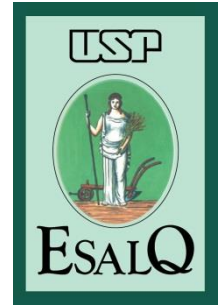




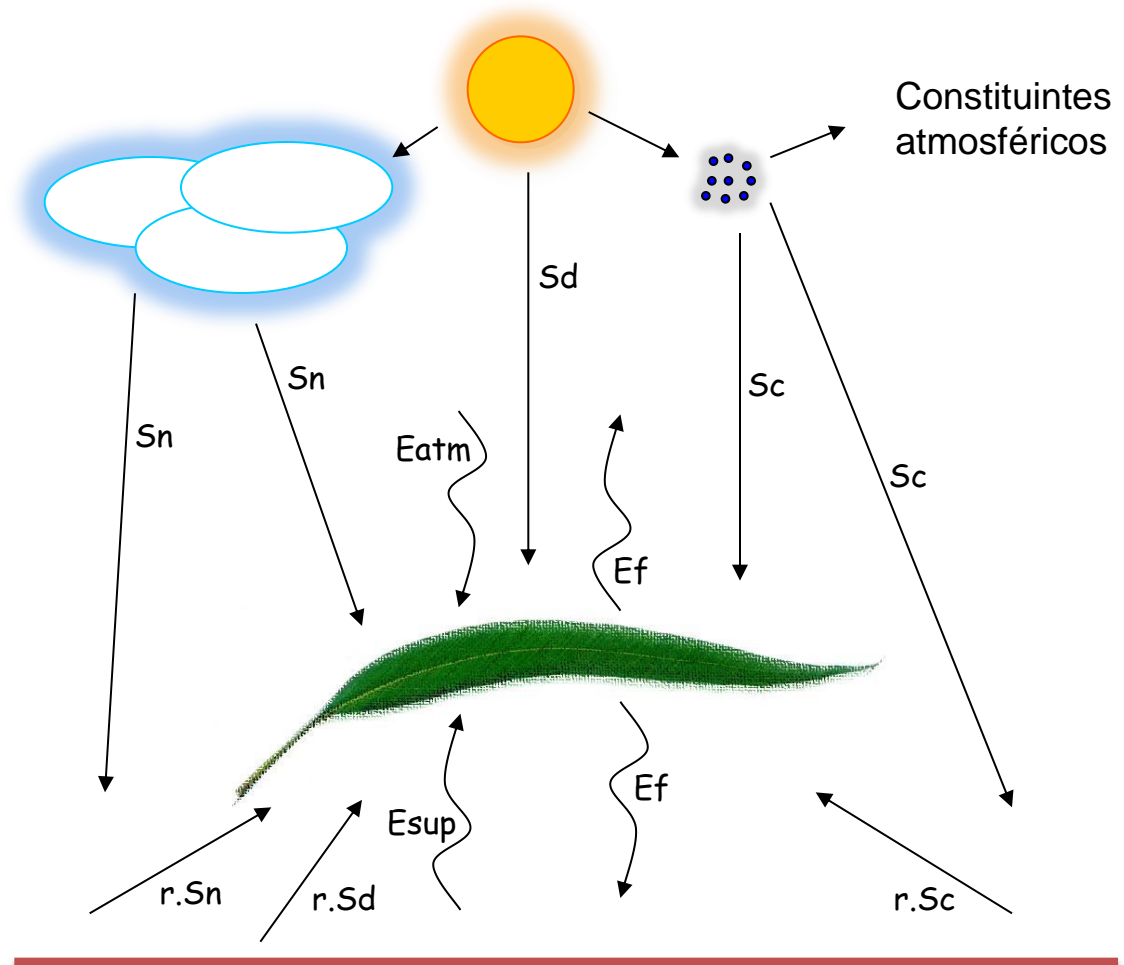
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA 'LUIZ DE QUEIROZ'
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIODIVERSIDADE
LEB0495 - Análise Física do Ambiente



Balanco de Energia

Prof. Felipe Gustavo Pilau

Balanço de Radiação



$$BOC = a (1+r) Q_g$$

$$BOL = 0,96 \sigma (T_{sup}^4 + T_{atm}^4) - 1,92 \sigma T_f^4$$

$$R_n = BOC + BOL$$

$$R_n = BOC + BOL$$

A radiação líquida (R_n) é a fonte básica de energia para aquecimento do ar (H), aquecimento do solo (G), evaporação da água (LE) e fotossíntese (F).

$$R_n = H + G + LE + F$$

Processos Biofísicos:

H = Calor Sensível (aquecimento do ar)

G = Calor Sensível (aquecimento solo)

LE = Calor Latente

F = Fotossíntese

Simplificando:

