



INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA
Universidade de Lisboa

Departamento de Ciências e
Engenharia de Biosistemas

Recursos Hídricos

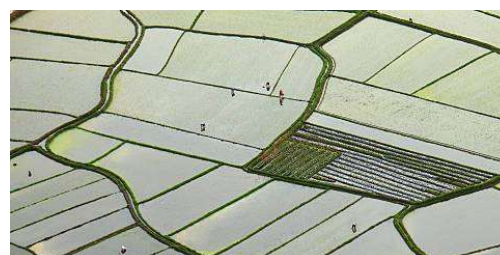
MÓDULO 2 NECESSIDADES DE REGA DAS CULTURAS

Aulas 2 a 4

Necessidades hídricas:

Construção da curva dos K_c ;

Evapotranspiração cultural para condições não padrão:
stress hídrico, salinidade e densidade de cobertura

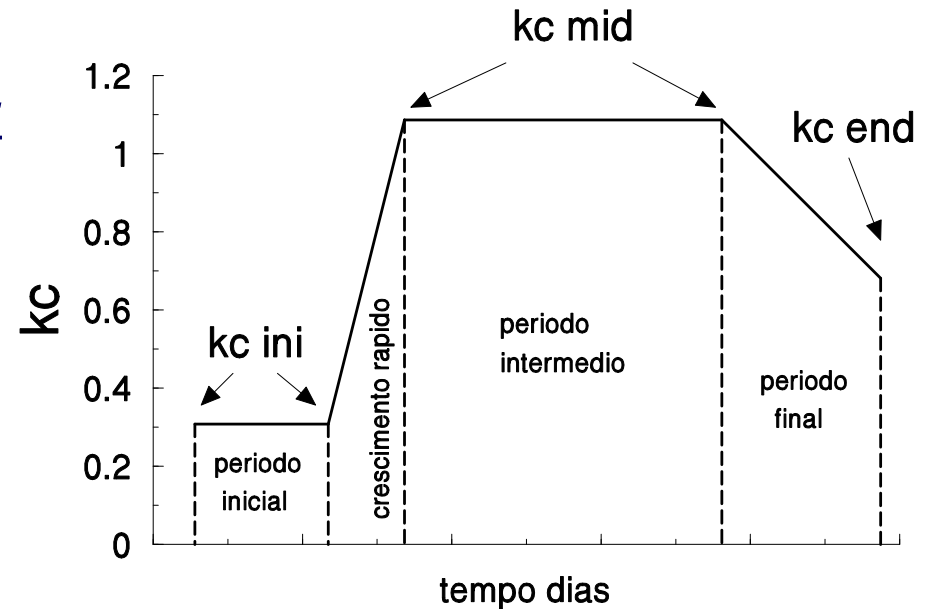


4.3 CONSTRUÇÃO DA CURVA DOS K_C

4.3.1. 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 $K_{c\ end}$.

4.3.3 Determinação do K_c médio mensal (ver exercício 4)4.3.4 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

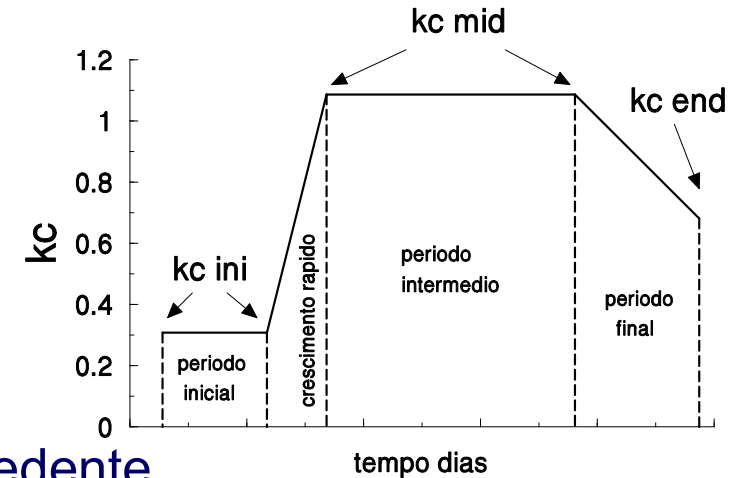
$K_{c\ i}$ é o coeficiente no dia i

$K_{c\ prev}$ 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 4:

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.

- Construa a curva dos coeficientes culturais;
- Calcule os K_c médios mensais;
- Determine o K_c do dia 183 (DDA) (2 de Julho)
- Determine a evapotranspiração cultural acumulada para o mês de Julho se a ET_0 média for 7 mm d^{-1}

a)

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

FAO 56
Tabela 11

Crop	Init. (L _{ini})	Dev. (L _{dev})	Mid (L _{mid})	Late (L _{late})	Total	Plant Date	
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	0.70⁵	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.

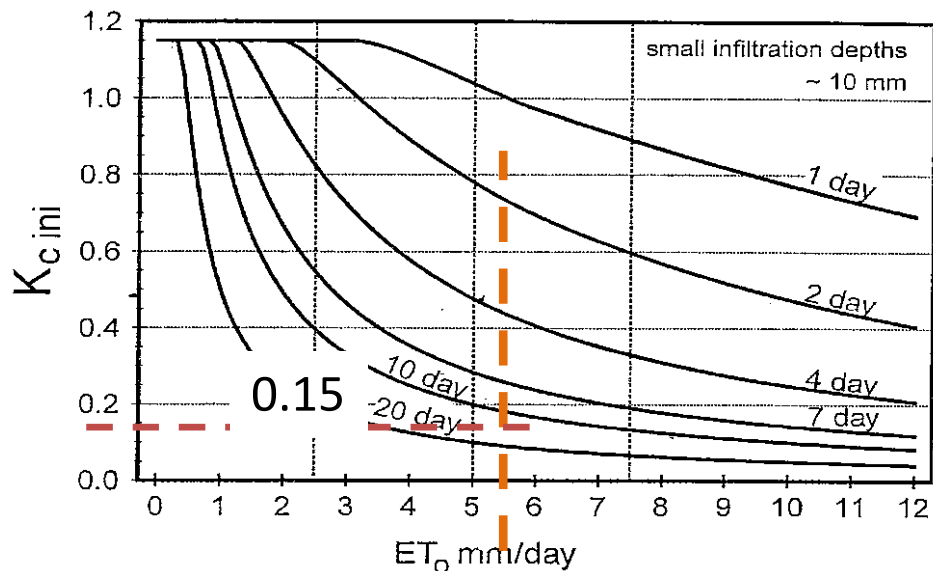
Estádio intermédio

HR mínima do ar é de 30 %; velocidade média de vento é 2.2 m s^{-1} .

