



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

3 - Necessidade hídrica dos cultivos



3.1 - Introdução à Evapotranspiração dos cultivos

→ $ET_c \neq ET_o$ → arquitetura da planta
resistência aerodinâmica

↙
Essas diferenças estão incorporadas
no coeficiente de cultura (k_c)



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

- Diferenças na evaporação e transpiração entre campos cultivados e a superfície gramada podem ser representadas por um único k_c ou separadas em dois coeficientes: coef. Basal (k_{cb}) e o coef. de evaporação do solo (k_e).

$$ET_c = k_c ET_o$$

$$ET_c = (k_{cb} + k_e) ET_o$$



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

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

K_{cb} é a razão entre ET_c e ET_o quando a camada superficial do solo se encontra seca, mas não há déficit hídrico.

K_e representa a evaporação do solo úmido.

$K_c = K_{cb} + K_e$, que representa a média temporal dos efeitos conjugados da evaporação e da transpiração;



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

- k_c representa a soma das quatro características principais que diferencia a cultura de uma grama:
 - altura da planta
 - albedo da superfície
 - resistência aerodinâmica
 - evaporação do solo (quando exposto)

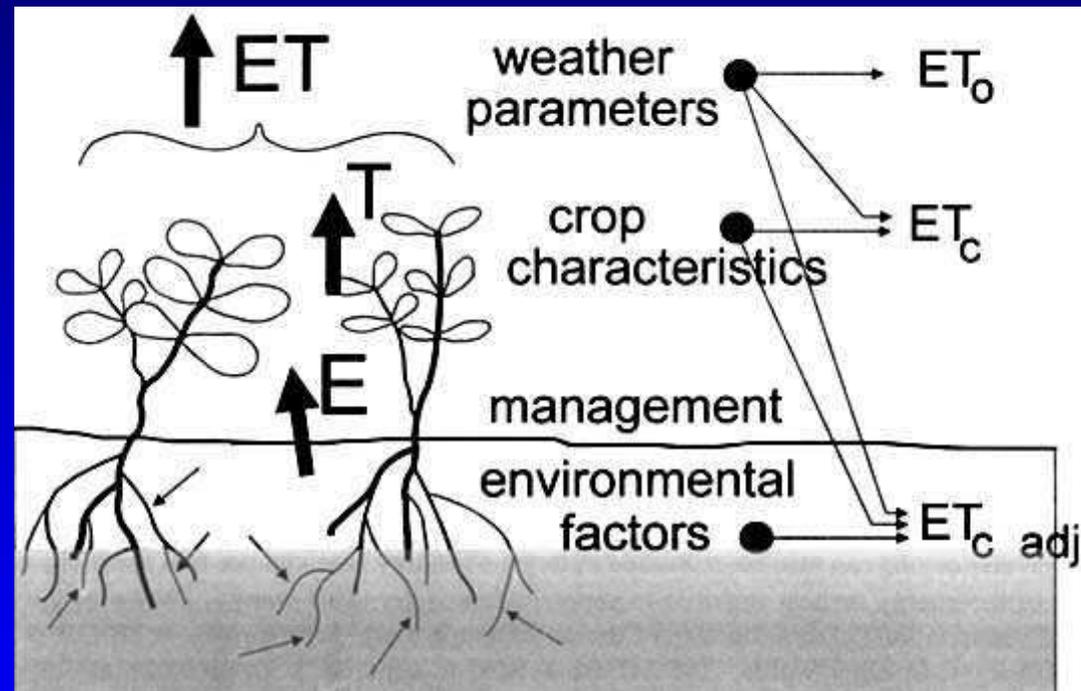


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

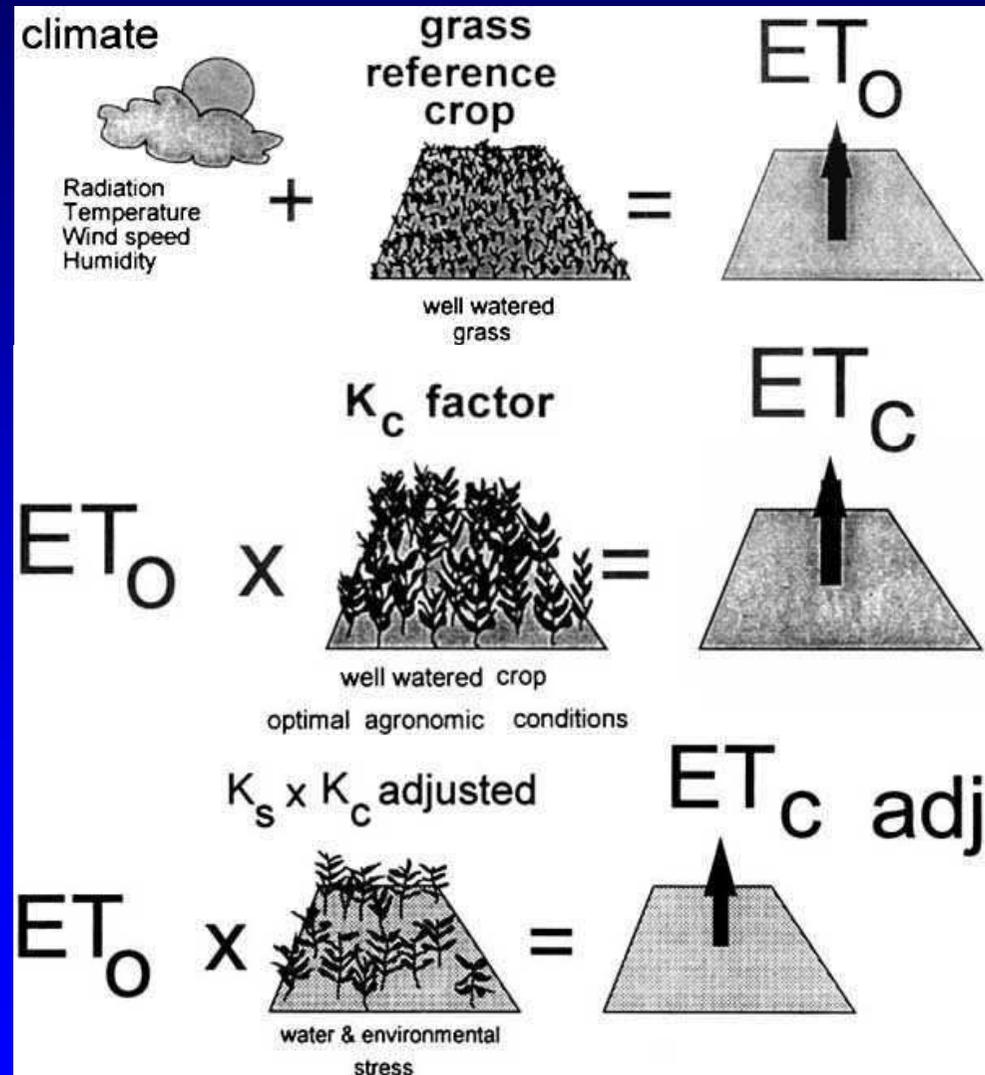
- ET_c representa a evapotranspiração dos cultivos sob determinadas condições padrão; não há limitação do crescimento devido a deficiência hídrica, densidade de plantio, doença, qualidade da semente etc.
- Caso essa situação não esteja presente, há necessidade da estimativa de uma ET_c_{aj} , que será discutida mais adiante.



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



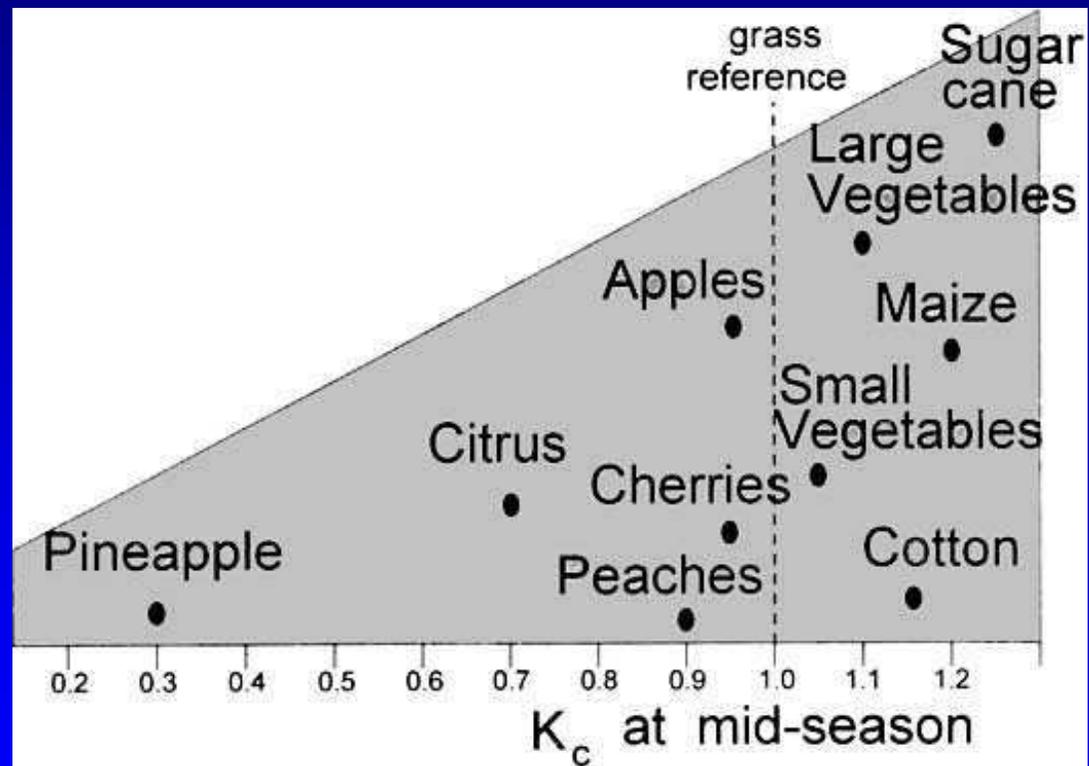


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

- Fatores determinantes no coeficiente de cultivo
 - tipo de cultura
 - clima
 - evaporação do solo
 - estágios de desenvolvimento