Como o aproveitamento energético na fotossíntese é baixo, menor que 3% do R_n , a equação pode ser aproximada para:

$$R_n = H + G + LE$$

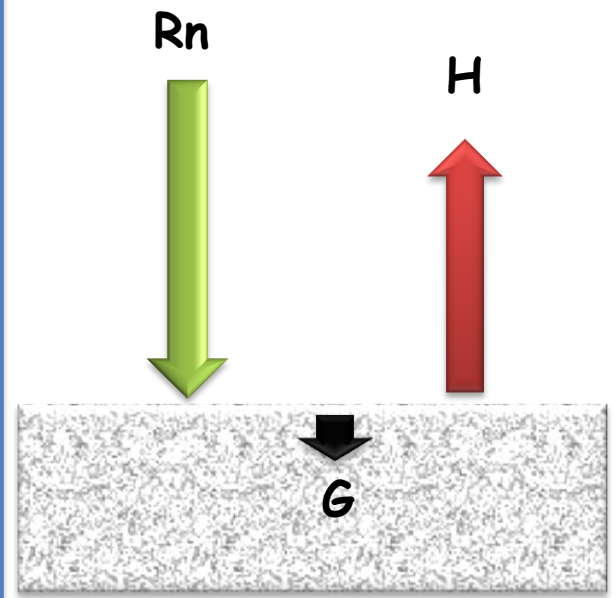
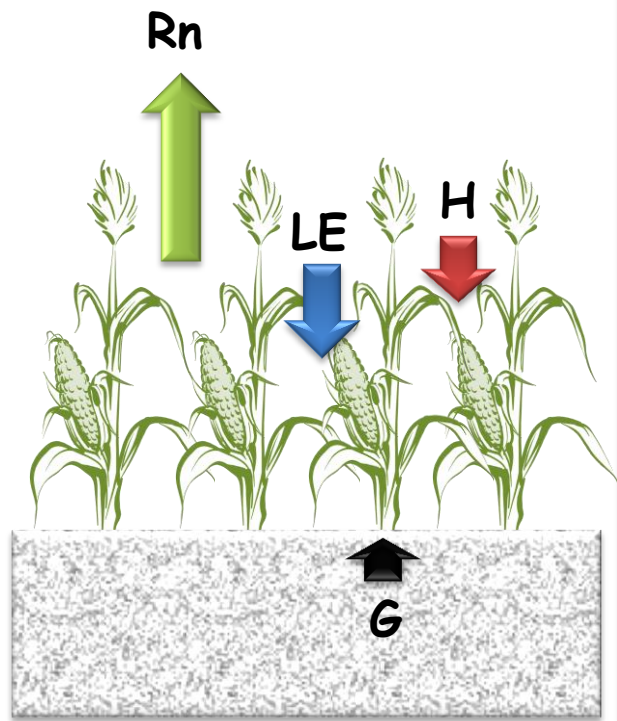
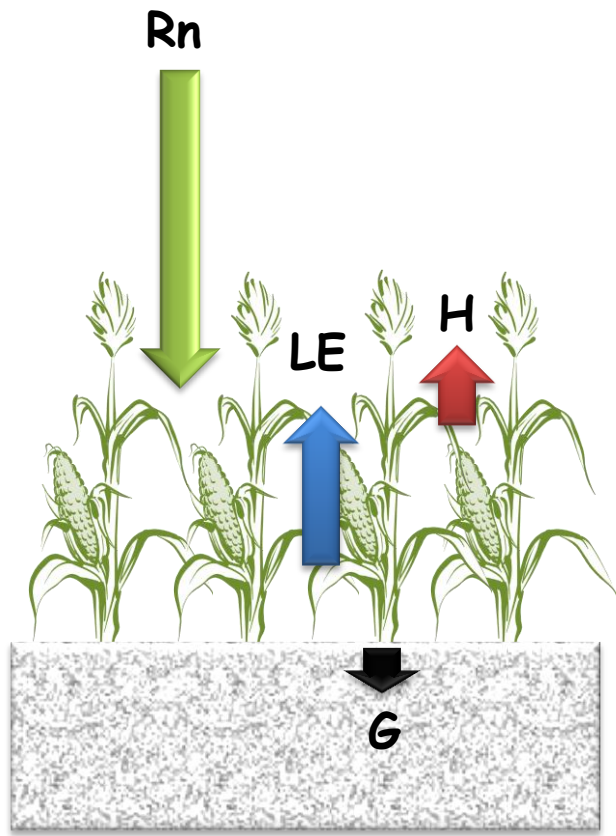
Superfície Vegetada Úmida