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

↓

$$K_{c \text{ mid}} = 1.24$$



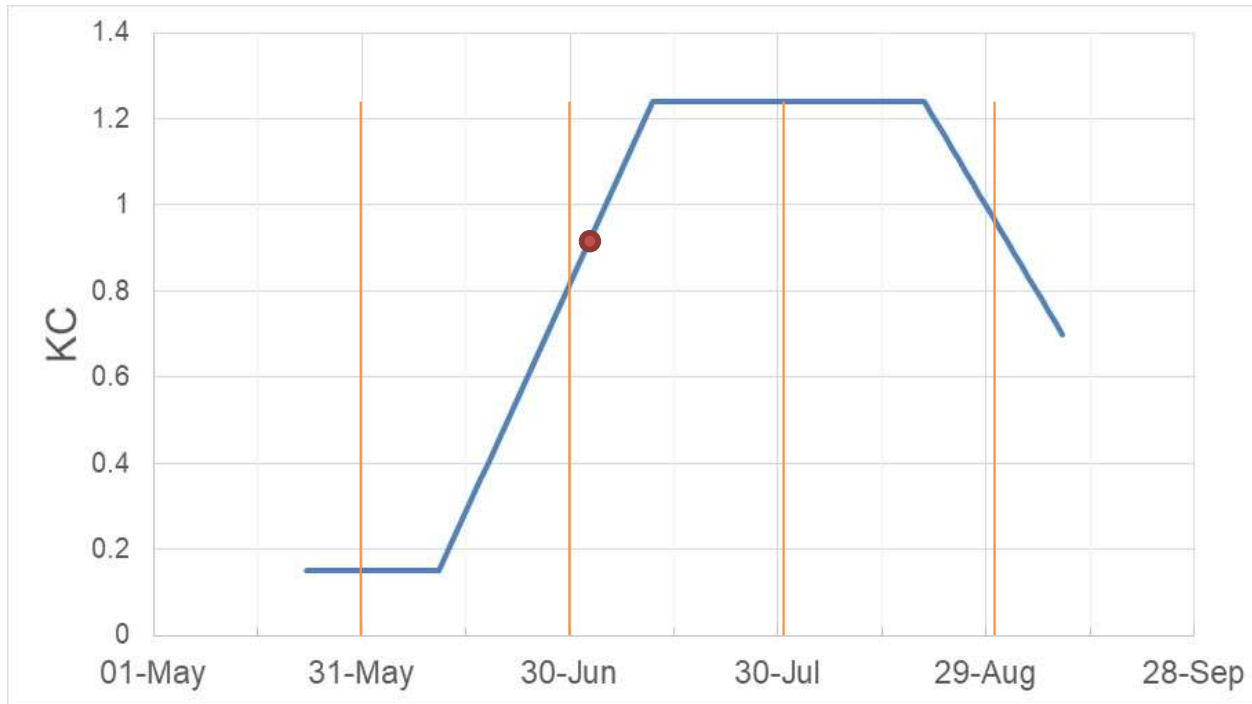
$$K_{c \text{ ini}} = 0.15$$

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

$$K_{c \text{ end}} = 0.7$$



01/jul	40	0.877
02/jul	41	0.913
03/jul	42	0.949
04/jul	43	0.986
05/jul	44	1.022
06/jul	45	1.058
07/jul	46	1.095
08/jul	47	1.131
09/jul	48	1.167
10/jul	49	1.204
11/jul	50	1.240
12/jul	51	1.240
13/jul	52	1.240
14/jul	53	1.240
15/jul	54	1.240
16/jul	55	1.240
17/jul	56	1.240
18/jul	57	1.240
19/jul	58	1.240
20/jul	59	1.240
21/jul	60	1.240
22/jul	61	1.240
23/jul	62	1.240
24/jul	63	1.240
25/jul	64	1.240
26/jul	65	1.240
27/jul	66	1.240
28/jul	67	1.240
29/jul	68	1.240
30/jul	69	1.240
31/jul	70	1.240

b) K_c médios mensais;

Ex: Julho tem:

21 dias com $K_c = 1.24$

10 dias com K_c entre 0.877 e 1.204

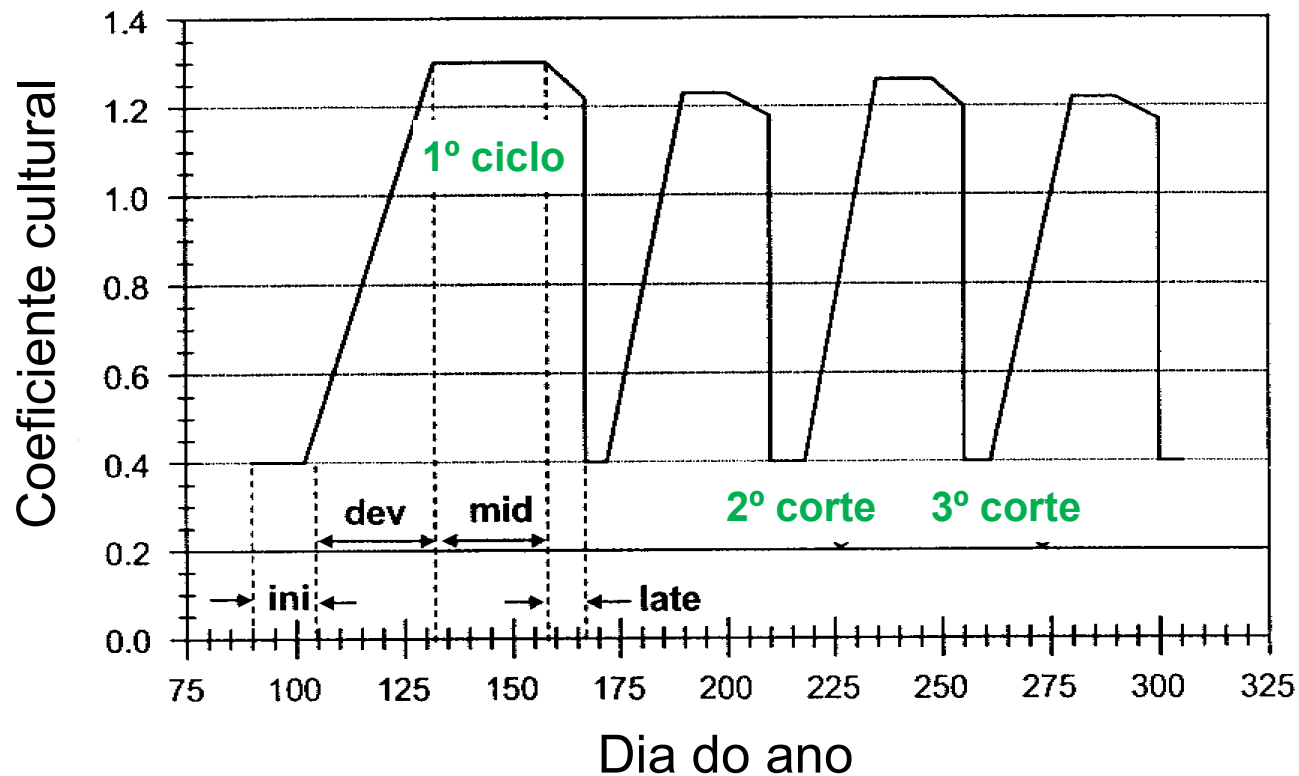
$$K_{c \text{ Julho}} = \frac{21 \times 1.24 + 10 \times \frac{0.877 + 1.204}{2}}{31} = 1.176$$

$$c) K_c(41) = 0.15 + \left[\frac{41-2}{30} \right] (1.24 - 0.15) = 0.913$$

$$d) ET_{c \text{ Julho}} = 1.176 \times 7 \times 31 = 255 \text{ mm}$$

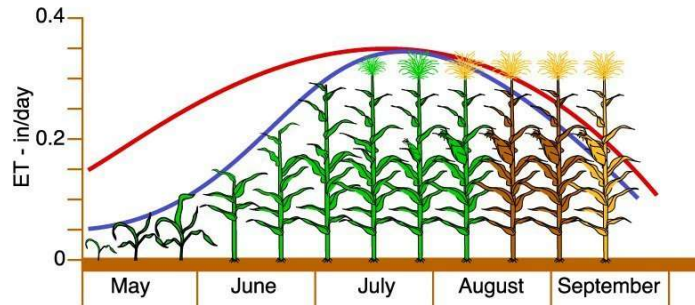
4.3.2. Algumas culturas forrageiras

- 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.