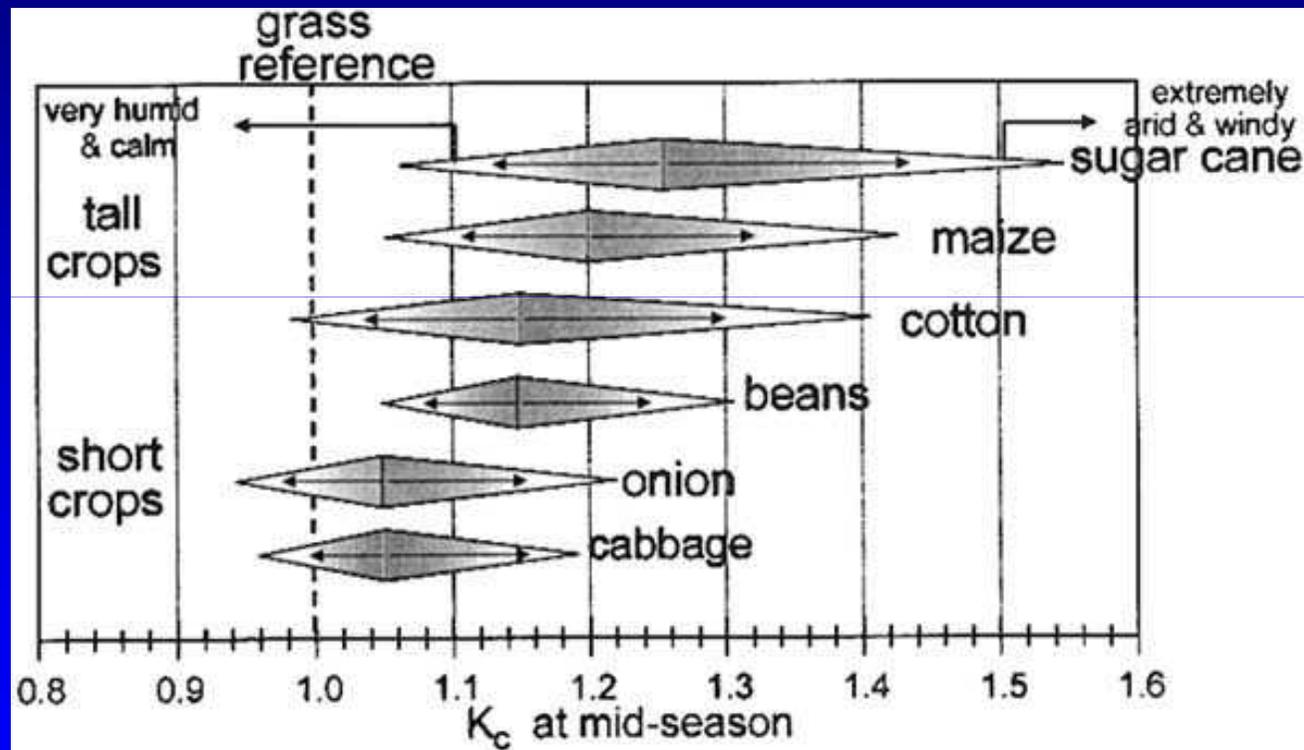


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



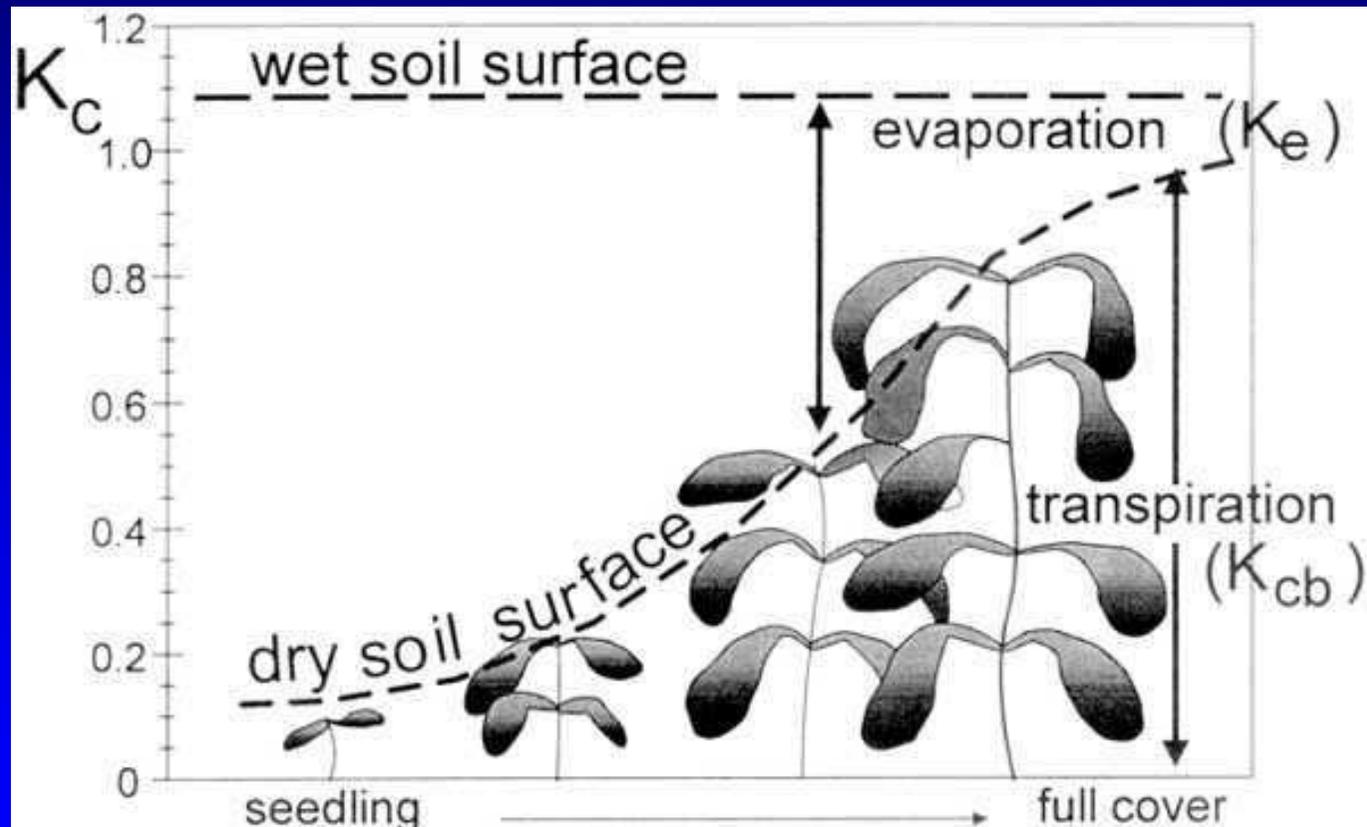


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



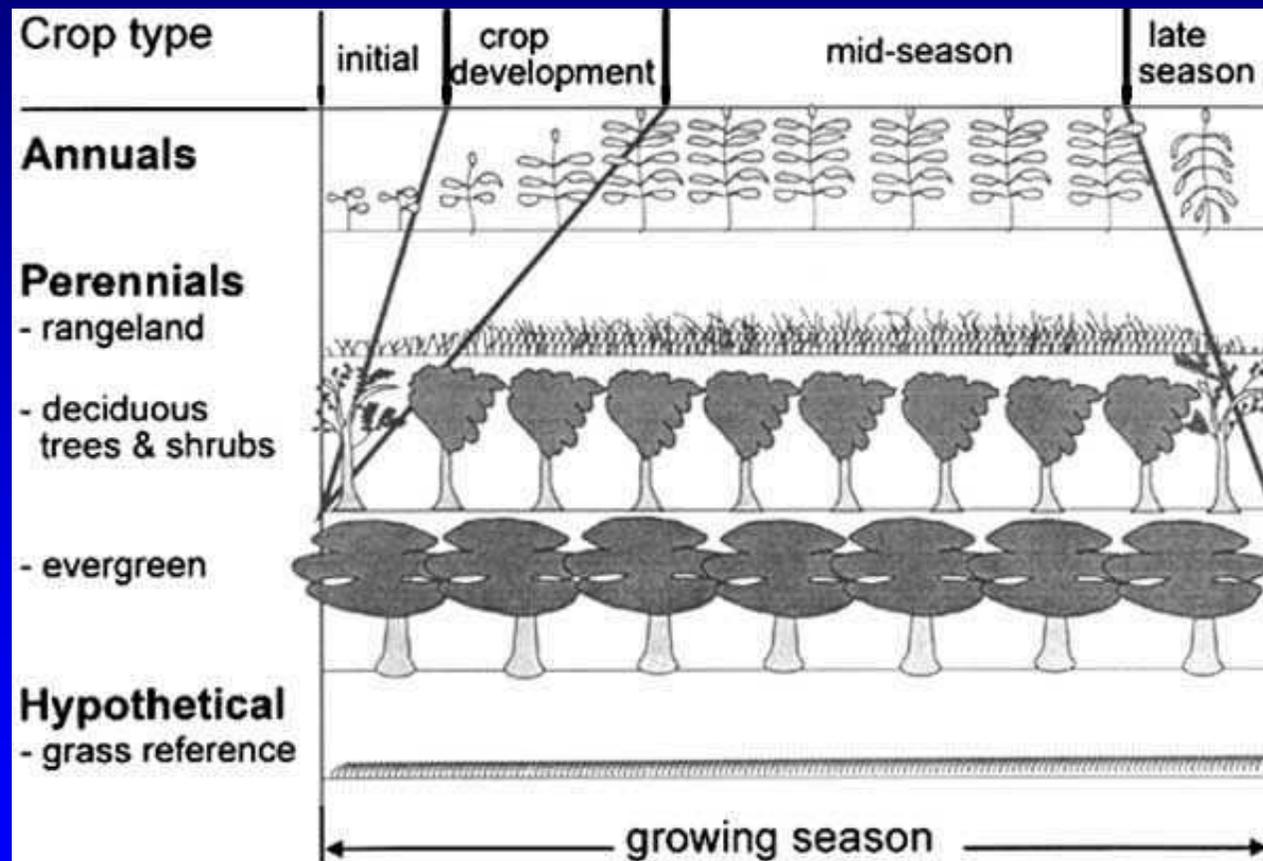


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



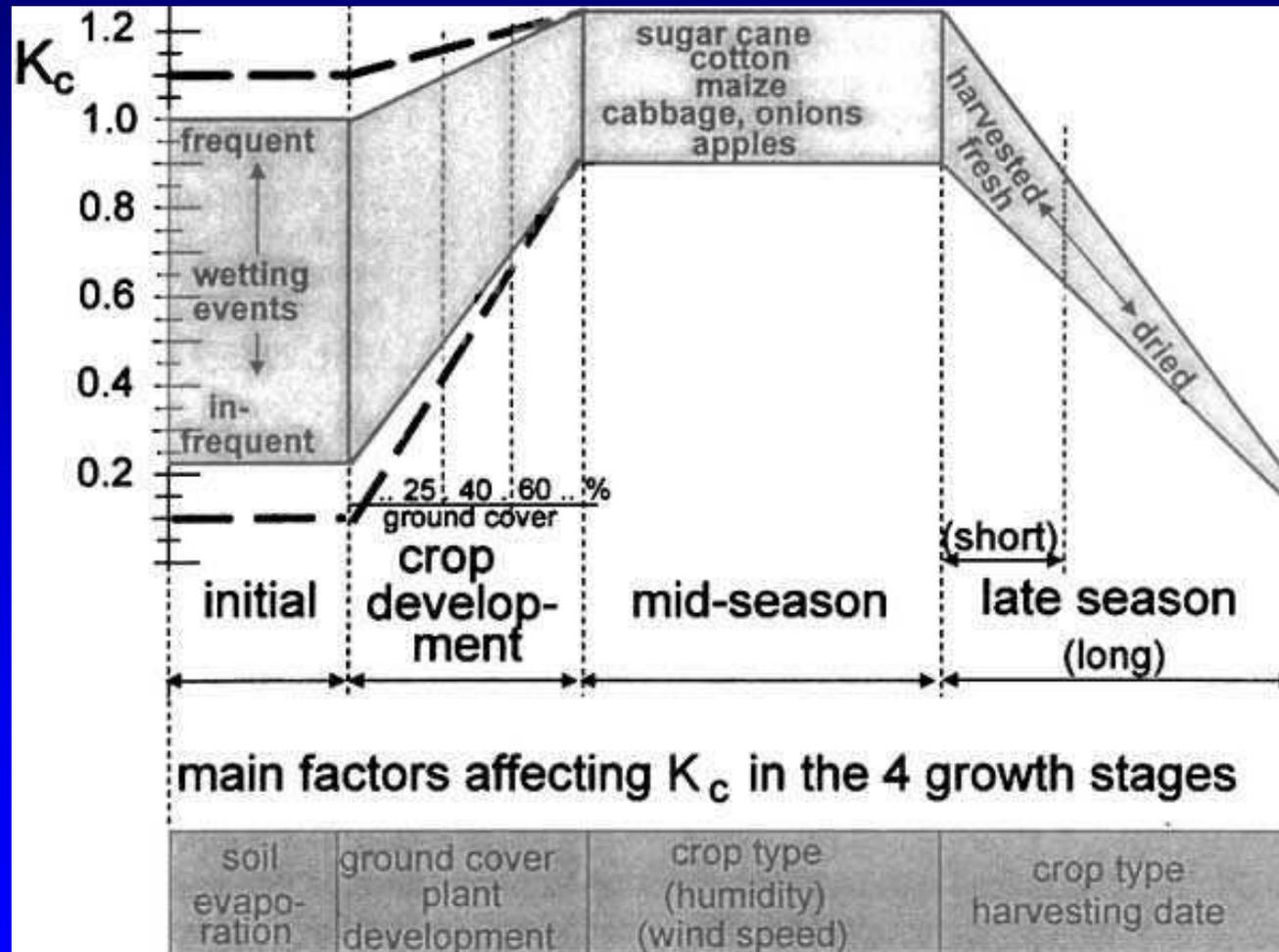


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



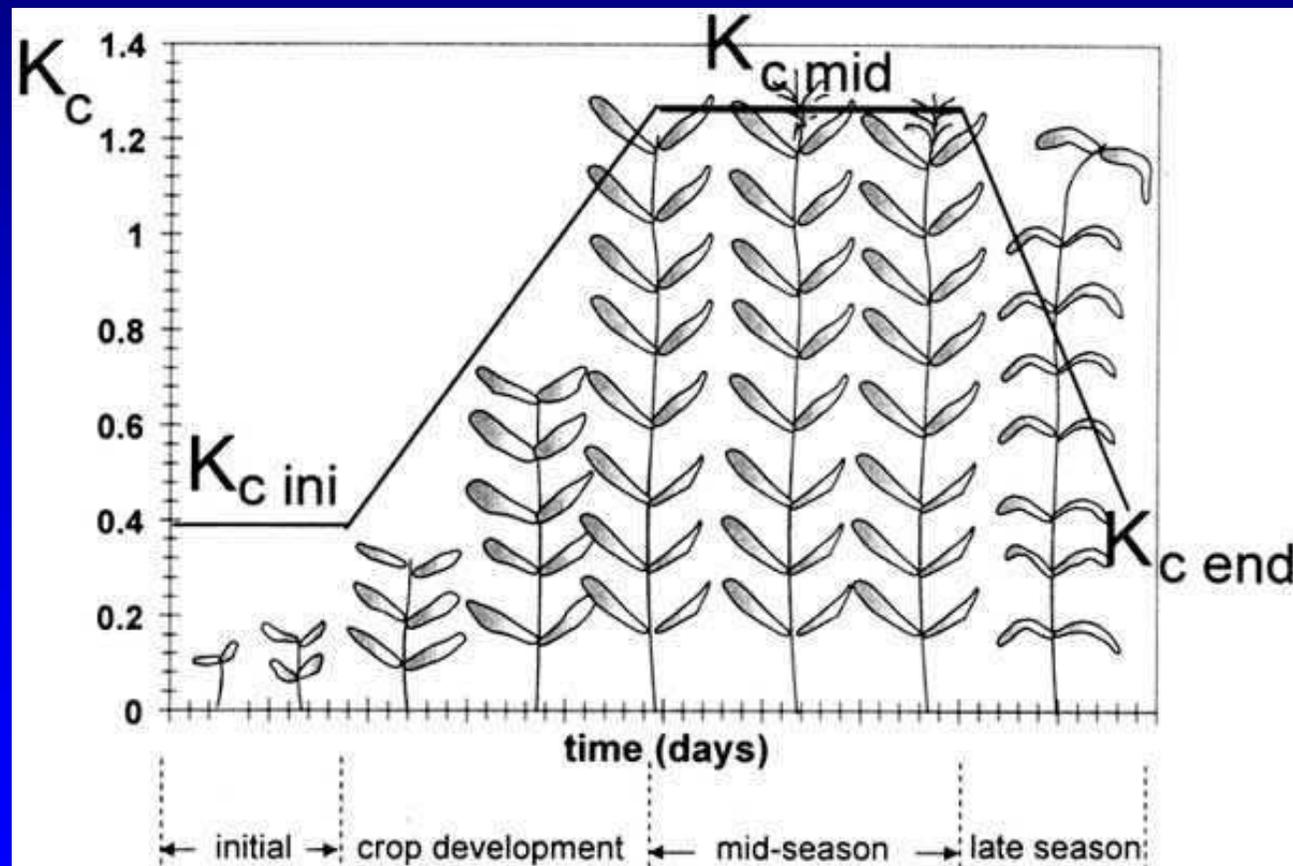


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA





IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

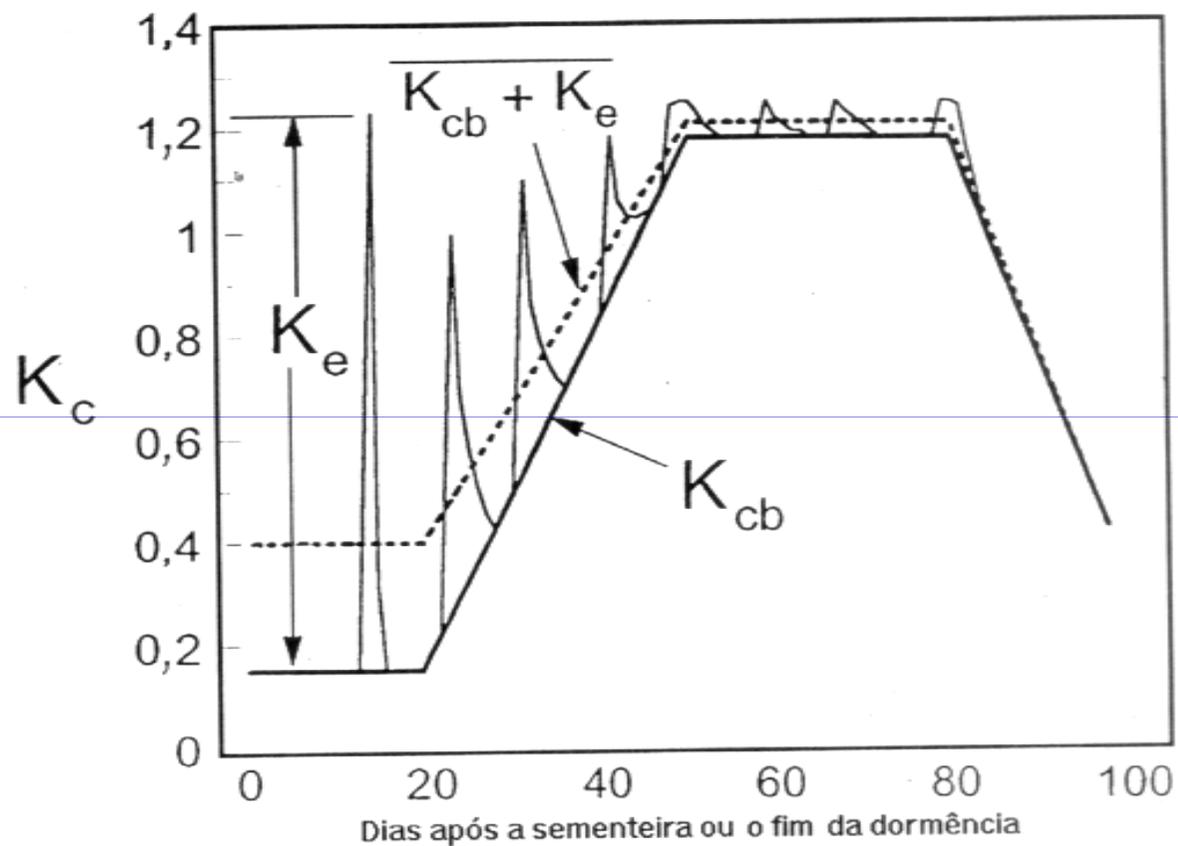


FIGURA 1. Definição dos coeficientes culturais, mostrando o coeficiente de base K_{cb} , o coeficiente da evaporação do solo K_e e o K_c médio, média temporal $\overline{K_{cb} + K_e}$.

Crop		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 (<i>Solanaceae</i>)	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 (<i>Cucurbitaceae</i>)	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	
Watermelon	0.4	1.00	0.75	0.4	
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	

e. Legumes (<i>Leguminosae</i>)		0.4	1.15	0.55	
Beans, green		0.5	1.05 ²	0.90	0.4
Beans, dry and Pulses		0.4	1.15 ²	0.35	0.4
Chick pea			1.00	0.35	0.4
Fababean (broad bean)					
	- Fresh	0.5	1.15 ²	1.10	0.8
	- Dry/Seed	0.5	1.15 ²	0.30	0.8
Grabanzo		0.4	1.15	0.35	0.8
Green Gram and Cowpeas			1.05	0.60-0.35 ⁶	0.4
Groundnut (Peanut)			1.15	0.60	0.4
Lentil			1.10	0.30	0.5
Peas					
	- Fresh	0.5	1.15 ²	1.10	0.5