Dia

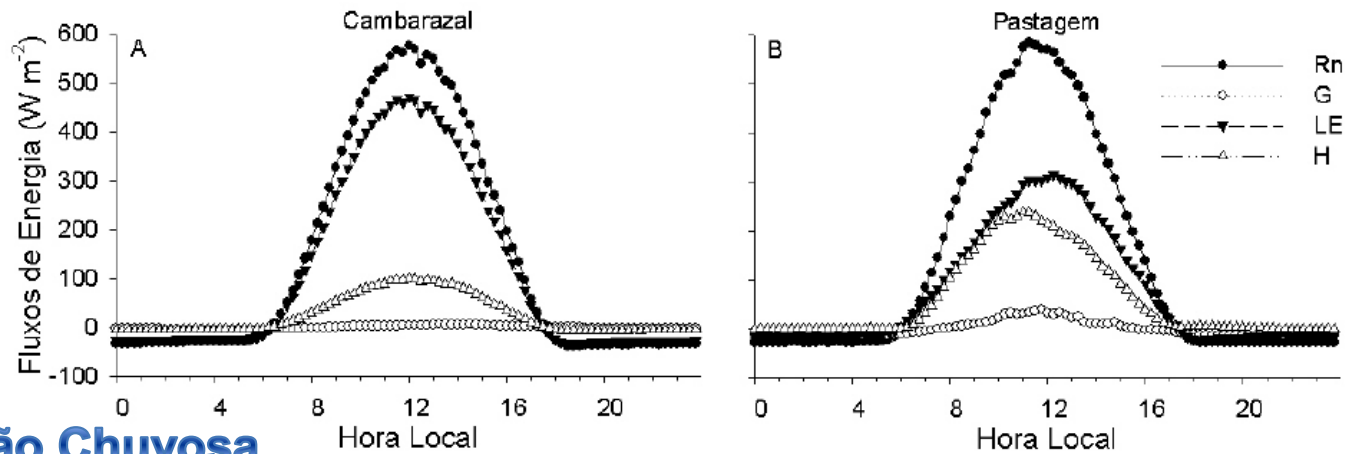
Noite

Superfície Seca

Dia

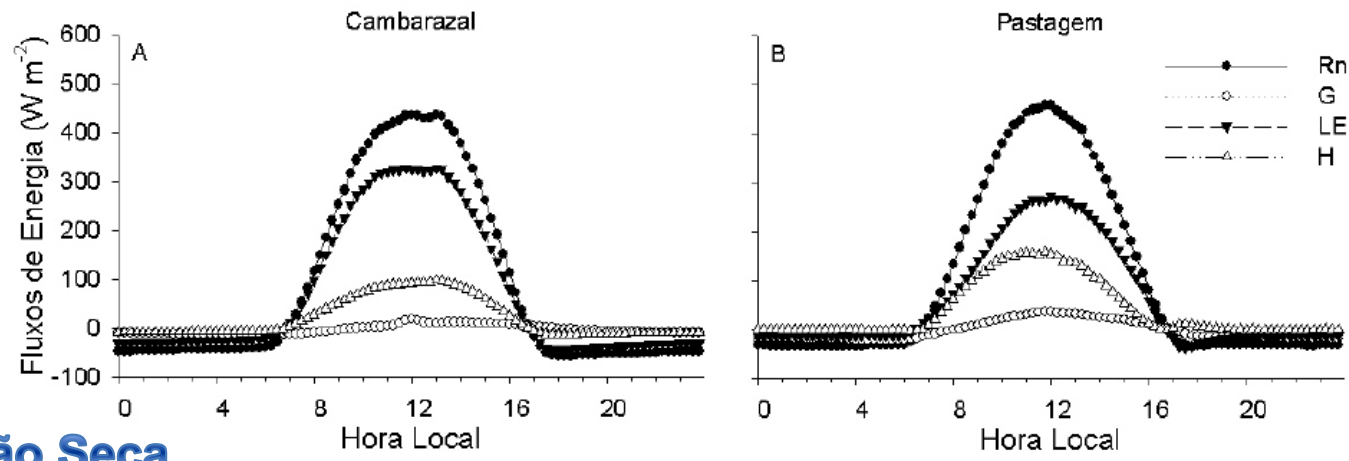


Partição do Rn úmido = seco
 LE: 80,0% (cambarazal) e 56,6% (pastagem)
 S: 19,1 (cambarazal) e 42,9%(pastagem)
 G: 0,3 (cambarazal) e 7,2%(pastagem).



Estação Chuvosa

Figura 1 - Ciclo médio diário do saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H) no cambarazal e na pastagem, durante a estação chuvosa.



Estação Seca

FIGURA 2 - Ciclo médio diário do saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H) no cambarazal e na pastagem, durante a estação seca.

Calor Sensível (H) a Calor Latente (LE)

$$Q_H = m c \Delta t$$

$$Q_{LE} = m L$$

$$Q_H = \text{cal}$$

$$Q_{LE} = \text{cal}$$

$$m (\text{massa}) = g$$

$$m (\text{massa}) = g$$

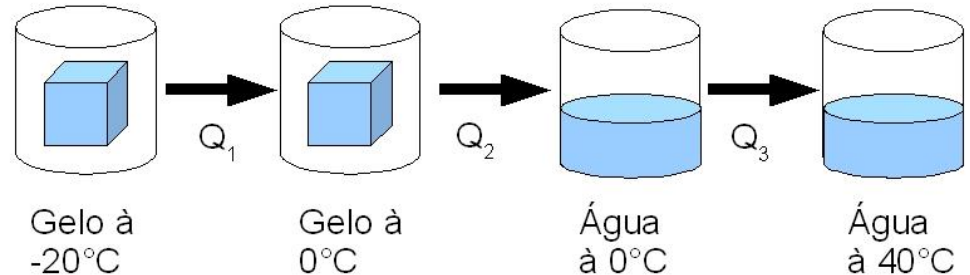
$$c (\text{calor específico}) = \text{cal } g^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$L (\text{calor latente}) = \text{cal } g^{-1}$$

$$\Delta t = \text{variação da temperatura} = ^\circ\text{C}$$

Unidades: 1 cal = 4,18J

Massa Água = 200g



Calor específico (c)