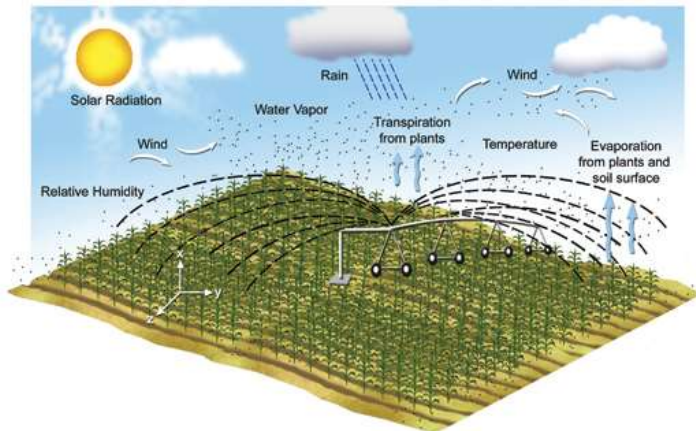
Curva de K_c para culturas com colheitas múltiplas durante o ciclo cultural

Crop ET versus Reference ET



Resumo da metodologia para o cálculo de ET_c

Necessidades hídricas das culturas em condições padrão



Calcular a ET de referência, ET_0

Seleccionar a duração das fases do ciclo cultural

Seleccionar os valores de Kc_{ini} , Kc_{mid} e Kc_{end} a partir das tabelas

Ajustar Kc_{ini} de acordo com a frequência de humedecimento do solo

Ajustar Kc_{mid} e Kc_{end} às condições climáticas locais