	- Dry/Seed		1.15	0.30	0.5
Soybeans			1.15	0.50	0.5-1.0
f. Perennial Vegetables (with winter dormancy and initially bare or mulched soil)		0.5	1.00	0.80	
Artichokes		0.5	1.00	0.95	0.7
Asparagus		0.5	0.95 ⁷	0.30	0.2-0.8
Mint		0.60	1.15	1.10	0.6-0.8
Strawberries		0.40	0.85	0.75	0.2

g. Fibre Crops		0.35			
Cotton			1.15-1.20	0.70-0.50	1.2-1.5
Flax			1.10	0.25	1.2
Sisal ⁸			0.4-0.7	0.4-0.7	1.5
h. Oil Crops		0.35	1.15	0.35	
Castorbean (<i>Ricinus</i>)			1.15	0.55	0.3
Rapeseed, Canola			1.0-1.15 ⁹	0.35	0.6
Safflower			1.0-1.15 ⁹	0.25	0.8
Sesame			1.10	0.25	1.0
Sunflower			1.0-1.15 ⁹	0.35	2.0
i. Cereals		0.3	1.15	0.4	
Barley			1.15	0.25	1
Oats			1.15	0.25	1
Spring Wheat			1.15	0.25-0.4 ¹⁰	1
Winter Wheat					
	- with frozen soils	0.4	1.15	0.25-0.4 ¹⁰	1
	- with non-frozen soils	0.7	1.15	0.25-0.4 ¹⁰	
Maize, Field (grain) (<i>field corn</i>)			1.20	0.60-0.35 ¹¹	2
Maize, Sweet (<i>sweet corn</i>)			1.15	1.05 ¹²	1.5
Millet			1.00	0.30	1.5
Sorghum					
	- grain		1.00-1.10	0.55	1-2
	- sweet		1.20	1.05	2-4
Rice		1.05	1.20	0.90-0.60	1

j. Forages					
Alfalfa Hay					
	- averaged cutting effects	0.40	0.95 ¹³	0.90	0.7
	- individual cutting periods	0.40 ¹⁴	1.20 ¹⁴	1.15 ¹⁴	0.7
	- for seed	0.40	0.50	0.50	0.7
Bermuda hay					
	- averaged cutting effects	0.55	1.00 ¹³	0.85	0.35
	- Spring crop for seed	0.35	0.90	0.65	0.4
Clover hay, Berseem					
	- averaged cutting effects	0.40	0.90 ¹³	0.85	0.6
	- individual cutting periods	0.40 ¹⁴	1.15 ¹⁴	1.10 ¹⁴	0.6
Rye Grass hay					
	- averaged cutting effects	0.95	1.05	1.00	0.3