<i>substância</i>	<i>em cal/g °C</i>	<i>substância</i>	<i>em cal/g °C</i>
água	1,00	gelo	0,55
alumínio	0,22	latão	0,094
areia	0,20	mercúrio	0,033
cobre	0,093	ouro	0,032
chumbo	0,031	prata	0,056
estanho	0,055	vapor de água	0,48
ferro	0,11	vidro	0,20
éter	0,56	álcool	0,58
acetona	0,52	concreto	0,20
etanol	0,59	metanol	0,61
silício	0,17	titânio	0,054

Calor latente (L)

Substância ⇄	Ponto de Fusão ⇄ (K)	Calor Latente de Fusão ⇄ (kJ/kg)	Ponto de Ebulição ⇄ (K)	Calor Latente de Vaporização ⇄ (kJ/kg)
Hidrogênio	14,0	58,0	20,3	455
Oxigênio	54,8	13,9	90,2	213
Mercúrio	234	11,4	630	296
Água	273	333	373	2256
Chumbo	601	23,2	2017	858
Prata	1235	105	2323	2326
Cobre	1356	207	2868	4730

Componentes e Solos

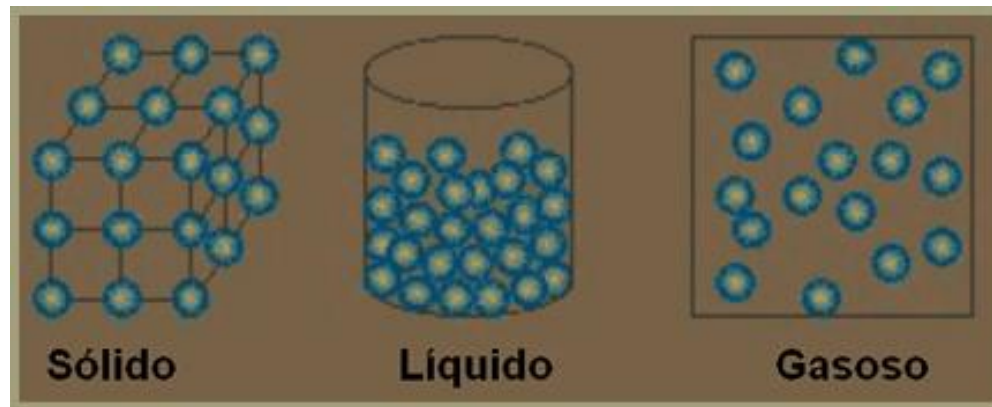
TABELA 1. Densidade (ρ), calor específico (C_p) e capacidade térmica volumétrica (C_v) de diferentes materiais.

material	ρ (g/cm ³)	C_p (cal/g °C)	C_v (cal/cm ³ °C)
Quartzo	2,65	0,175	0,4637
Água	1,00	1,000	1,00
Ar	0,00129	0,240	0,000309
Solos minerais (seco)	2,65	0,18 – 0,20	0,477 – 0,53
Solos orgânicos (seco)	1,30	0,46	0,598

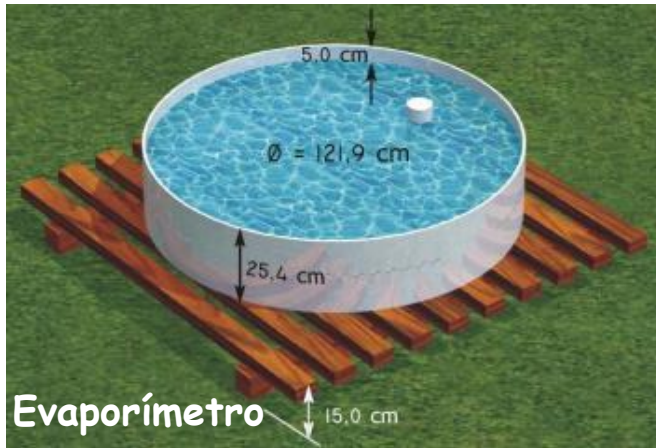
Poder Evaporante do Ar

A transferência natural da água no estado de vapor, da superfície para a atmosfera, é facilmente interpretada pela teoria cinética da matéria.

- ✓ **Nos sólidos**, cada partícula tem oscilações de muito pequena amplitude em volta de uma posição média quase permanente.
- ✓ **Nos líquidos**, a energia cinética média das partículas é maior do que nos sólidos, mas uma partícula que se liberta da atração daquelas que a rodeiam é logo captada por um grupo de partículas vizinhas.
- ✓ **Nos gases**, a energia cinética média das partículas é ainda maior e suficiente para libertá-las umas das outras.



A mudança do estado sólido ou líquido para o estado gasoso corresponde a um aumento da energia cinética das partículas da substância, exigindo por isso, com temperatura constante, o consumo de uma quantidade de energia que, por unidade de massa da substância, é o calor de vaporização (LE).