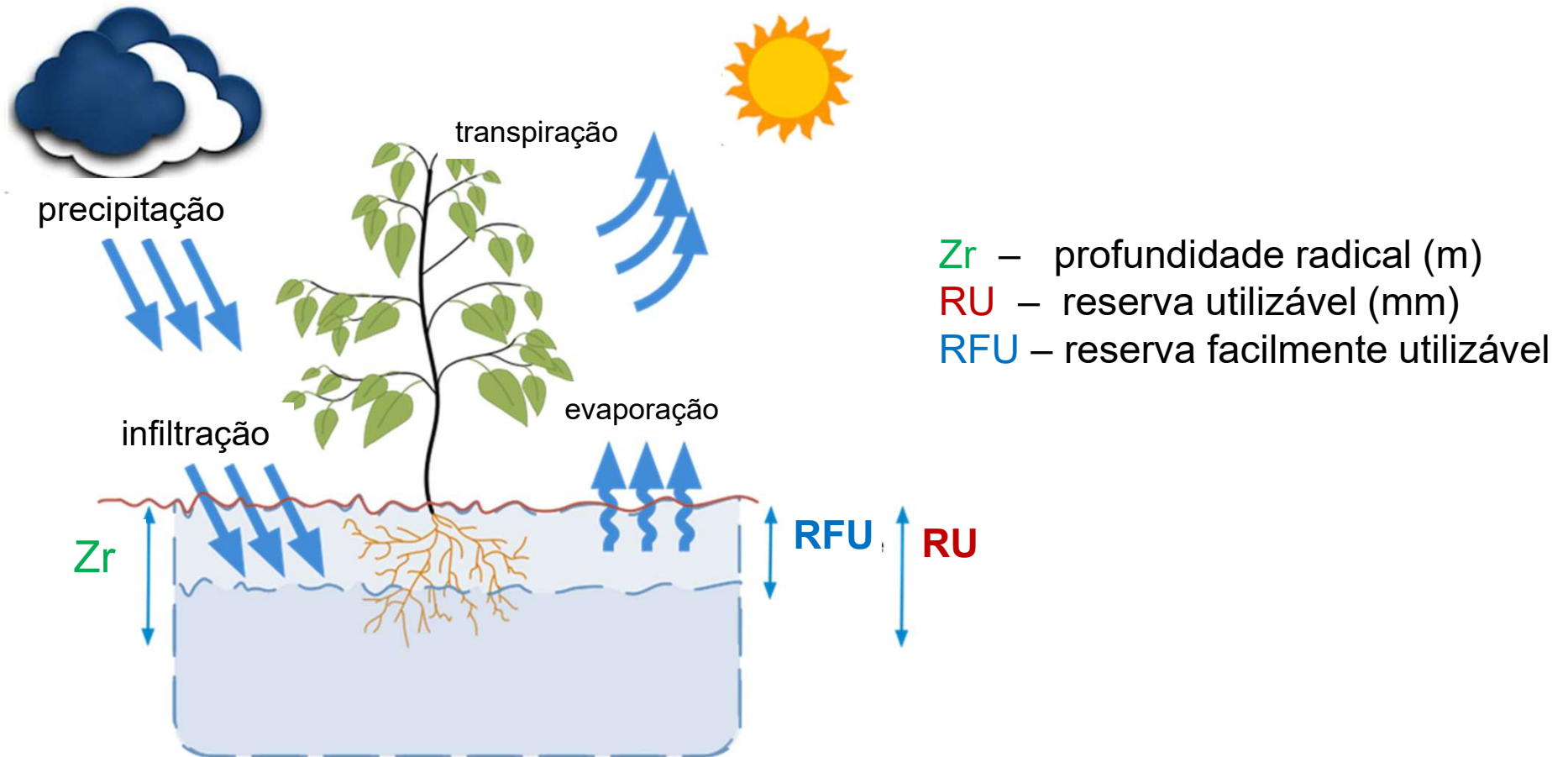
Construir a curva dos Kc

$$ET_c = Kc \times ET_0$$

5. EVAPOTRANSPIRAÇÃO CULTURAL PARA CONDIÇÕES NÃO PADRÃO: EVAPOTRANSPIRAÇÃO CULTURAL AJUSTADA, $ET_{c\ adj}$

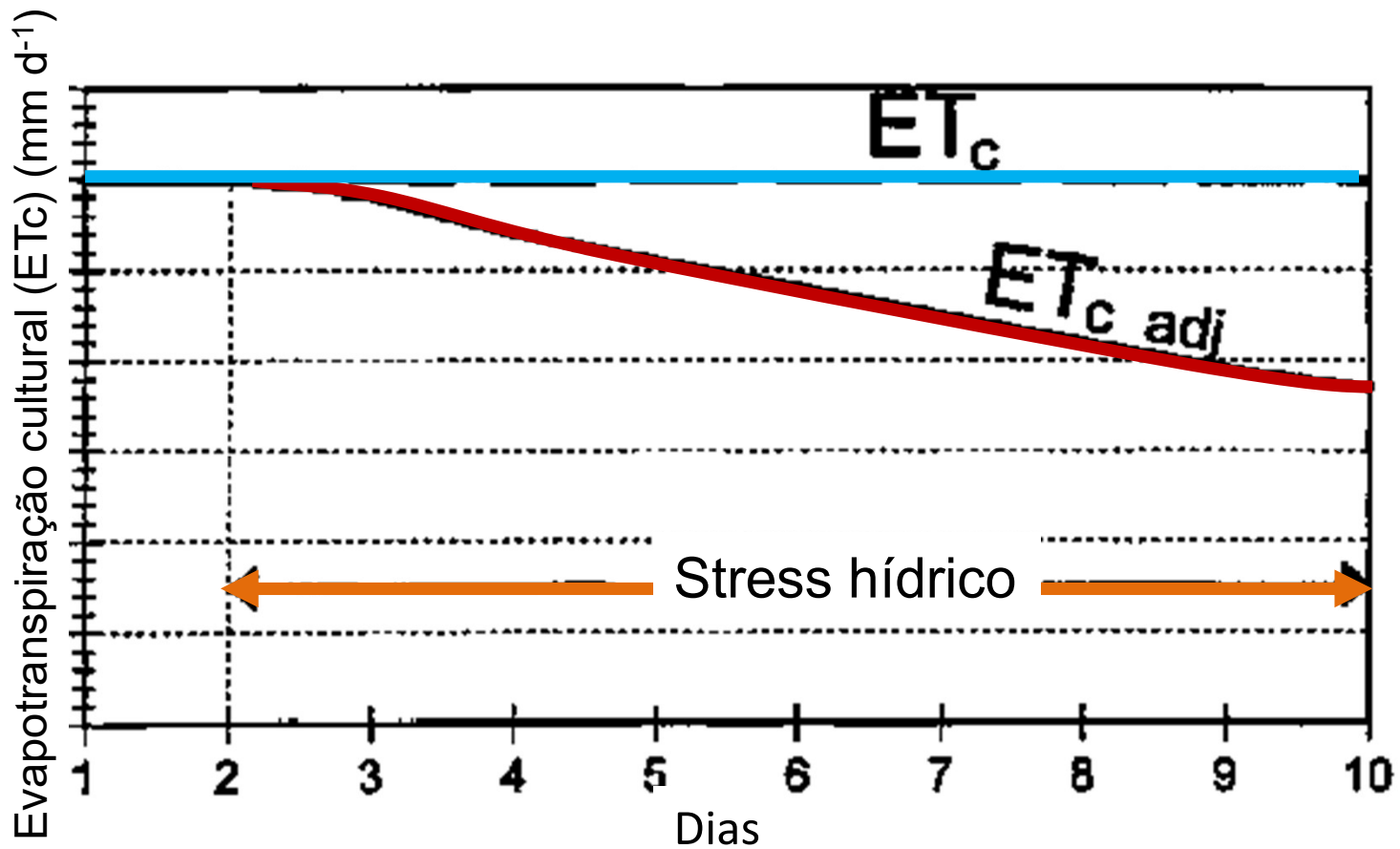
5.1. Stress hídrico

- Ocorre quando o armazenamento de água no solo é inferior à reserva facilmente utilizável, RFU;
- $ET_c < ET_c$ em condições padrão; ET_c denomina-se $ET_{c\ adj}$



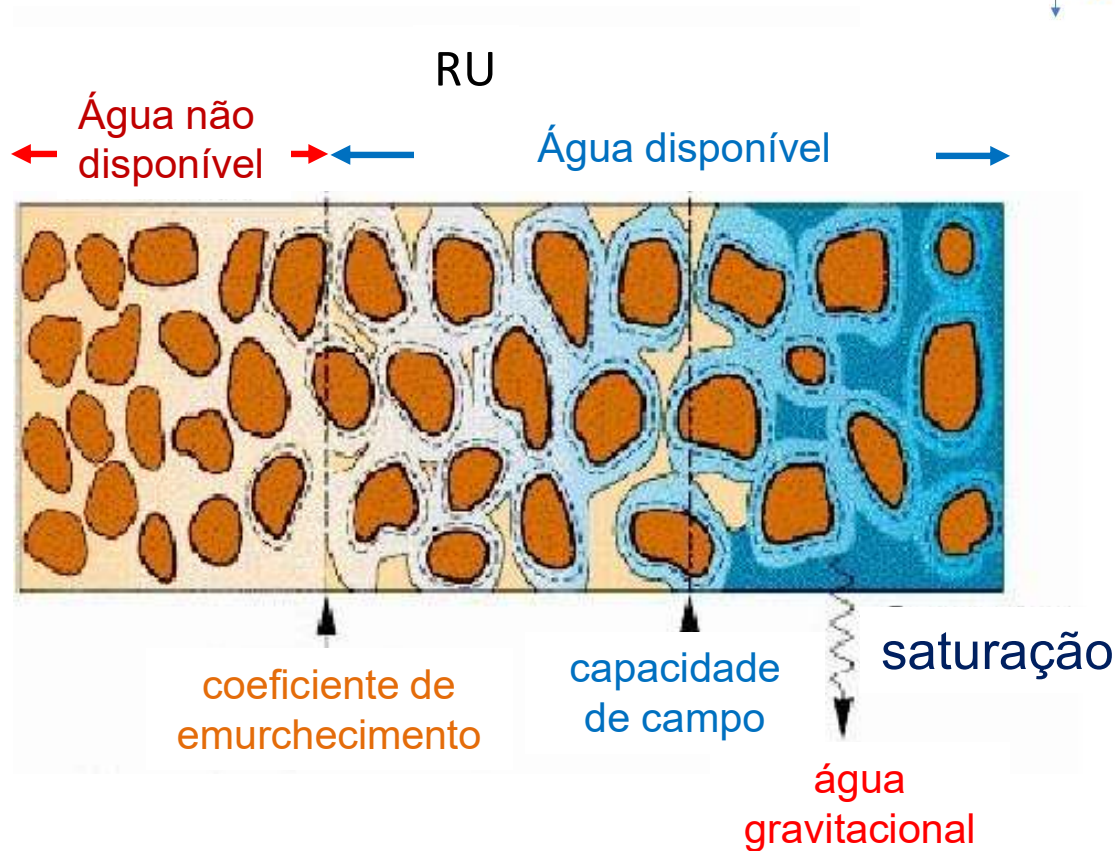
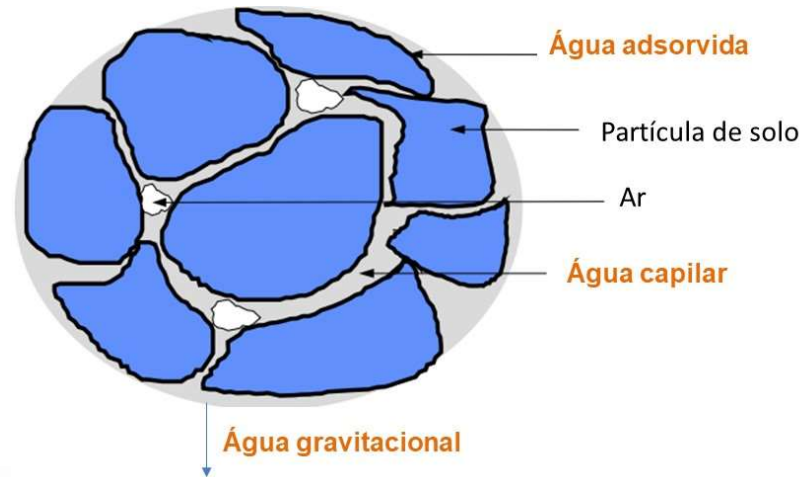
- O coeficiente K_s é utilizado para reduzir o valor de K_c