Sudan Grass hay (annual)					
	- averaged cutting effects	0.50	0.90 ¹⁴	0.85	1.2
	- individual cutting periods	0.50 ¹⁴	1.15 ¹⁴	1.10 ¹⁴	1.2
Grazing Pasture					
	- Rotated Grazing	0.40	0.85-1.05	0.85	0.15-0.30
	- Extensive Grazing	0.30	0.75	0.75	0.10
Turf grass					
	- cool season ¹⁵	0.90	0.95	0.95	0.10
	- warm season ¹⁵	0.80	0.85	0.85	0.10
k. Sugar Cane		0.40	1.25	0.75	3

I. Tropical Fruits and Trees					
Banana					
	- 1 st year	0.50	1.10	1.00	3
	- 2 nd year	1.00	1.20	1.10	4
Cacao					
		1.00	1.05	1.05	3
Coffee					
	- bare ground cover	0.90	0.95	0.95	2-3
	- with weeds	1.05	1.10	1.10	2-3
Date Palms					
		0.90	0.95	0.95	8
Palm Trees					
		0.95	1.00	1.00	8
Pineapple ¹⁶					
	- bare soil	0.50	0.30	0.30	0.6-1.2
	- with grass cover	0.50	0.50	0.50	0.6-1.2
Rubber Trees					
		0.95	1.00	1.00	10
Tea					
	- non-shaded	0.95	1.00	1.00	1.5
	- shaded ¹⁷	1.10	1.15	1.15	2

m. Grapes and Berries					
Berries (bushes)		0.30	1.05	0.50	1.5
Grapes					
	- Table or Raisin	0.30	0.85	0.45	2
	- Wine	0.30	0.70	0.45	1.5-2
Hops		0.3	1.05	0.85	5
n. Fruit Trees					
Almonds, no ground cover		0.40	0.90	0.65 ¹⁸	5
Apples, Cherries, Pears ¹⁹					
	- no ground cover, killing frost	0.45	0.95	0.70 ¹⁸	4
	- no ground cover, no frosts	0.60	0.95	0.75 ¹⁸	4
	- active ground cover, killing frost	0.50	1.20	0.95 ¹⁸	4
	- active ground cover, no frosts	0.80	1.20	0.85 ¹⁸	4

Apricots, Peaches, Stone Fruit ^{19, 20}					
	- no ground cover, killing frost	0.45	0.90	0.65 ¹⁸	3
	- no ground cover, no frosts	0.55	0.90	0.65 ¹⁸	3
	- active ground cover, killing frost	0.50	1.15	0.90 ¹⁸	3
	- active ground cover, no frosts	0.80	1.15	0.85 ¹⁸	3
Avocado, no ground cover		0.60	0.85	0.75	3
Citrus, no ground cover ²¹					
	- 70% canopy	0.70	0.65	0.70	4
	- 50% canopy	0.65	0.60	0.65	3
	- 20% canopy	0.50	0.45	0.55	2
Citrus, with active ground cover or weeds ²²					
	- 70% canopy	0.75	0.70	0.75	4
	- 50% canopy	0.80	0.80	0.80	3
	- 20% canopy	0.85	0.85	0.85	2

Conifer Trees ²³	1.00	1.00	1.00	10
Kiwi	0.40	1.05	1.05	3
Olives (40 to 60% ground coverage by canopy) ²⁴	0.65	0.70	0.70	3-5
Pistachios, no ground cover	0.40	1.10	0.45	3-5
Walnut Orchard ¹⁹	0.50	1.10	0.6518	4-5
o. Wetlands - temperate climate				
Cattails, Bulrushes, killing frost	0.30	1.20	0.30	2
Cattails, Bulrushes, no frost	0.60	1.20	0.60	2
Short Veg., no frost	1.05	1.10	1.10	0.3
Reed Swamp, standing water	1.00	1.20	1.00	1-3
Reed Swamp, moist soil	0.90	1.20	0.70	1-3
p. Special				
Open Water, < 2 m depth or in subhumid climates or tropics		1.05	1.05	
Open Water, > 5 m depth, clear of turbidity, temperate climate		0.6525	1.2525	

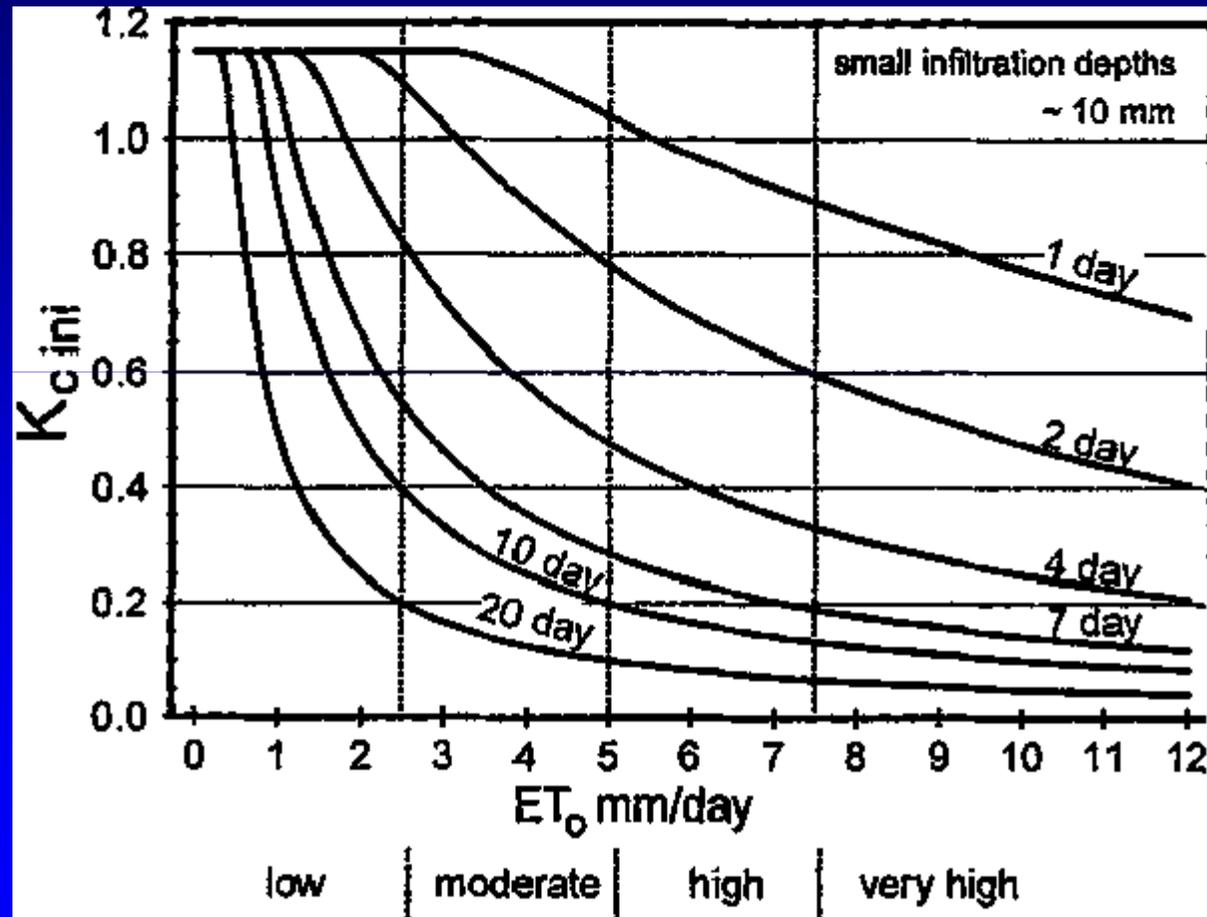


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

- Coeficiente de cultivo para o estágio inicial (kc_{ini})
 - intervalo entre irrigações ou chuvas
 - demanda evaporimétrica
 - quantidade de água aplicada ou disponível na camada superficial do do slo