Fatores Intervenientes no Processo de Evaporação e Transpiração

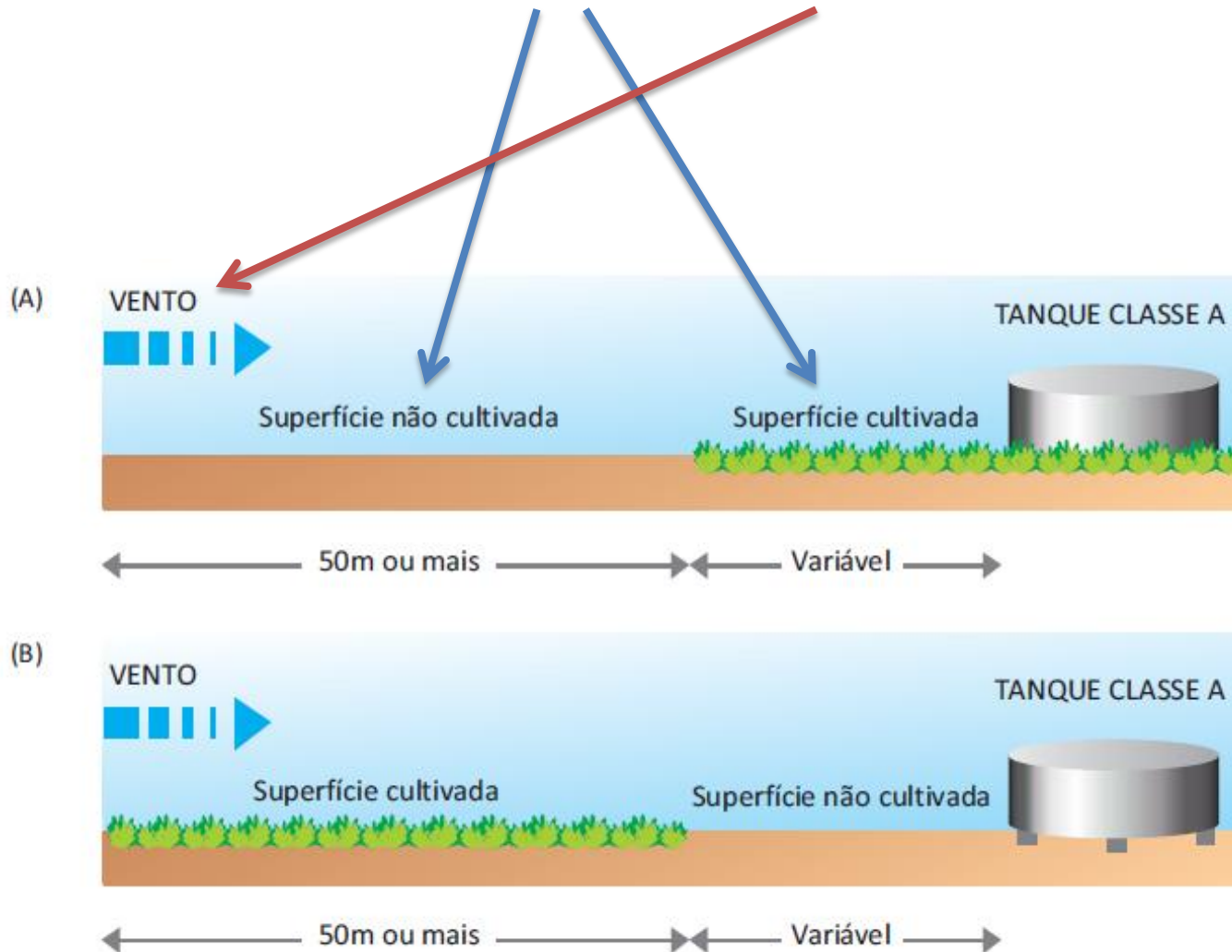
- Radiação solar
- Temperatura de Superfície (maior energia cinética).
- Temperatura e Umidade do Ar
- Vento: difusão molecular x difusão turbulenta.
- Aspectos Fisiológicos: estômatos

Condições básicas para a ocorrência do mecanismo são:

a) existência de uma fonte de energia (Q_g , calor sensível da atmosfera ou da superfície evaporante). A mudança da fase líquida para a fase de vapor consome 540 cal.g^{-1} a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e 586 cal.g^{-1} a $20 \text{ }^\circ\text{C}$; e

b) existência de um gradiente de concentração de vapor (Δe)

Balanco de Radiação: Vertical + Horizontal (Advecção)



Tanque Classe A localizado sob uma superfície cultivada (A) e uma superfície nua (B).

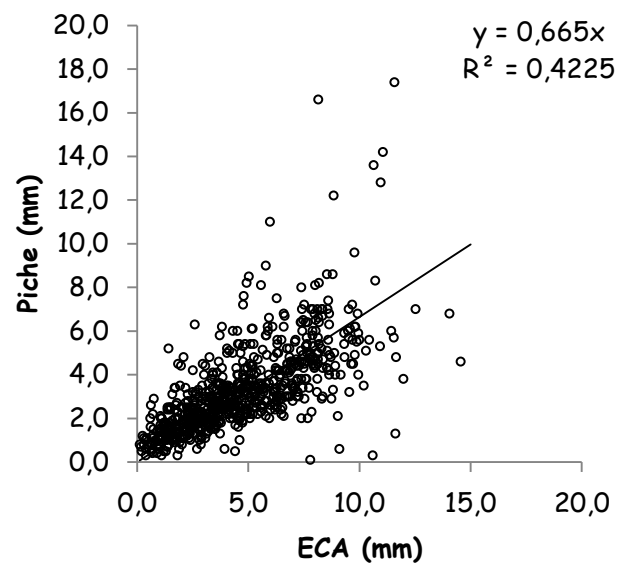
Coefficiente do Tanque Classe A (K_p) para diferentes tipos de cobertura do solo, umidade relativa e velocidade do vento