$$ET_{c \text{ adj}} = K_s K_c ET_0$$



5.1.1. Disponibilidade de água no solo

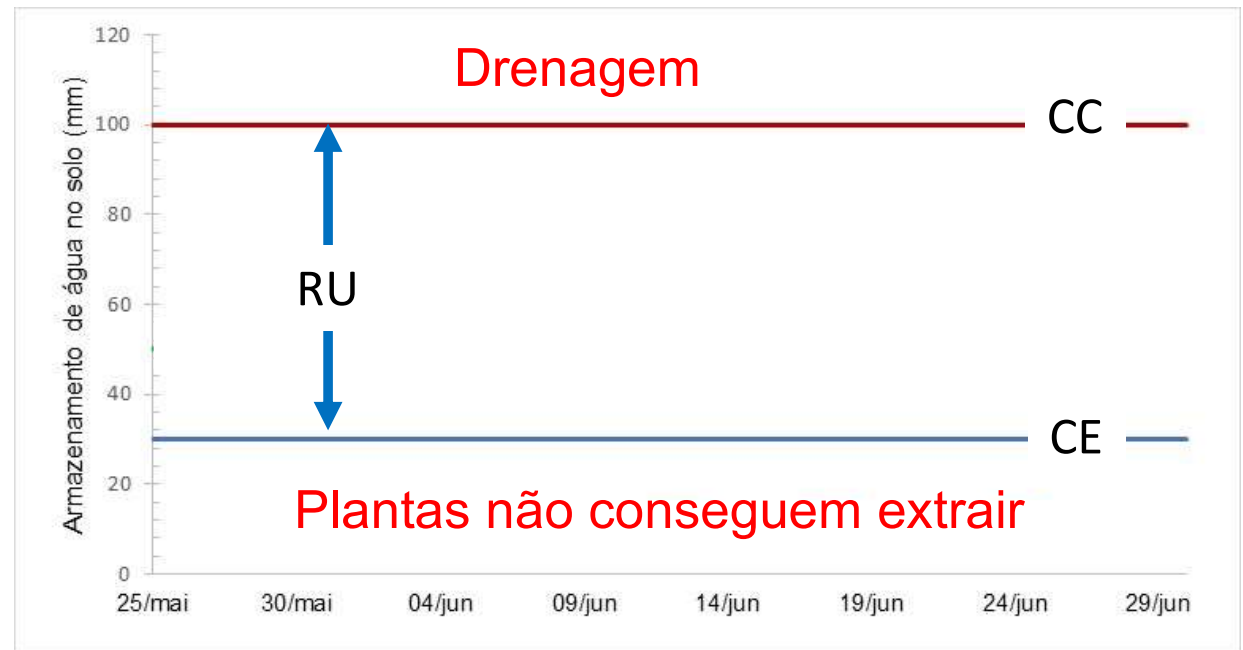
A água do solo pode encontrar-se em três formas



Capacidade de um solo reter água disponível para as plantas

A capacidade do campo (CC, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) é o teor de água que um solo bem drenado apresenta, ou seja, é o teor de água existente no solo quando a drenagem diminuiu marcadamente. É o teor de água a **pF 2.5** ou a **31 kPa**.

O Coeficiente de emurchecimento (CE, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) é o teor de água abaixo do qual as plantas não são capazes de extrair a água do solo e por isso vão murchar permanentemente. É o teor de água a **pF 4.2** ou **1550 kPa**.



Reserva Utilizável (RU, mm)

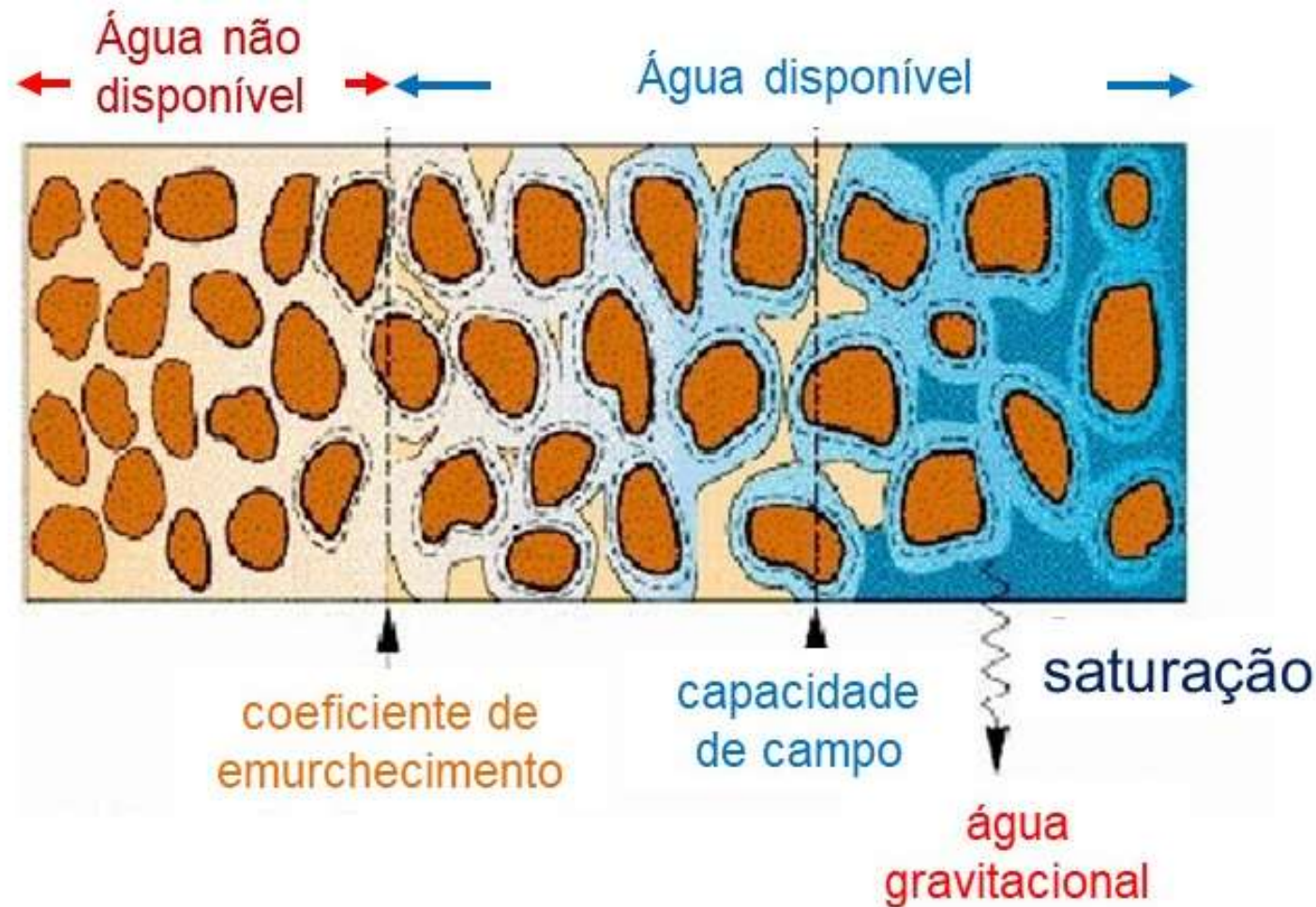
$$RU = (CC - CE) \times Z_r \times 1000$$

sendo:

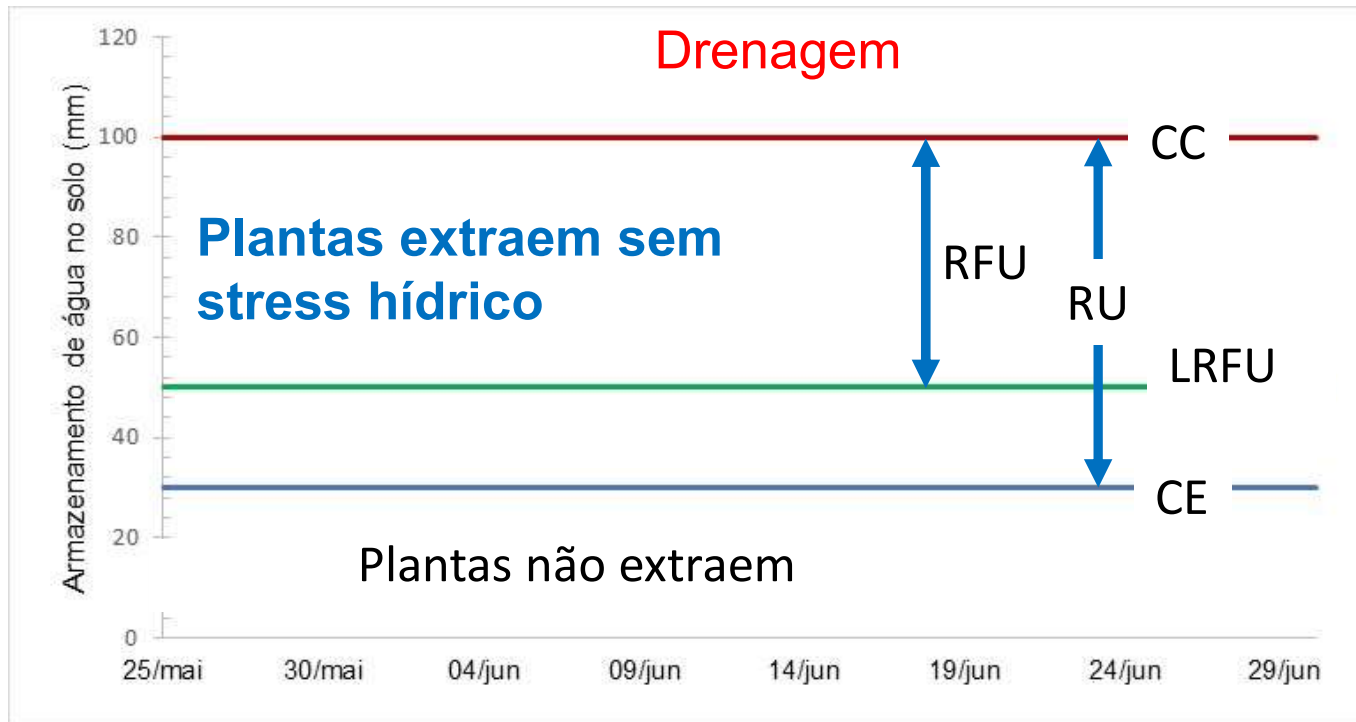
CC e CE os teores de água volumétricos à capacidade de campo e no coeficiente de emurchecimento ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