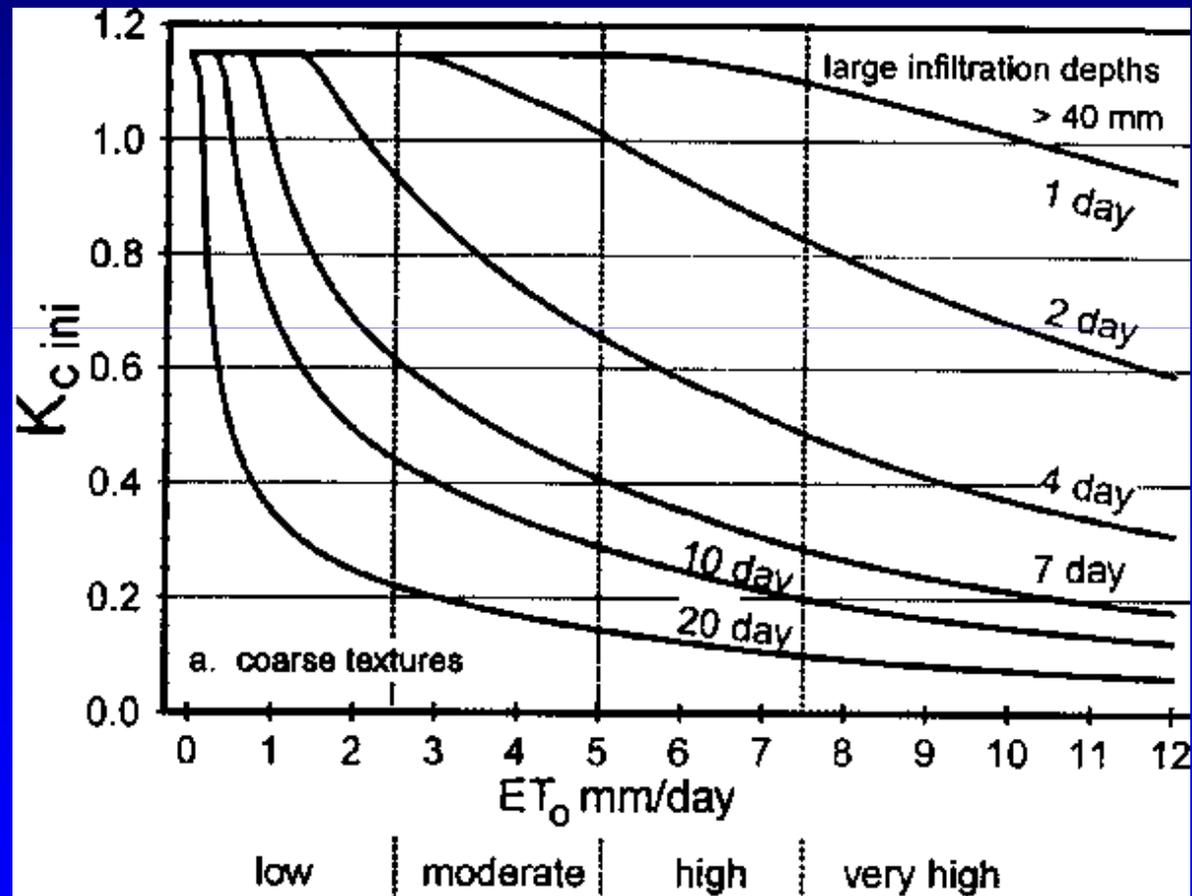


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



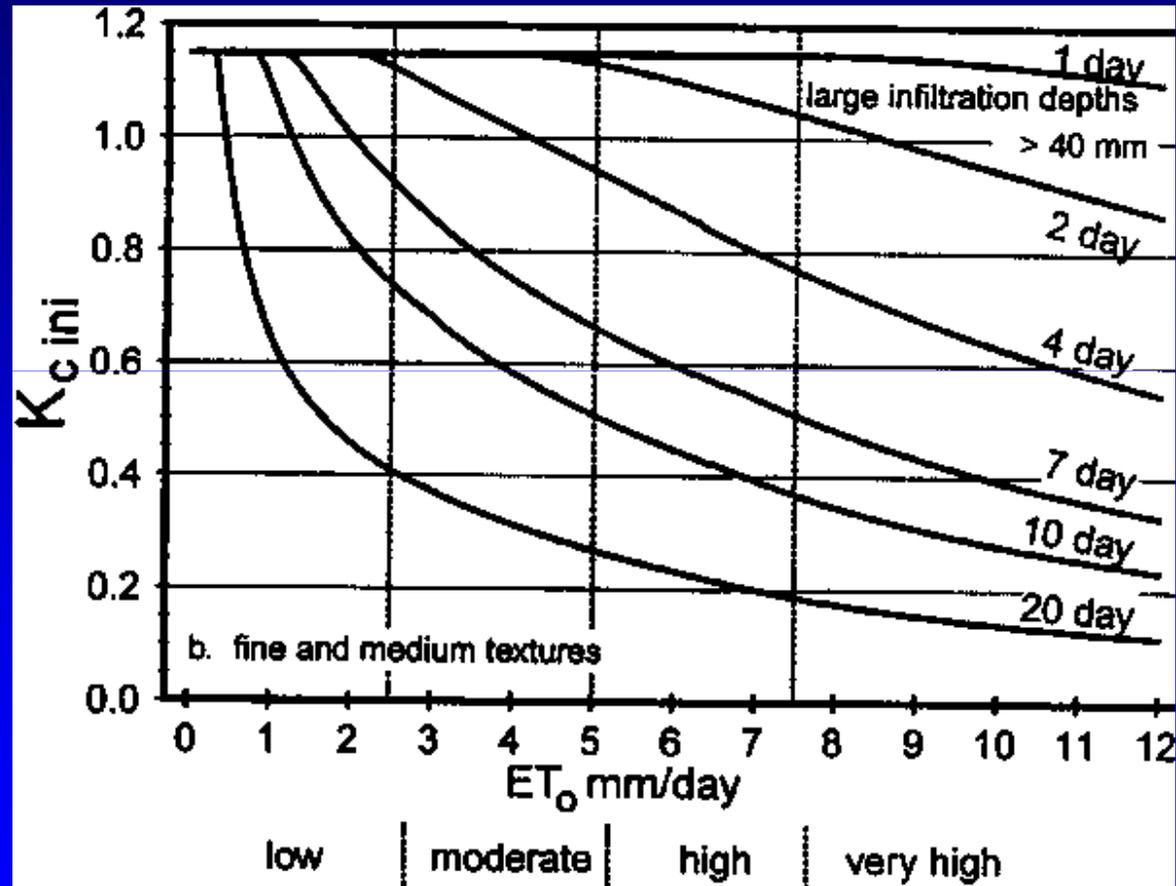


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA





IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA





IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

$$K_{c_{ini}} = K_{c_{ini}}(\text{Fig29}) + \frac{I - 10}{40 - 10} [K_{c_{ini}}(\text{Fig30}) - K_{c_{ini}}(\text{Fig29})]$$

$$K_{c_{ini}} = 1,41704 - 0,092412.ETo - 0,11001.IE + 0,0042672.ETo^2 + 0,0033743.IE^2 + 0,00028724.ETo.IE$$



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

- Coeficiente de cultivo para o estágio médio (Kc_{med})
 - condições climáticas (UR e Vv)

$$Kc_{mid} = Kc_{mid(Tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)].(h / 3)^{0,3}$$



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

- Coeficiente de cultivo para o estágio final (Kc_{end})
 - reflete as características das culturas e as condições de manejo da água

$$Kc_{end} = Kc_{end(Tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)].(h/3)^{0,3}$$



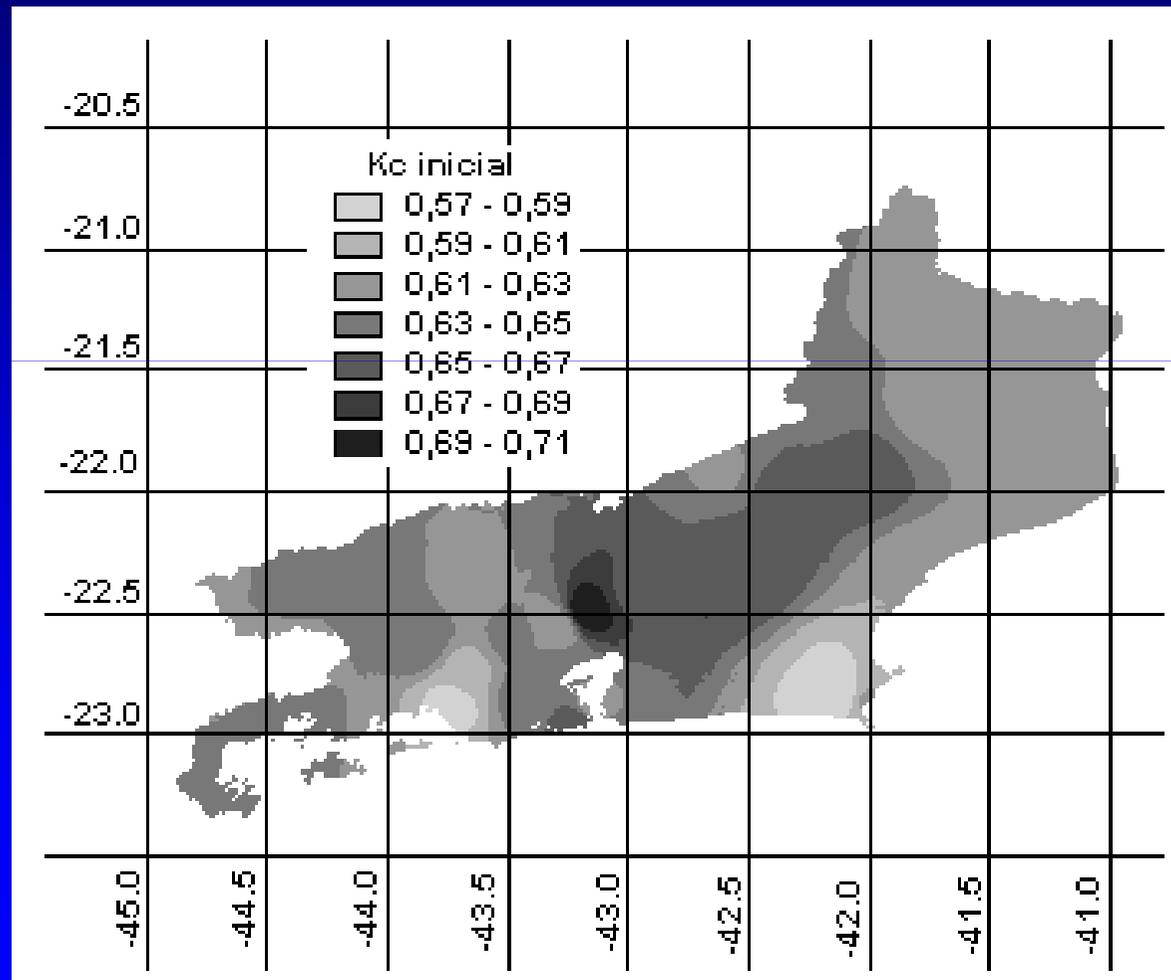
IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

- Exemplo

CARVALHO, Daniel Fonseca de, CRUZ, Eleandro Silva da, SOUZA, Wanderley de Jesus, SILVA, Wilson Araújo da, ALVES SOBRINHO, Teodorico Demanda hídrica do milho de cultivo de inverno no estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.*, v.10, p.112 - 118, 2006.