Tanque Classe A		Caso A			Caso B			
		Tanque circundado por uma superfície cultivada			Tanque circundado por uma superfície nua			
Umidade relativa média (%)		Baixa < 40	Média 40 – 70	Alta >70		Baixa < 40	Média 40 – 70	Alta >70
Velocidade do vento ($m s^{-1}$)	Distância do centro do tanque ao limite da superfície cultivada (m)				Distância do centro do tanque ao limite da superfície nua (m)			
Baixa: < 2	1	0,55	0,65	0,75	1	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	1000	0,50	0,60	0,75
Moderada: 2 – 5	1	0,50	0,60	0,65	1	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	10	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,70	0,80	0,80	1000	0,45	0,55	0,60
Alta: 5 – 8	1	0,45	0,50	0,60	1	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	10	0,50	0,55	0,65
	100	0,60	0,65	0,70	100	0,45	0,50	0,60
	1000	0,65	0,70	0,75	1000	0,40	0,45	0,55
Muito Alta: > 8	1	0,40	0,45	0,50	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	10	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	100	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	1000	0,35	0,40	0,45

Para facilitar a interpolação dos valores de K_p na Tabela 12.4 e a determinação da ETP em sistemas informatizados, Snyder (1992) obteve a seguinte equação de regressão linear múltipla:

$$K_p = 0,482 + 0,024 \ln(B) - 0,000376 U + 0,0045 UR \quad (12.16)$$

em que: B é a bordadura (em metros); U a velocidade do vento ($km d^{-1}$); e UR a umidade relativa média diária, em %.



Balanço de Energia – Razão de Bowen

A evapotranspiração ou LE (mm d⁻¹) pode ser estimada pelo método da Razão de Bowen, a partir da equação simplificada do balanço de energia:

$$R_n + LE + H + G = 0$$

donde R_n é o saldo de radiação, LE é o fluxo de calor latente e H é o fluxo de calor sensível e G é o fluxo de calor no solo (W m⁻²). Neste processo, as densidades de fluxo que chegam à camada vegetativa são positivas enquanto as que saem são negativas.

A razão de Bowen, portanto, é dada por:

$$\beta = \frac{-\rho \cdot c_p \cdot K_h \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}}{-\rho \cdot L \cdot K_w \cdot \frac{\partial q}{\partial z}}$$

Assumindo-se que os coeficientes de transferência turbulenta nos processos de difusão do calor sensível e vapor d'água são aproximadamente iguais, isto é $K_h \cong K_w$, (Verma et al., 1978) e considerando-se que $[(\partial T / \partial z) / (\partial e / \partial z)] \cong \Delta T / \Delta e$, a razão de Bowen pode ser obtida como:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}$$

Balanço de Energia – Razão de Bowen

donde K_h e K_w são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água, respectivamente ($m^2 s^{-1}$); L é o calor latente de evaporação da água ($MJ kg^{-1}$); C_p é o calor específico do ar seco a pressão constante ($MJ kg^{-1} °C^{-1}$); P_0 é a pressão atmosférica média local (kPa); ϵ é a razão entre as massas moleculares da água e do ar seco (0,622); $\Delta T = T_2 - T_1$ e $\Delta e = e_2 - e_1$ são as diferenças de temperatura do ar e da pressão parcial do vapor d'água atmosférico, medidas em dois níveis acima da superfície vegetada (0,3 e 1,5 m), $\Delta z = z_2 - z_1$ e $\gamma = C_p P_0 / L \epsilon$ é a constante psicrométrica ($kPa °C^{-1}$).

Obteve-se o fluxo de calor latente (LE) pela expressão:

$$LE = - \left(\frac{Rn + G}{1 + \beta} \right)$$

Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar: balanço de energia e parâmetros derivados (ANDRÉ et al., 2010)

