sendo:

$Kc_{mid(tab)}$ o valor de Kc_{mid} retirado da tabela;

u_2 o valor médio diário da velocidade do vento medida a 2 metros de altura ($1 < u_2 < 6$ m/s);

HR_{min} o valor médio diário da humidade relativa mínima ($20 < HR_{min} < 80$ %); e

h a altura média da planta ($0.1 < h < 10$ m).

Exercício 2:

Determine os valores de Kc_{mid} para a cultura do milho para os seguintes climas:

- a) clima húmido com $u = 1.3$ m s⁻¹ e $HR_{min} = 75\%$;
b) clima árido com $u = 4.6$ m s⁻¹ e $HR_{min} = 44\%$.

(Solução: $Kc_{mid} = 1.07$; $Kc_{mid} = 1.30$)

Resolução:

Quadro 12 FAO 56



$Kc_{mid} = 1.2$

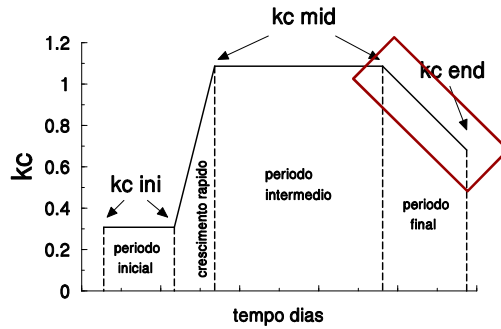
Clima húmido $Kc_{mid} = 1.2 + [0.04(1.3 - 2) - 0.004(75 - 45)] \left(\frac{2}{3}\right)^{0.3} = 1.07$

Clima sub-árido $Kc_{mid} = 1.2 + [0.04(4.6 - 2) - 0.004(44 - 45)] \left(\frac{2}{3}\right)^{0.3} = 1.3$

3. Período final, K_{c end}: desde o início da senescência até à senescência completa, ou colheita

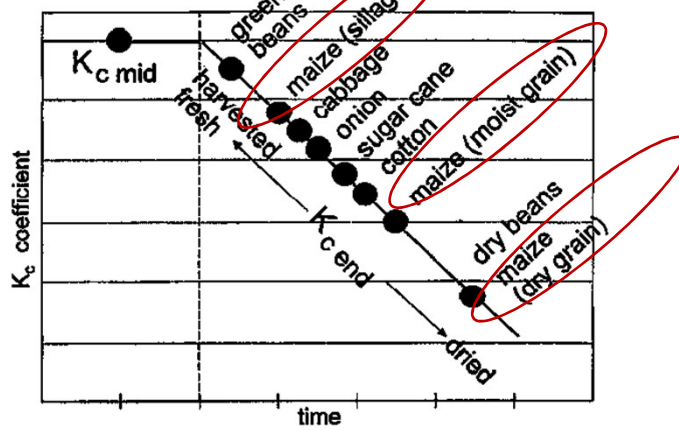
O valor de K_{c end} reflete as práticas de gestão das culturas

- cultura regada com frequência e colhida em fresco => K_{c end} alto
- colheita após senescência => K_{c end} baixo



Secção de Eng^a Rural

Variação do K_c com a data de colheita



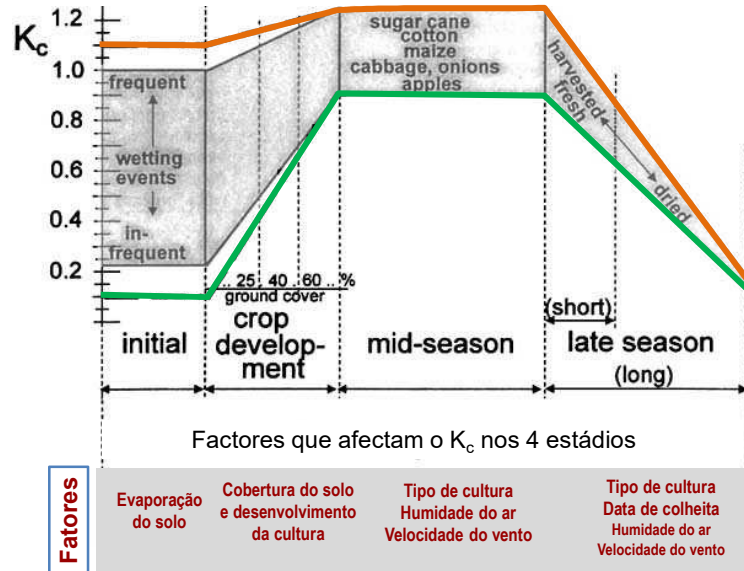
Correcção para o clima

$$K_{c\ end} = K_{c\ end\ tab} + \left[0.04(U_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45) \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right]$$