Z_r a profundidade radical (m)

- Na ausência de abastecimento de água, o teor de água na zona radical diminui como resultado da absorção radical;
- À medida que a extração de água progride, a água remanescente é mantida nos poros de menor diâmetro, aumentando a força com que é retida e dificultando a extração da planta;
- Abaixo do CE, a água encontra-se adsorvida na superfície das partículas com tal força que as plantas não a conseguem utilizar:



Embora as plantas consigam extrair água do solo até ao CE, existe um valor mínimo de teor de água (ou armazenamento) abaixo do qual o fazem com tanto custo que há stress hídrico;



p - parâmetro de gestão da rega, função da sensibilidade da cultura ao stress (adim) ($p < 1$)

$$RFU = RU \times p$$

RFU traduz um volume de água no solo facilmente disponível para as plantas

$$LRFU = RU - RFU = RU - RU \times p = RU \times (1 - p)$$

LRFU traduz um valor de armazenamento correspondente ao limite inferior da zona da RFU

p é função do poder evaporativo da atmosfera, da cultura e do solo.

Normalmente varia entre:

- 0.3 para plantas com raízes pouco profundas e ET_c maiores que 8 mm dia⁻¹,
- 0.7 para plantas com raízes profundas e $ET_c < 3$ mm dia⁻¹.

- $p = p_{tab} + 0.04 \times (5 - ET_c)$

Table 22 FAO 56

Crop	Maximum Root Depth ¹ (m)	p $ET_c = 5 \text{ mm d}^{-1}$
a. Small Vegetables		
Broccoli	0.4-0.6	0.45
Brussel Sprouts	0.4-0.6	0.45
Cabbage	0.5-0.8	0.45
Carrots	0.5-1.0	0.35
Cauliflower	0.4-0.7	0.45
Celery	0.3-0.5	0.20
Garlic	0.3-0.5	0.30
Lettuce	0.3-0.5	0.30
Onions - dry	0.3-0.6	0.30
- green	0.3-0.6	0.30
- seed	0.3-0.6	0.35
Spinach	0.3-0.5	0.20
Radishes	0.3-0.5	0.30
b. Vegetables – Solanum Family (<i>Solanaceae</i>)		
Egg Plant	0.7-1.2	0.45
Sweet Peppers (bell)	0.5-1.0	0.30
Tomato	0.7-1.5	0.40
c. Vegetables – Cucumber Family (<i>Cucurbitaceae</i>)		
Cantaloupe	0.9-1.5	0.45
Cucumber – Fresh Market	0.7-1.2	0.50
– Machine harvest	0.7-1.2	0.50
Pumpkin, Winter Squash	1.0-1.5	0.35
Squash, Zucchini	0.6-1.0	0.50
Sweet Melons	0.8-1.5	0.40
Watermelon	0.8-1.5	0.40
d. Roots and Tubers		
Beets, table	0.6-1.0	0.50
Cassava – year 1	0.5-0.8	0.35
– year 2	0.7-1.0	0.40
Parsnip	0.5-1.0	0.40
Potato	0.4-0.6	0.35
Sweet Potato	1.0-1.5	0.65
Turnip (and Rutabaga)	0.5-1.0	0.50
Sugar Beet	0.7-1.2	0.55 ³

Exercício 5

- a) Determine a RU e a RFU das culturas do morango e da batata doce para solo franco arenoso;
b) Represente graficamente RU, RFU e LRFU

Dados

Morango: Batata doce:

$$Z_r = 0.20 \text{ m} \quad Z_r = 1.3 \text{ m}$$

$$p = 0.25 \quad p = 0.65$$

Solo:

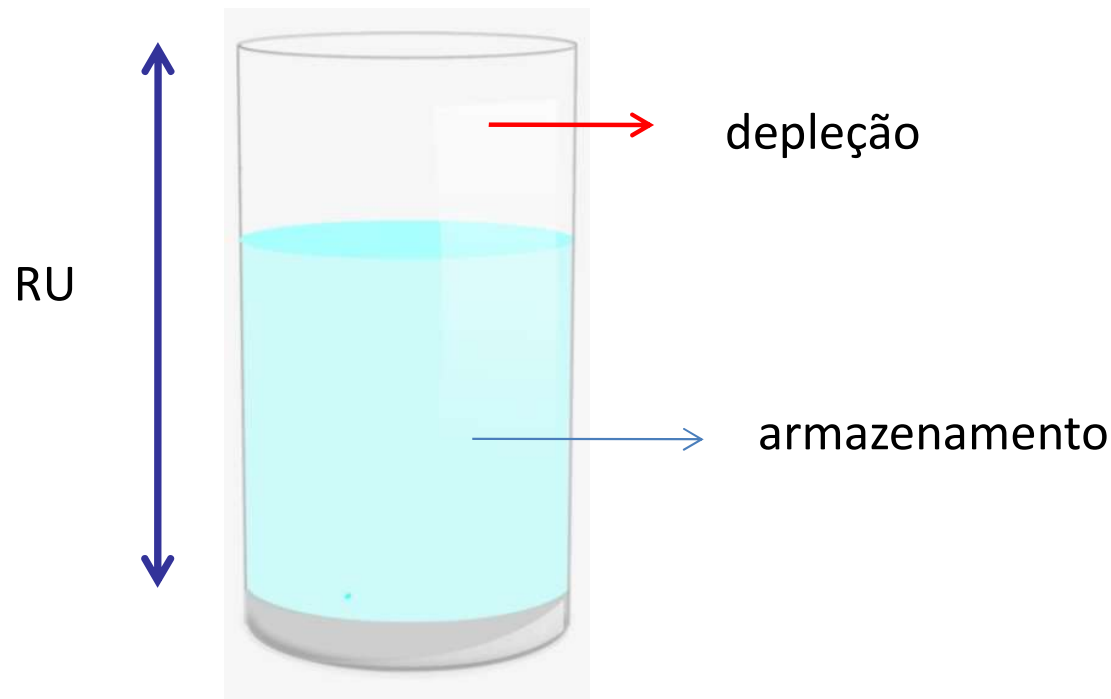
$$\theta_{CC} = 0.2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$\theta_{CE} = 0.1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

5.1.2. Depleção de água no solo e coeficiente de stress hídrico

Para além de ser expressa em armazenamento (A, mm), a água no solo pode também ser expressa em termos de **depleção** (D_p , mm) em relação à CC.