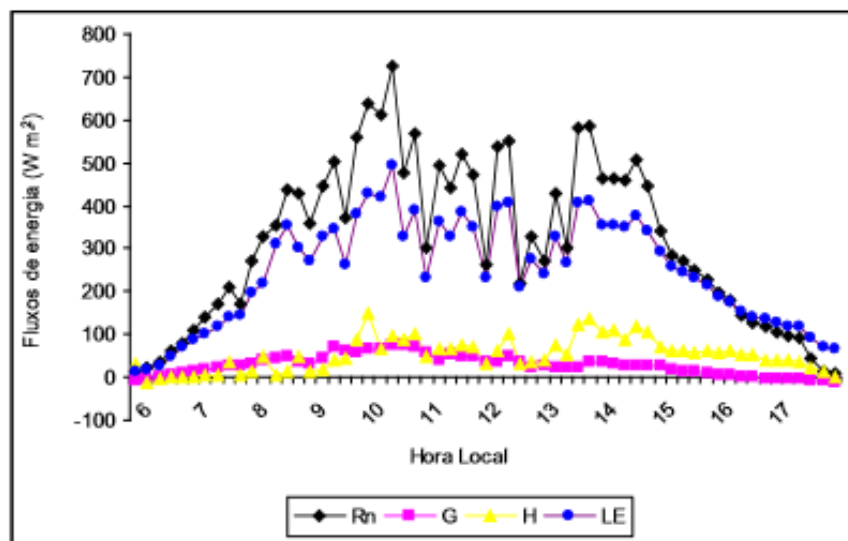


Figura 2 - Variação diurna dos componentes do balanço de energia para o estágio de perfilamento a cultura da cana-de-açúcar: Rn - saldo de radiação; G - densidade de fluxo de calor no solo; H - densidade de fluxo de calor sensível; LE - densidade de fluxo de vapor d'água.

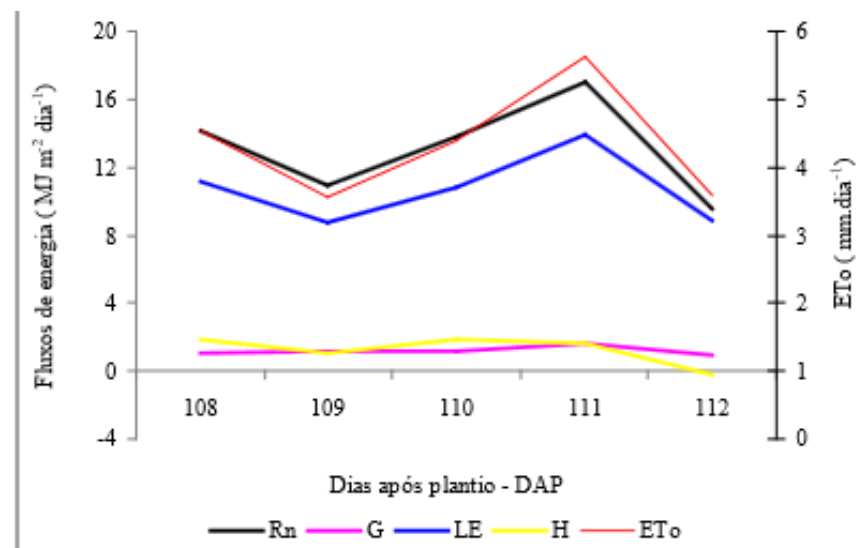


Figura 3 - Totais diurnos dos termos do balanço de energia e da evapotranspiração de referência, para fase de perfilamento da cana-de-açúcar. Rn - saldo de radiação; G - densidade de fluxo de calor no solo; LE - densidade de fluxo de vapor d'água; H - densidade de fluxo de calor sensível.

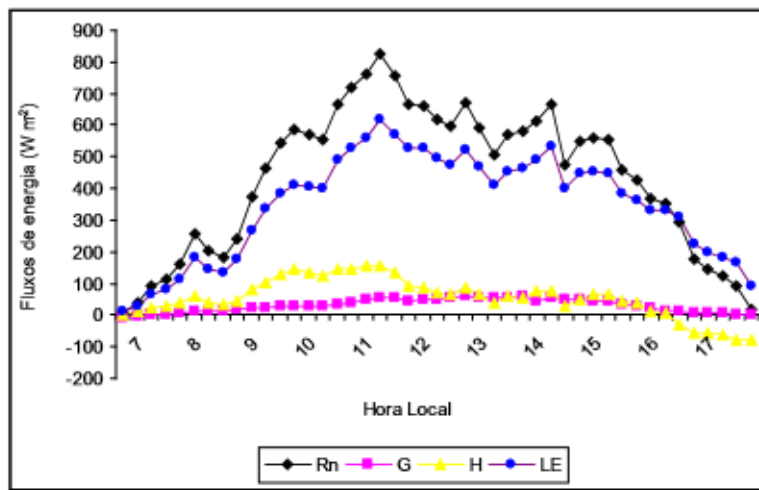


Figura 4 - Variação diurna dos componentes do balanço de energia para o estágio de desenvolvimento de colmos da cultura da cana-de-açúcar: Rn - saldo de radiação; G - densidade de fluxo de calor no solo; H - densidade de fluxo de calor sensível; LE - densidade de fluxo de vapor d'água.

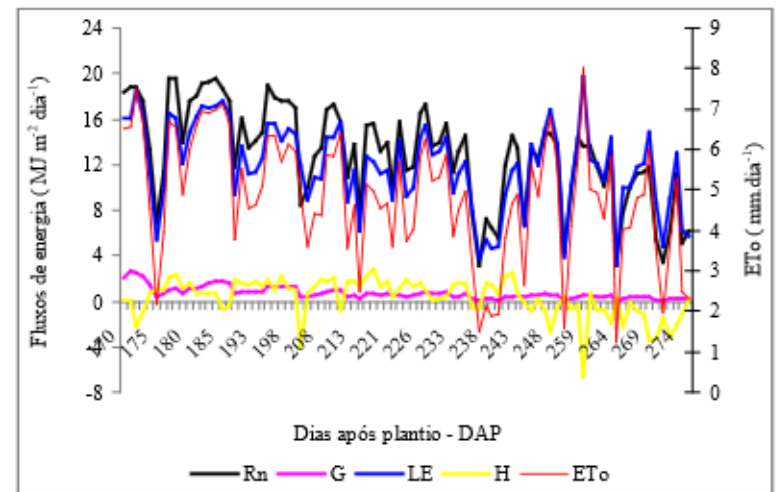


Figura 6 - Totais diurnos dos termos do balanço de energia e da evapotranspiração potencial, para fase de desenvolvimento de colmos da cana-de-açúcar. Rn- saldo de radiação; G- densidade de fluxo de calor no solo.