Secção de Eng^a Rural

Em resumo :

Variação de K_c para diferentes culturas influenciada pelos diversos fatores

Seção de Eng^a Rural

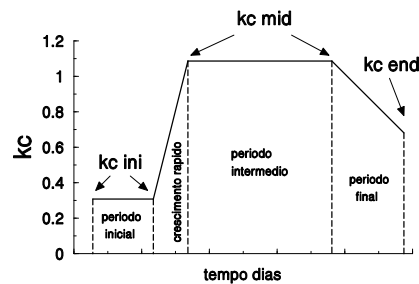
53

2.4.3 Construção da curva dos K_c

Culturas anuais

A. Dividir o ciclo cultural em quatro períodos:

- inicial,
- de rápido desenvolvimento vegetativo,
- intermédio e
- final.

**B. Determinar os comprimentos de cada período e identificar, a partir das tabelas, os K_c correspondentes a $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ e $K_{c\ end}$;****C. Ajustar os valores de $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ e $K_{c\ end}$ às condições climáticas e ao padrão de humedecimento do solo;****D. Construir a curva.** Desenhar linhas horizontais nos estádios correspondentes ao $K_{c\ ini}$ e ao $K_{c\ mid}$ e desenhar diagonais ligando $K_{c\ ini}$ a $K_{c\ mid}$ e $K_{c\ mid}$ a $K_{c\ end}$.Seção de Eng^a Rural

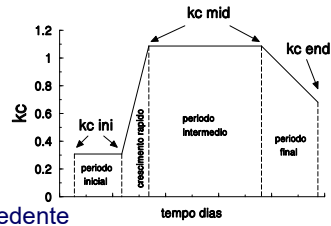
54

Determinação do K_c para qualquer dia do desenvolvimento da cultura

$$K_c(i) = K_{c\ prev} + \left[\frac{i - L_{(prev)}}{L_{stage}} \right] (K_{c\ seg} - K_{c\ prev})$$

Onde

- $K_{c\ i}$ é o coeficiente no dia i
- $K_{c\ prev}$ é o coeficiente do estágio antecedente
- $K_{c\ seg}$ é o coeficiente do estágio seguinte
- L_{prev} é o comprimento em dias do estágio antecedente
- L_{stage} é o comprimento em dias do estágio a que pertence o dia i



Exercício 3:

Considere uma cultura de beterraba em solo franco-limoso em Beja, cuja sementeira ocorre no dia 23 de Maio. Durante o desenvolvimento inicial a ET_0 vale 5.5 mm dia^{-1} e são realizadas regas intervaladas em 14 dias e dotação de 10 mm. Durante o desenvolvimento intermédio a HR mínima do ar é de 30 % e a velocidade média de vento é 2.2 m s^{-1} . No período final a $HR_{min} = 45 \%$ e velocidade do vento = 2 m s^{-1} . Não há rega nos dias que antecedem a colheita.

- a) Construa a curva dos coeficientes culturais;
- b) Calcule os K_c médio do mês de julho;
- c) Determine o K_c do dia 183 (DDA) (2 de Julho)
- d) Determine a evapotranspiração cultural acumulada por mês e para toda a época cultural da beterraba.

a) Divisão do ciclo cultural em períodos e determinação do comprimento de cada um

Crop	Init. (L _{ini})	Dev. (L _{dev})	Mid (L _{mid})	Late (L _{late})	Total	Plant Date	FAO 56 Tabela 11
d. Roots and Tubers							
Beets, table	15	25	20	10	70	Apr/May	Mediterranean
	25	30	25	10	90	Feb/Mar	Mediterranean & Arid
Cassava: year 1	20	40	90	60	210	Rainy	Tropical regions
year 2	150	40	110	60	360	season	
Potato	25	30	30/45	30	115/130	Jan/Nov	(Semi) Arid Climate
	25	30	45	30	130	May	Continental Climate
	30	35	50	30	145	April	Europe
	45	30	70	20	165	Apr/May	Idaho, USA
	30	35	50	25	140	Dec	Calif. Desert, USA
Sweet potato	20	30	60	40	150	April	Mediterranean
	15	30	50	30	125	Rainy seas	Tropical regions
Sugarbeet	30	45	90	15	180	March	Calif., USA
	25	30	90	10	155	June	Calif., USA
	25	65	100	65	255	Sept	Calif. Desert, USA
	50	40	50	40	180	April	Idaho, USA
	25	35	50	50	160	May	Mediterranean
	45	75	80	30	230	November	Mediterranean
	35	60	70	40	205	November	Arid Regions

Tabela

- Sementeira em maio
- $L_{ini} = 25$ dias
 - $L_{dev} = 35$ dias
 - $L_{mid} = 50$ dias
 - $L_{late} = 50$ dias
 - $L_{total} = 160$ dias