- Na capacidade de campo a depleção é _____
- À medida que a água no solo diminui devido à evapotranspiração, a depleção, _____
- Quando a depleção, D_p , é $>$ que a RFU _____



➤ Quando $D_p < RFU$

$$K_s = 1$$

➤ Quando $D_p > RFU$

$$K_s = \frac{RU - D_p}{RU - RFU} = \frac{\text{Reserva actual}}{\text{LRFU}}$$

sendo:

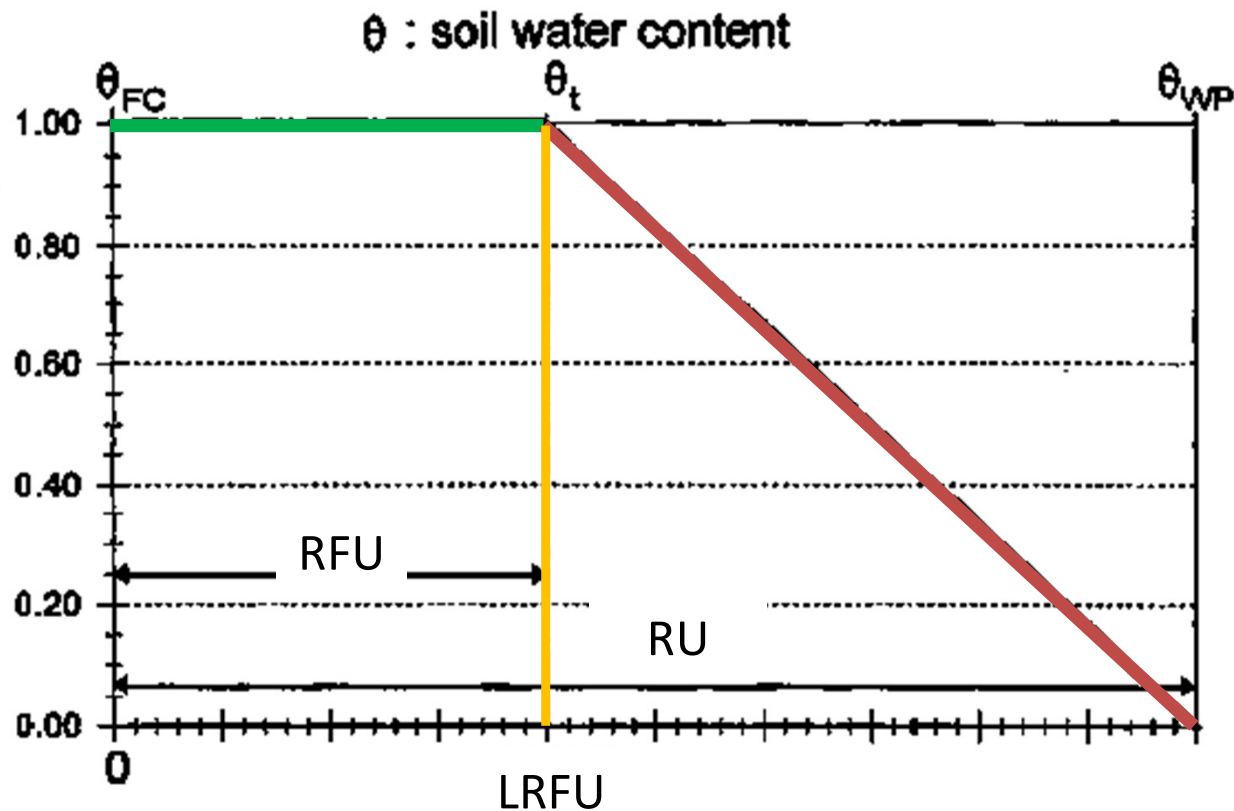
K_s o coeficiente de stress hídrico, dependente da água disponível no solo (0– 1);

D_p diferença entre a reserva de água à capacidade de campo e a reserva de água actual (mm);

RU a reserva utilizável de água no solo (mm);

p a fracção de RU que pode ser utilizada sem que a planta entre em stress hídrico.

K_s



Exercício 6

Determine, para uma cultura de tomate num solo limoso ($\theta_{CC} = 0.32$ e $\theta_{CE} = 0.12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$):

- RU, RFU e LRFU; *(160 mm; 64 mm; 96 mm)*
- Determine a depleção de água no solo nos dias em que o armazenamento (A, mm) de água no solo é 100 e 50 mm. *(60 e 110 mm)*
- Em algum desses dias há stress hídrico? Justifique *(no 2º dia)*
- De acordo com a alínea anterior determine o coeficiente de stress hídrico; *(1; 0.52)*
- Determine a evapotranspiração para os dois dias da alínea c), sendo a $ET_o = 6 \text{ mm d}^{-1}$.

Dados

cultura		
Zr	0,8	m
p	0,40	
Kc	1,20	

Exercício 7

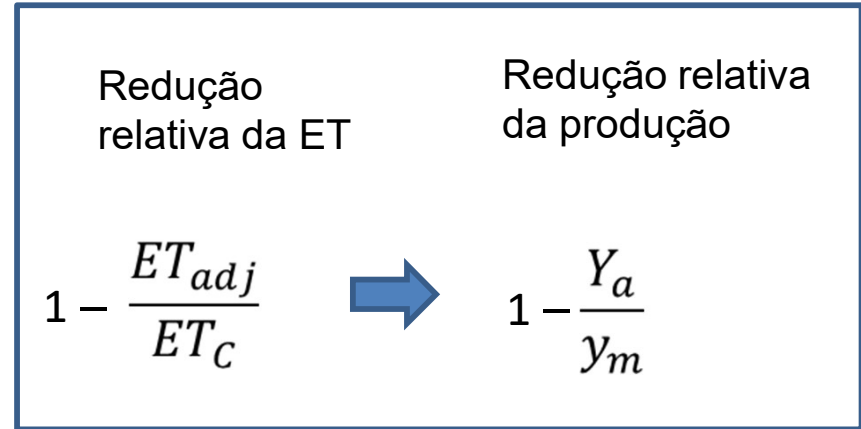
Estime o efeito do stress hídrico sobre a evapotranspiração de uma cultura de tomate plenamente desenvolvida ($Z_r = 0.8$ m, $p = 0.40$ e $K_c = 1.2$) cultivada num solo limoso ($\theta_{CC} = 0.32$ e $\theta_{CE} = 0.12$ cm³ cm⁻³) durante os próximos 10 dias, sendo D_p inicial = 55 mm, não sendo esperadas chuvas ou regas. A ET_o esperada para o decénio seguinte é 5 mm/dia. Apresente graficamente a evolução temporal da ET_c e da ET_{adj}

Solução:

Dias	ETc	Dp	Ks	ETadj
	mm	mm		mm
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

5.1.3 Relação produção/stress hídrico

Qual é a consequência da diminuição da ET_c sobre a produção esperada?



$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \cdot \left(1 - \frac{ET_{adj}}{ET_c} \right)$$

Modelo de Stewart

K_y coeficiente de stress hídrico, ou fator de redução da produção da cultura, que descreve a redução relativa da produção de acordo com a redução da ET_c causada pela escassez de água no solo (Tabelado);

ET_{adj} evapotranspiração ajustada (mm dia^{-1});

ET_c evapotranspiração cultural para condições padrão (mm dia^{-1});

Y_a produção atual da cultura

Y_m produção máxima esperada.

- No FAO N ° 33 “*Yield response to water*”, os valores de K_y são específicos da cultura e podem variar durante o ciclo cultural.
- Em geral, a diminuição do rendimento devido ao deficit hídrico durante o período vegetativo e maturação é relativamente pequena, enquanto durante os períodos de floração e de formação de produção será grande.