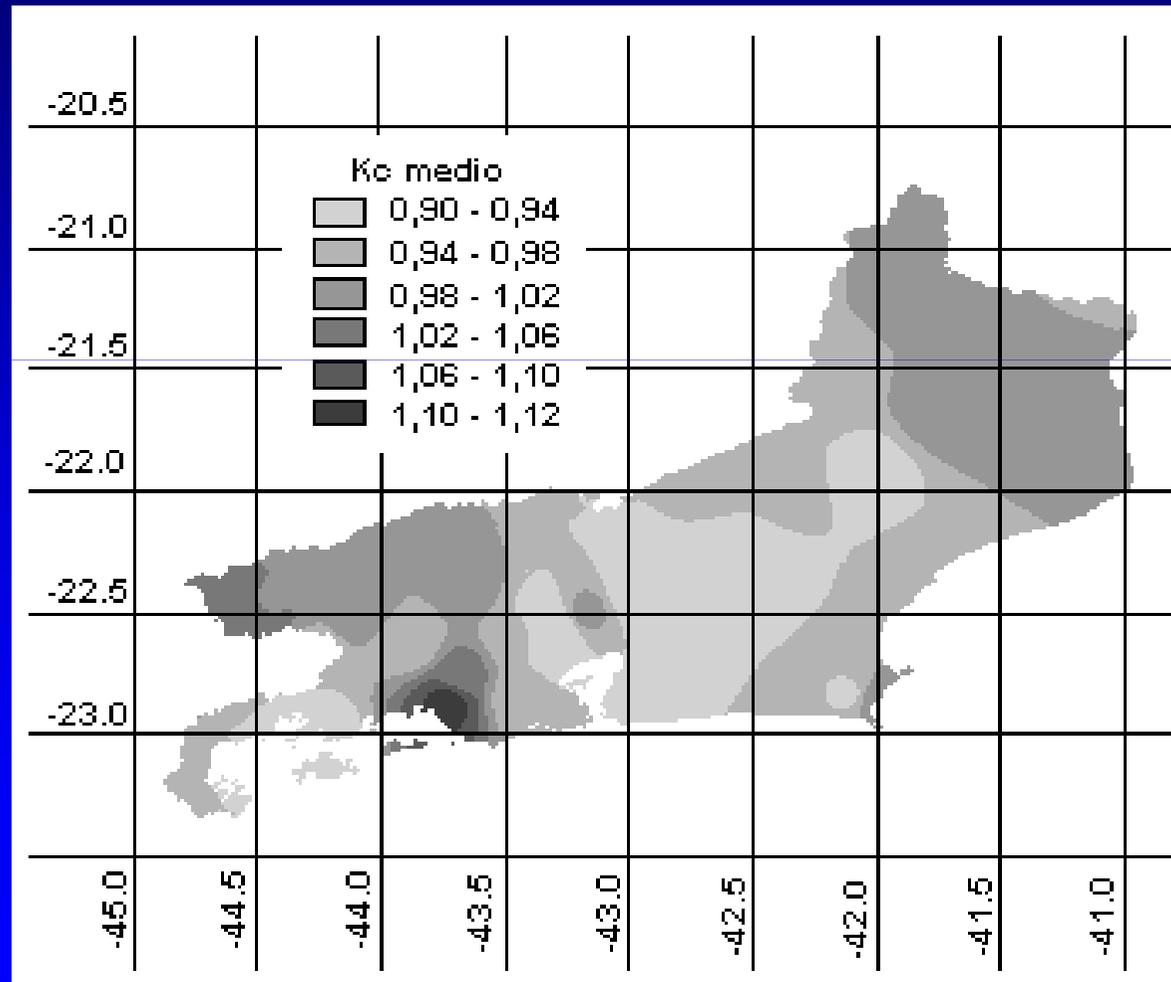


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



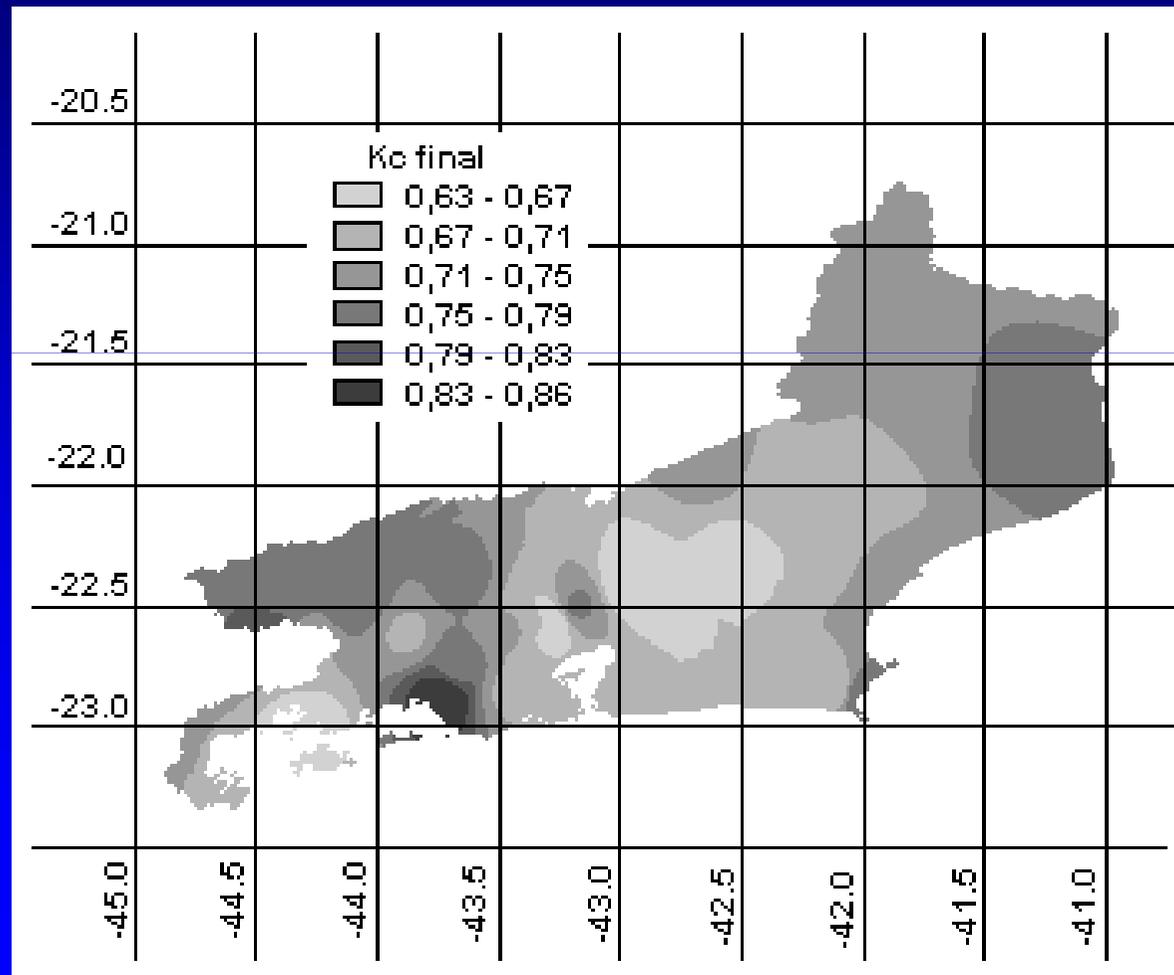


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



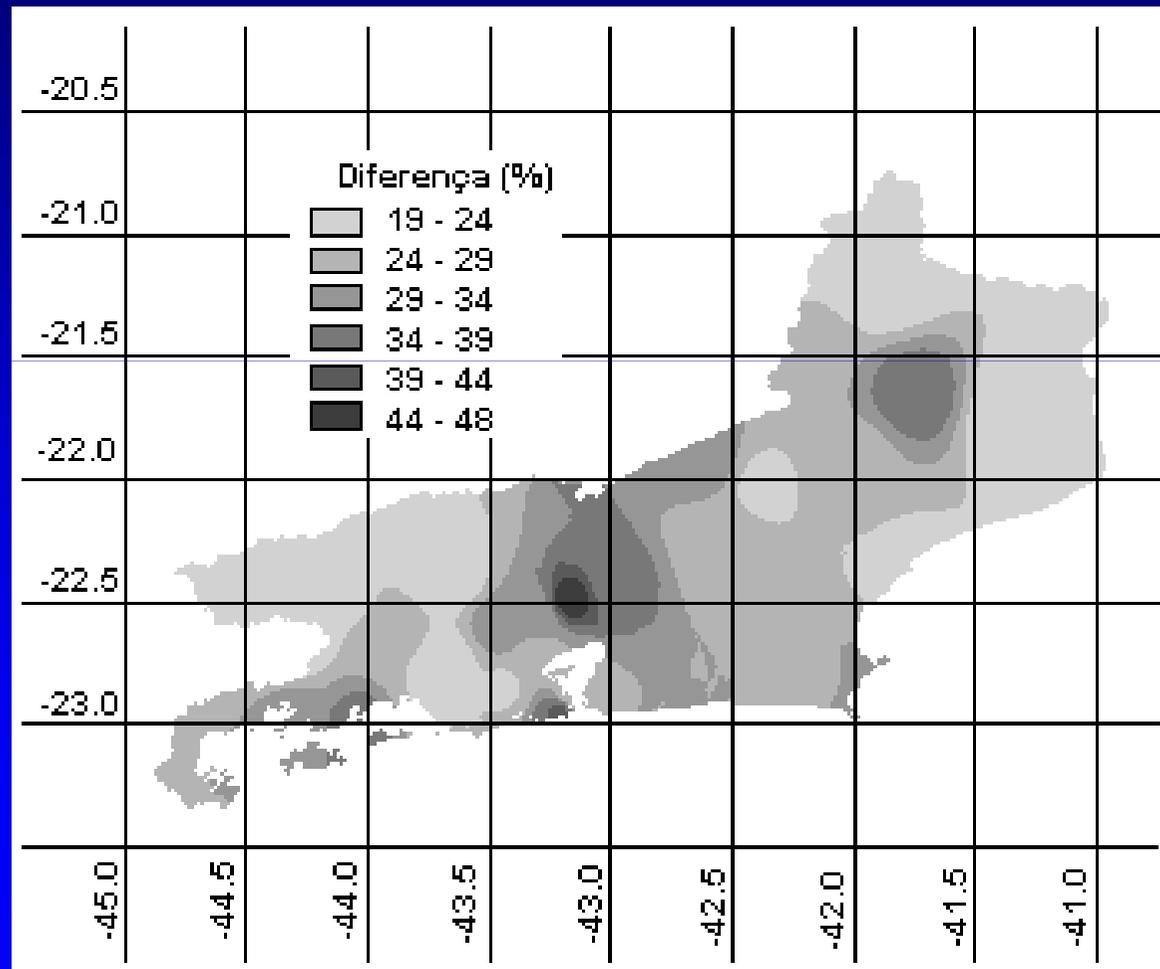


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



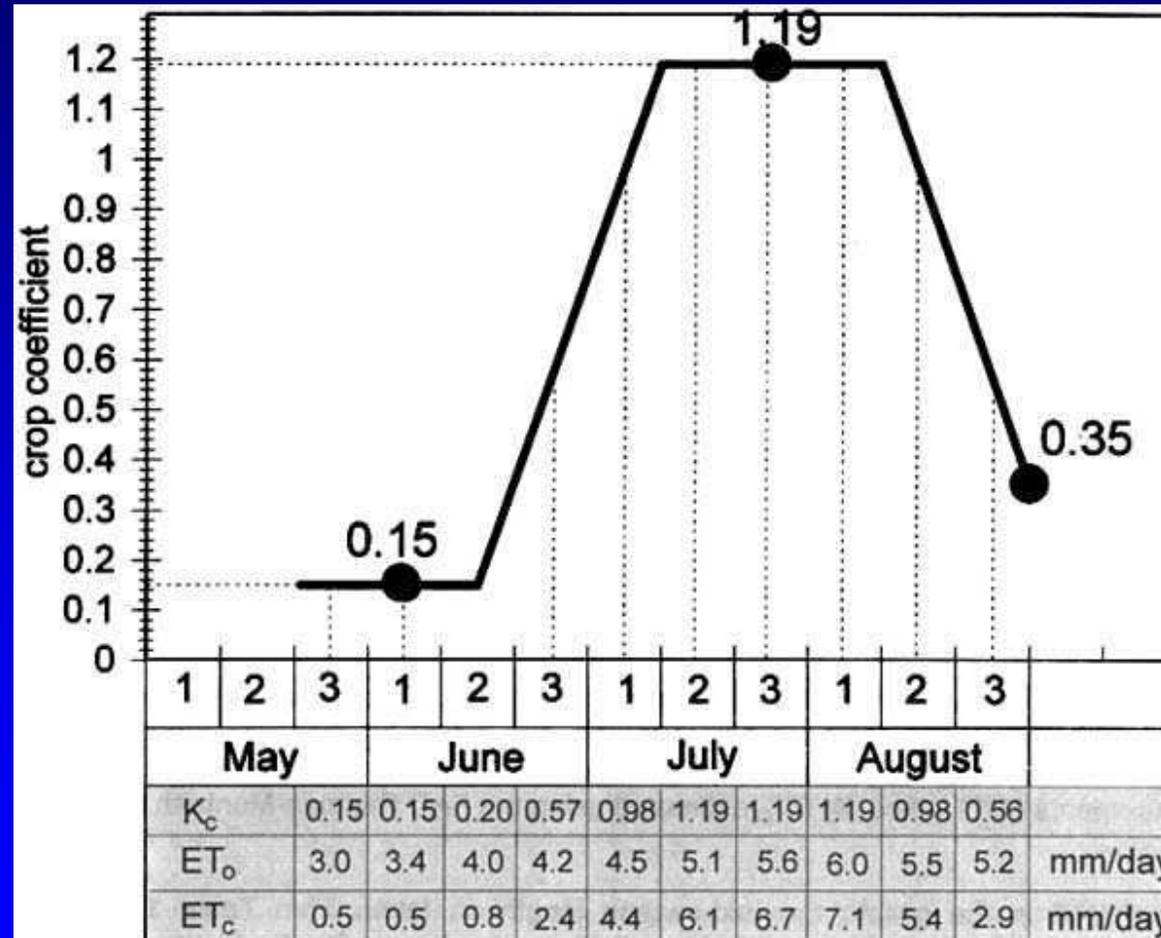


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA





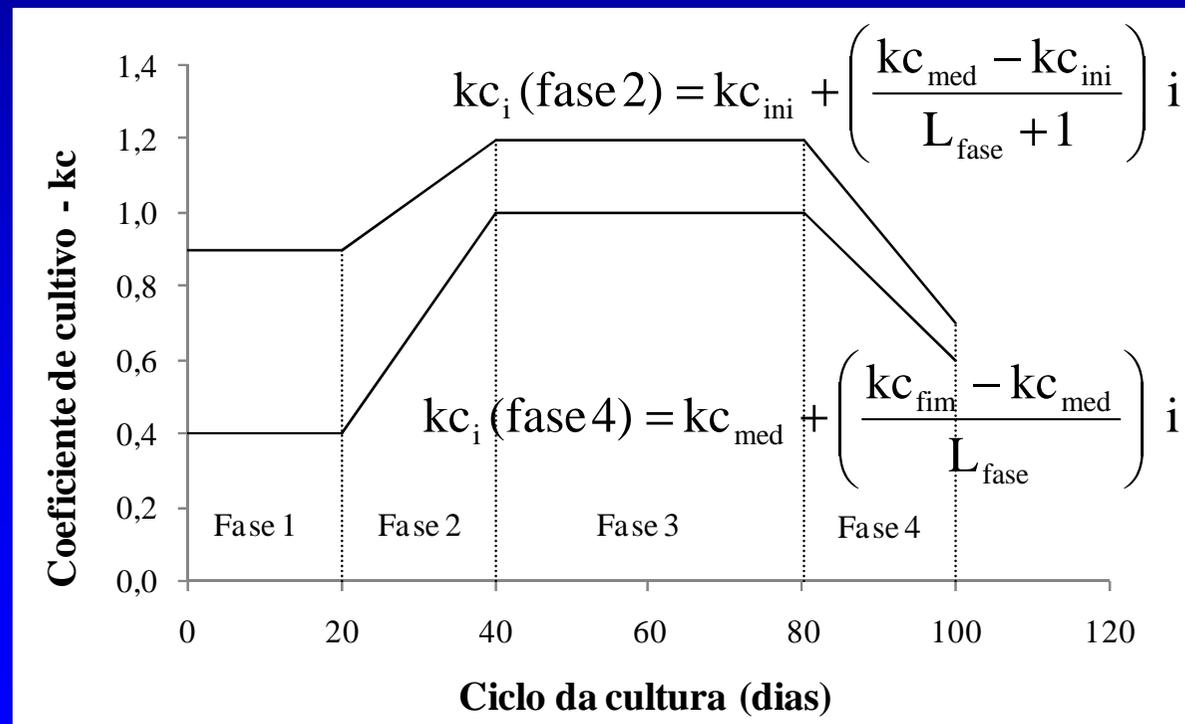
IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA





IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

→ Construção da curva de kc único





IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

→ Exercício - construir a curva de kc para a cultura do feijão, considerando os seguintes dados:
 $kc_{ini} = 0,40$; $kc_{med} = 1,15$; $kc_{fim} = 0,35$.

Fases	Duração (dias)
Inicial	15
Desenvolvimento vegetativo	25
Reprodução	35
Maturação	20
Total	95



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

→ Com base nos dados de duração de cada fase, é possível constatar que o ciclo da cultura será assim dividido:

- fase 1: do 1º ao 15º dia*
- fase 2: do 16º ao 40º dia*
- fase 3: do 41º ao 75º dia*
- fase 4: do 76º ao 95º dia*

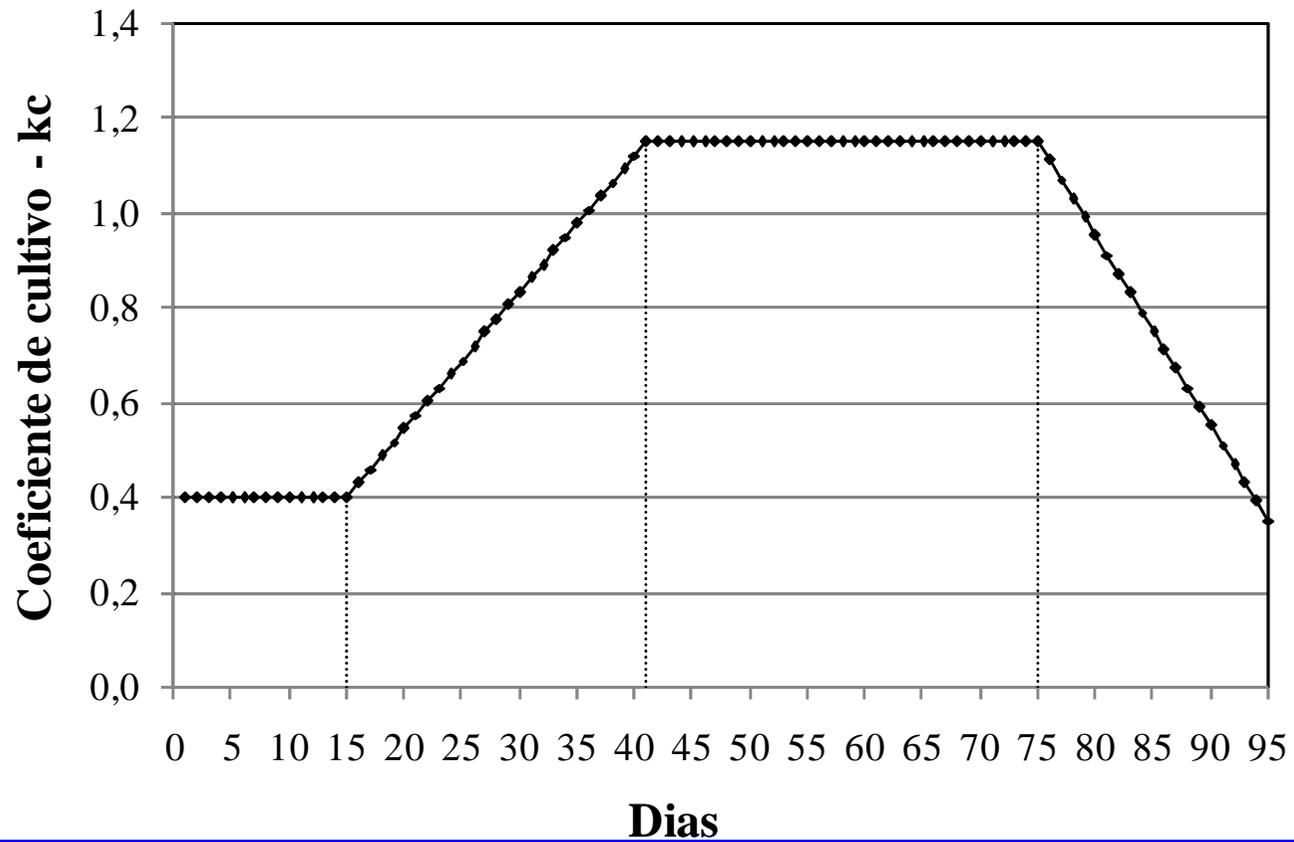


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

<i>Fase 2</i>				<i>Fase 4</i>			
<i>Dia</i>	<i>kc</i>	<i>Dia</i>	<i>kc</i>	<i>Dia</i>	<i>kc</i>	<i>Dia</i>	<i>kc</i>
16	0,43	29	0,80	76	1,11	89	0,59
17	0,46	30	0,83	77	1,07	90	0,55
18	0,49	31	0,86	78	1,03	91	0,51
19	0,52	32	0,89	79	0,99	92	0,47
20	0,54	33	0,92	80	0,95	93	0,43
21	0,57	34	0,95	81	0,91	94	0,39
22	0,60	35	0,98	82	0,87	95	0,35
23	0,63	36	1,01	83	0,83		
24	0,66	37	1,03	84	0,79		
25	0,69	38	1,06	85	0,75		
26	0,72	39	1,09	86	0,71		
27	0,75	40	1,12	87	0,67		
28	0,78			88	0,63		



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA





IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

→ Evapotranspiração

→ Evapotranspiração de cultura ajustado
(ET_c adj)

É a taxa de evapotranspiração que ocorre em uma cultura sem que a mesma esteja sob condições padrões.