Dados da região
Sementeira 23/05

- $L_{ini} = 20$ dias
- $L_{dev} = 30$ dias
- $L_{mid} = 40$ dias
- $L_{late} = 20$ dias
- $L_{total} = 110$ dias

✓ Identificar os K_c correspondentes

FAO 56
Tabela 12

d. Roots and Tubers	0.5	1.10	0.95	
Beets, table		1.05	0.95	0.4
Cassava				
- year 1	0.3	0.80 ³	0.30	1.0
- year 2	0.3	1.10	0.50	1.5
Parsnip	0.5	1.05	0.95	0.4
Potato		1.15	0.75 ⁴	0.6
Sweet Potato		1.15	0.65	0.4
Turnip (and Rutabaga)		1.10	0.95	0.6
Sugar Beet	0.35	1.20	0.70 ⁵	0.5

⁵ This $K_{c\ end}$ value is for no irrigation during the last month of the growing season.
The $K_{c\ end}$ value for sugar beets is higher, up to 1.0, when irrigation or significant rain occurs during the last month.

Tabela

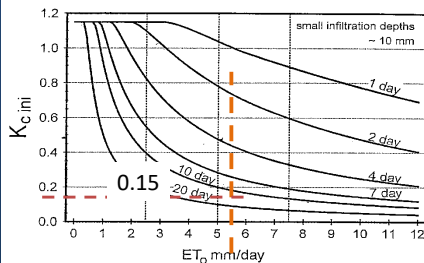
- $K_{c\ ini} = 0.35$
- $K_{c\ mid} = 1.2$
- $K_{c\ end} = 0.7$
- Altura da cultura 0.5 m

a)

✓ Correção dos K_c para as condições da região

Estádio inicial

ET_o vale 5.5 mm dia⁻¹ e são realizadas regas com intervalos de 14 dias e dotação de 10 mm.



$K_{c\ ini} = 0.15$

Estádio intermédio

HR mínima do ar é de 30 %;
velocidade média de vento é 2.2 m s⁻¹.

$$K_{c\ mid} = K_{c\ mid\ tab} + \left[0.04(U_2 - 2) - 0.004(HR_{\min} - 45) \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right]$$

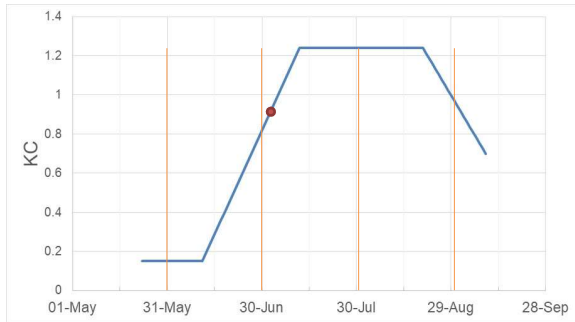
↓
 $K_{c\ mid} = 1.24$

Estádio Final

Nos dias que antecedem a colheita não há rega;
HR mínima do ar é de 45 %;
velocidade média de vento é 2 m s⁻¹.

Não é necessária correção

$K_{c\ end} = 0.7$



d)

Mês	ETc (mm)
mai	7.8
jun	61.7
jul	240.2
ago	202.4
set	31.1
Total	543.2

b) K_c médios para o mês de julho;

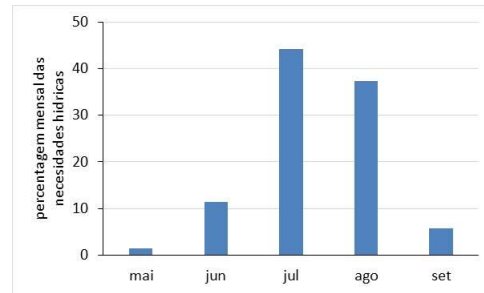
Julho tem:

20 dias com $K_c = 1.24$

11 dias com K_c entre 0.85 e 1.2 (média = 1.025)

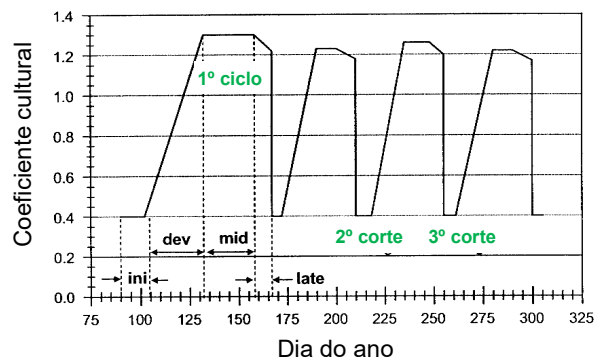
$$K_{c_{julho}} = \frac{11 \times 1.025 + 1.24 \times 20}{31} = 1.17$$