Os valores de K_y são específicos da cultura e variam ao longo do seu ciclo, de acordo com as fases de crescimento.

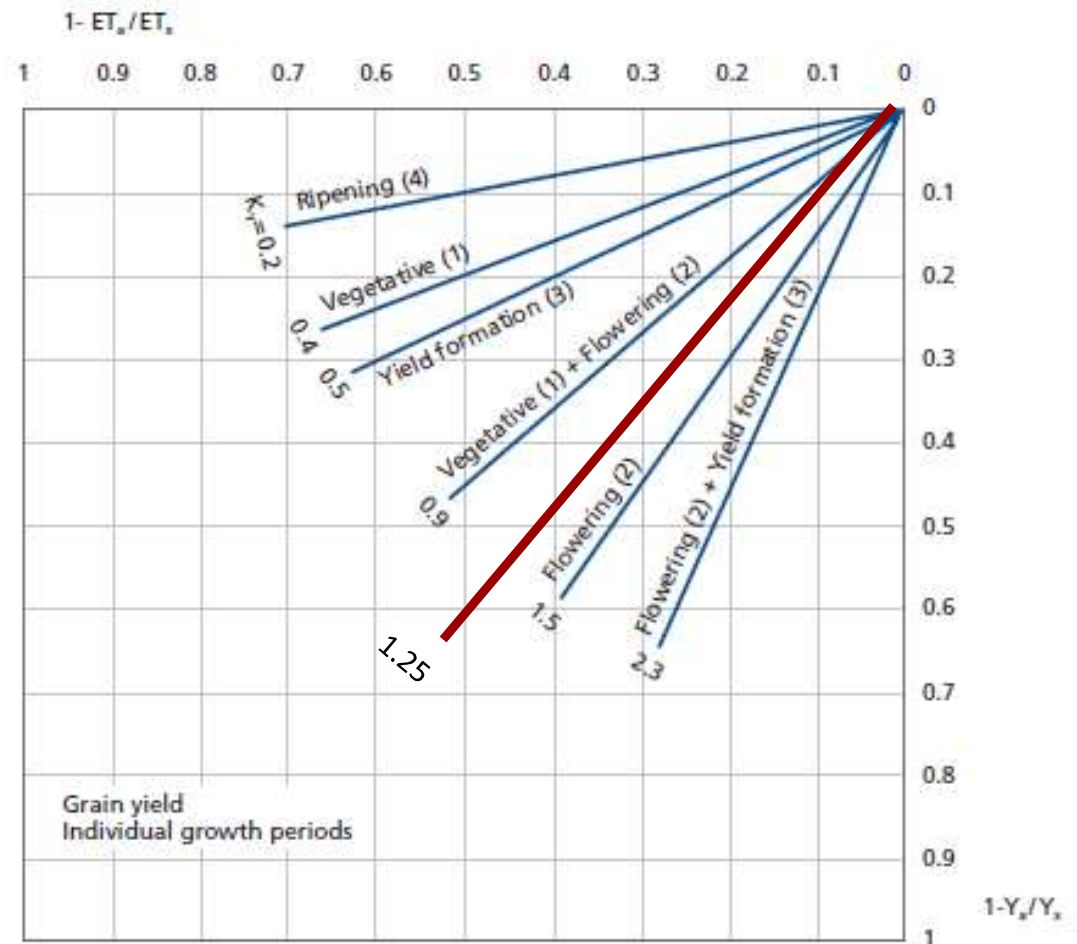
- $K_y > 1$: cultura muito sensível ao deficit, com reduções mais do que proporcionais da produção;
- $K_y < 1$: cultura tolerante ao deficit hídrico, recuperando parcialmente e exibindo reduções menos que proporcionais na produção.
- $K_y = 1$: a redução da produção é diretamente proporcional ao deficit.

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \cdot \left(1 - \frac{ET_{adj}}{ET_c}\right)$$

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \frac{\sum_i K_{yi} (ET_{ci} - ET_{ai})}{ET_c}$$

Exemplo: Milho

Quanto > o declive > o K_y , > a redução da produção para uma dada redução na ET_c



Valores do coeficiente de stress hídrico, K_y
(Tabela 24 FAO 56)

Crop	K_y	Crop	K_y
Alfalfa	1.1	Safflower	0.8
Banana	1.2-1.35	Sorghum	0.9
Beans	1.15	Soybean	0.85
Cabbage	0.95	Spring wheat	1.15
Cotton	0.85	Sugarbeet	1.0
Groundnuts	0.70	Sugarcane	1.2
Maize	1.25	Sunflower	0.95
Onion	1.1	Tomato	1.05
Peas	1,15	Watermelon	1.1
Pepper	1.1	Winter wheat	1.05
Potato	1.1		

Nota: o FAO 33 apresenta uma tabela com valores de K_y por fase do ciclo

Resumo do procedimento de cálculo para a estimativa da quebra da produção devida ao stress hídrico:

- a) Estimativa da produção máxima (Y_m) da cultura supondo que não há limitação de factores agronómicos (por exemplo, água, fertilizantes, pragas e doenças);
- b) Cálculo da evapotranspiração máxima (ET_c) para condições padrão;
- c) Cálculo da evapotranspiração real das culturas (ET_{adj}) sob a situação específica;
- d) Cálculo da produção real ou actual (Y_a), através da seleção adequada do fator de resposta (K_y) para o ciclo ou para as diferentes fases de crescimento.

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \cdot \left(1 - \frac{ET_{adj}}{ET_c} \right)$$

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \frac{\sum_i K_{yi} (ET_{ci} - ET_{ai})}{ET_c}$$

Exercício 8

Considere que uma cultura do feijão em solo franco. O K_y para esta cultura é 1.15 (FAO Irrigation and Drainage Paper No 33, Tabela 24).

- a) Compare o efeito de diferentes níveis de redução da evapotranspiração sobre a produção;
- b) Se a produção máxima for de 9 000 kg ha⁻¹, determine a produção a esperar quando o déficit de ET médio ao longo do ciclo é de 20%.

Soluções:

a)

ET_{adj}/ET_c	$1-ET_{adj}/ET_c$	$1-Y_a/Y_{max}$	Y_a/Y_{max}
			(%)
1			
0.9			
0.8			
0.7			
0.6			

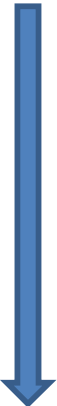
Exercício 9

Considere a cultura do milho. Considerando que houve restrições no uso da água de rega no final do ciclo, levando a uma redução da ET , determine o impacto que teve sobre a produção.

Qual a redução que ocorreria caso o stress tivesse ocorrido durante a fase intermédia?


	ET_c	ET_{adj}	K_y
Fase de desenvolvimento vegetativo	50	50	0.4
Fase intermédia	250	250	2.3
Fase final	100	70	0.2

O modelo de Stewart pode ser invertida de modo obter uma estimativa grosseira da ET_{adj} **para todo o ciclo**:


$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \cdot \left(1 - \frac{ET_{adj}}{ET_c}\right)$$

$$\frac{ET_{adj}}{ET_c} = K_s = 1 - \frac{1}{K_y} \left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right)$$

- Estudos de balanço hídrico regional
- Estudos de exaurimento ou recarga de aquíferos
- Estimativa de consumos de água no passado



não deve ser usada para valores diários ou semanais

Exercício 10

A produção de feijão numa determinada zona é de 1100 kg/ha. A produção potencial na zona para a variedade utilizada na região, na ausência de stress hídrico e com boas práticas agronômicas, é de 1800 kg/ha.

Sendo o K_y do feijão de 1.15 e a ET_c total de 350 mm, faça uma estimativa de ET_{adj} da cultura nesta região.