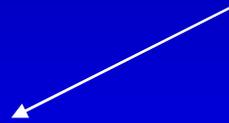


IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

→ Evapotranspiração

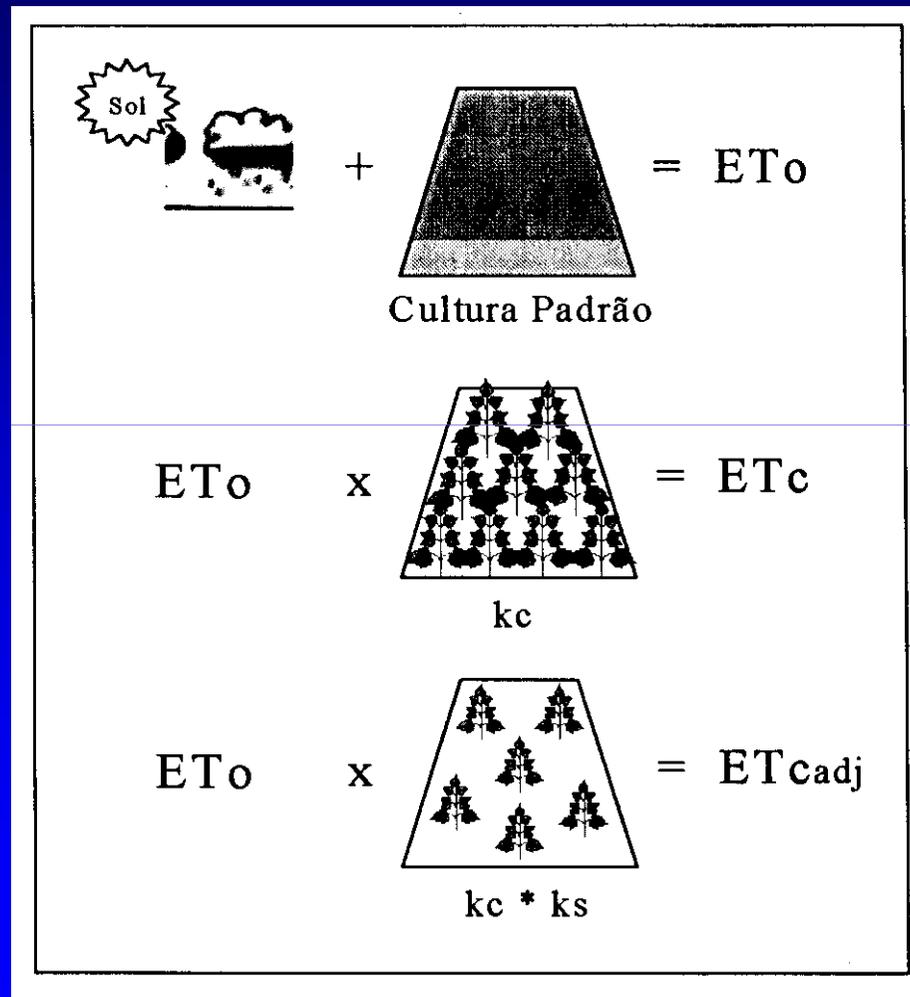


$$ET_{c \text{ adj}} = ET_o * k_c * k_s$$



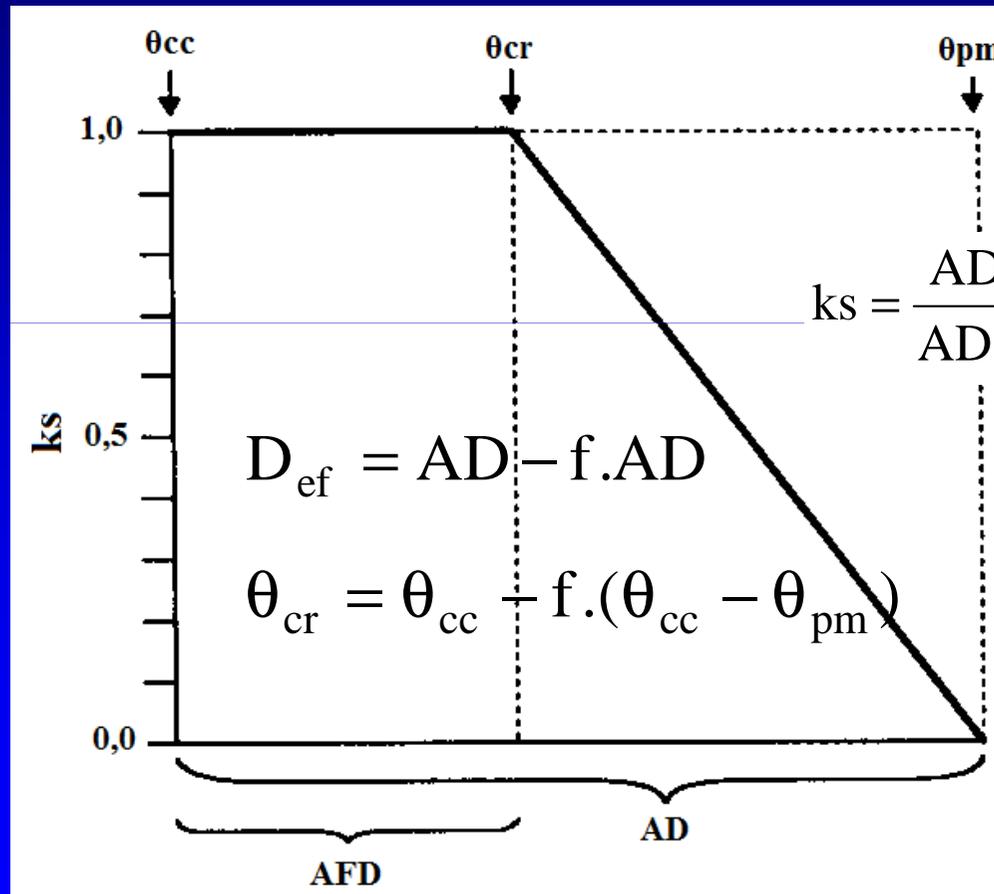
É a taxa de evapotranspiração que ocorre em uma cultura sem que a mesma esteja sob condições padrões.

IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA





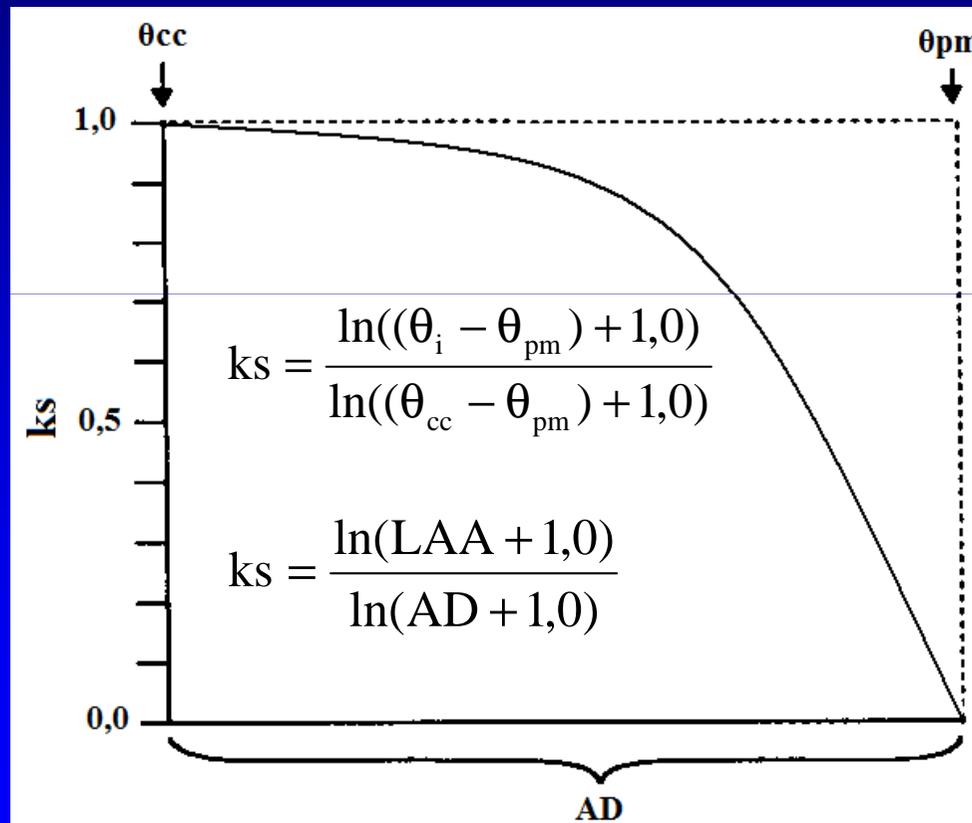
IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA



$$k_s = \frac{AD - D_{ef}}{AD - AFD} = \frac{AD - D_{ef}}{(1 - f) AD}$$



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA





3.2 - Precipitação provável ou dependente

→ Pode ser definida como sendo a lâmina mínima de precipitação esperada para uma região, estando a ela associado um nível de probabilidade; ou seja, a lâmina mínima precipitada esperada em 3 a cada 4 anos (75%) ou 4 a cada 5 anos (80%)

→ Métodos de frequência: Kimbal e California

→ Distribuição Gama



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

→ Métodos de frequência

$$F = \frac{m}{n} \text{ e } F = \frac{m}{n+1}$$

→ Distribuição Gama

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

com $\beta, \alpha, x > 0$. Γ é a função do parâmetro α sendo o seu valor obtido pela equação:



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

$$\Gamma(\alpha) = \sqrt{\frac{2\pi}{\alpha}} e^{\alpha[\ln(\alpha) - f(\alpha)]}$$

em que

$$f(\alpha) = 1 - \frac{1}{12\alpha^2} + \frac{1}{360\alpha^4} - \frac{1}{1260\alpha^6}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\gamma}$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

$$A = \ln \bar{x} - x_g$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$x_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x_i)$$



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

A função cumulativa de probabilidade da distribuição é

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx$$

Essa equação pode ser resolvida por uma expansão em série, pelo fato da mesma não apresentar uma solução explícita. A equação abaixo apresenta o resultado dessa expansão:

$$G(t) = \frac{t^\alpha}{\alpha\Gamma(\alpha)e^t} F(\alpha, t)$$



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

em que:

$$F(\alpha, t) = 1 + \frac{t}{\alpha + 1} + \frac{t^2}{(\alpha + 1)(\alpha + 2)} + \frac{t^3}{(\alpha + 1)(\alpha + 2)(\alpha + 3)} + \dots$$

sendo

$$t = \frac{x}{\beta}$$

Para a estimativa da chuva associada a um determinado valor de probabilidade Pr , determina-se o valor de t que satisfaça a igualdade:

$$G(t) - Pr = 0$$



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

Para a solução da equação anterior pode ser utilizado o algoritmo de Newton-Raphson. Outra maneira de resolver a equação da distribuição Gama é utilizar as funções existentes em planilhas eletrônicas como Excel™, por exemplo.

Neste programa, as funções INVGAMA e DISTGAMA (versão em português) ou GAMMAINV e GAMMADIST (versão em inglês) resolvem os problemas relacionados com a Distribuição Gama. A função DISTGAMA retorna o valor da probabilidade (PR) associada a um determinado evento (valor de precipitação), enquanto a INVGAMA retorna o valor do evento (x) associado a um determinado nível de probabilidade (PR).



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

3.3 - Água necessária

$$ITN = \frac{\sum ET - P_e - W_s - \Delta ARM}{E_a}$$

- ITN - lâmina total de irrigação;
- $\sum ET$ - somatório de evapotranspiração;
- P_e - precipitação efetiva no período;
- W_s - água proveniente do LF;
- ΔARM - variação da umidade do solo;
- E_a - eficiência de aplicação da irrigação.



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

3.3 - Água necessária

$$ITN = \frac{\sum ET - P_e}{E_a}$$

$$ITN = \frac{\sum ET}{E_a}$$

A evapotranspiração juntamente com a precipitação efetiva são os dois principais parâmetros para estimar a quantidade de água a ser aplicada na irrigação. Na maioria das áreas irrigadas é feita a irrigação total.



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

Além do que foi citado, a qualidade da água de irrigação também é um parâmetro importante no cálculo da lâmina de irrigação, pois essa técnica pode produzir efeitos indesejáveis no desenvolvimento da cultura.

- Alta concentração total de sais;
- Sodificação;
- Concentração de bicarbonatos;
- Concentração de de íons Fe^{++} ;
- Presença de elementos tóxicos;
- Contaminação por agentes patógenos.



IT-1101 - AGRICULTURA IRRIGADA

Para controle da salinidade do solo é comum, juntamente com a lâmina de irrigação, aplicar uma lâmina adicional denominada de "lâmina de lixiviação - LR":

$$LR = \frac{CE_i}{5CE_{ES} - CE_i} IRN$$

→ CE_i - condutividade elétrica da água de irrigação (mm mho cm^{-1})

→ CE_{ES} - condutividade elétrica do extrato de saturação (mm mho cm^{-1})



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

Professor Daniel Fonseca de Carvalho
ENGENHARIA DE ÁGUA E SOLO

Instituto de Tecnologia - Depto. de Engenharia
BR 465, km 7 - Seropédica-RJ - 23.890-000
(21) 2682-1864; e-mail: carvalho@ufrrj.br
<http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/daniel>