c) $K_c(41) = 0.15 + \left[\frac{41-20}{30} \right] (1.24 - 0.15) = 0.913$

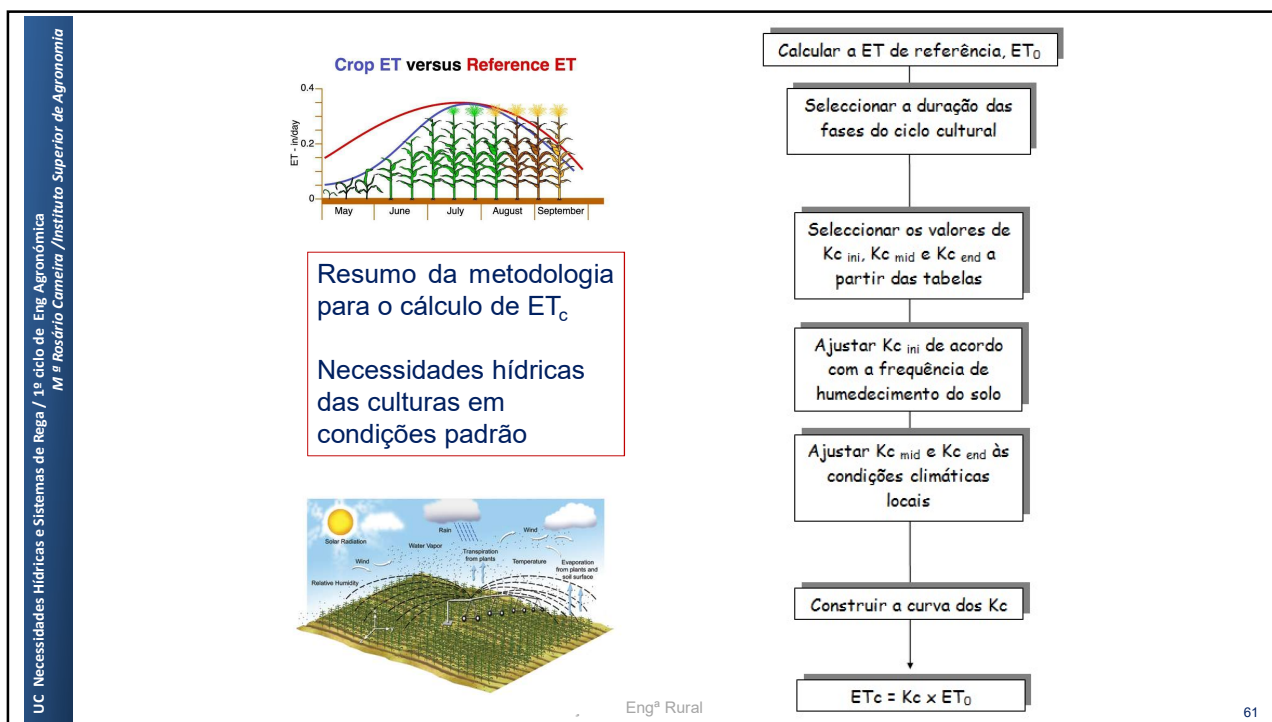


Algumas culturas forrageiras

- São colhidas várias vezes durante o seu ciclo cultural;
- Cada colheita termina um “sub ciclo cultural” e portanto uma curva de K_c , iniciando um novo “sub ciclo cultural” e uma nova curva de K_c ;
- A curva de K_c resultante é a agregação da série de curvas associadas com cada sub ciclo.



Curva de K_c para culturas com colheitas múltiplas durante o ciclo cultural



UC - Necessidades Hídricas e Sistemas de Rega / 1º ciclo de Eng. Agronómica
M.ª Rosário Cameira / Instituto Superior de Agronomia

Bibliografia:

- Pereira, L.S., 2004. *Necessidades de água e métodos de rega*. Publicações Europa-América
- Oliveira, I., 1993. *Técnicas de regadio*. Edição do Autor.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome, 300(9)*, p.D05109.

[Link para FAO 56](#)

Kc actualizados

- Pereira, L.S., Paredes, P., Lopez-Urrea, R., Hunsaker, D.J., Mota, M., Mohammadi Shad, Z. (2021a). Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. *Agricultural Water Management* **243**, 106196.
- Pereira, L.S., Paredes, P., Hunsaker, D.J., López-Urrea, R., Mohammadi Shad, Z. (2021b). Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultural Water Management* **243**, 106466.
- Rallo, G., Paço, T.A., Puig, A., Paredes, P., Massai, R., Provenzano, G., Pereira, L.S. (2021). Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops. *Agricultural Water Management* **250**, 106645.

Secção de Engº Rural 62