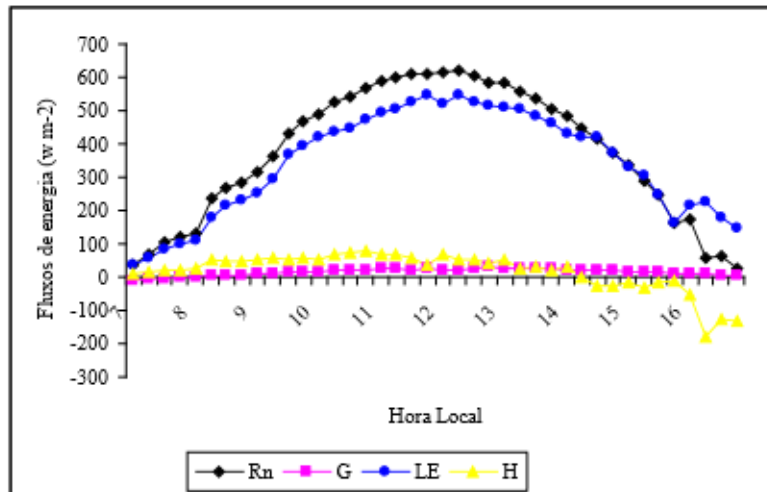


Figura 5 - Variação diurna dos componentes do balanço de energia para o estágio de desenvolvimento de colmos da cultura da cana-de-açúcar: Rn - saldo de radiação; G - densidade de fluxo de calor no solo; LE - densidade de fluxo de vapor d'água; H - densidade de fluxo de calor sensível.

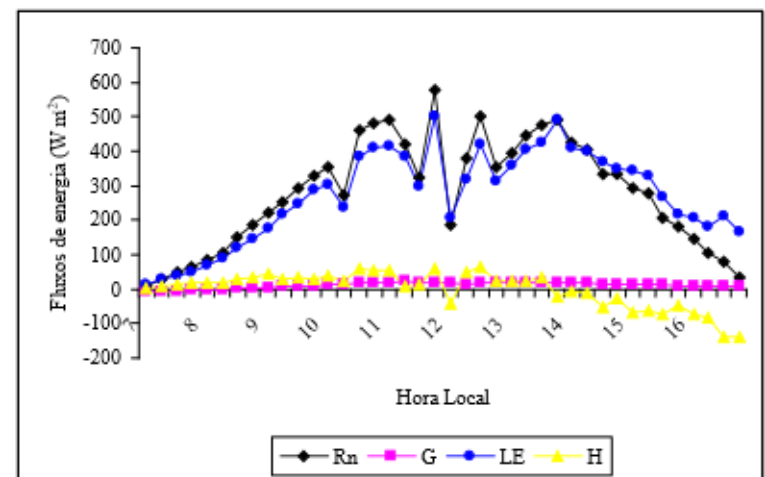


Figura 7 - Variação diurna dos componentes do balanço de energia para o estágio de maturação da cultura da cana-de-açúcar: Rn - saldo de radiação; G - densidade de fluxo de calor no solo; LE - densidade de fluxo de vapor; H - densidade de fluxo de calor sensível.

Partição Rn em Cana de açúcar (ANDRÉ et al., 2010)

ANO	DJ	DAP	Neb	Rn	G	LE	H	G/Rn	IE/Rn	Eto	IAF	h	Estádios
	*			(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)			(mm)		(m)	
2005	325	108	0,33	14,12	1,05	11,19	1,88	0,07	0,79	4,54			Perfilamento
2005	326	109	0,33	10,98	1,15	8,77	1,07	0,10	0,80	3,55			Perfilamento
(*)	2005	327	110	0,34	13,84	1,20	10,81	1,82	0,09	4,39	2,0 - 2,5	1,20	Perfilamento
2005	328	111	0,34	17,04	1,59	13,88	1,58	0,09	0,81	5,63			Perfilamento
2005	331	114	0,64	18,05	0,68	14,06	3,32	0,04	0,78	5,70			Perfilamento
2005	334	117	0,62	17,52	1,38	14,49	1,65	0,08	0,83	5,88			Perfilamento
2005	338	121	0,64	17,82	1,32	13,32	3,18	0,07	0,75	5,40			Perfilamento
2005	339	122	0,69	19,13	1,32	14,52	3,31	0,07	0,76	5,89			Perfilamento
								0,077	0,787	5,121			
2006	31	190	0,69	19,56	1,08	16,12	2,36	0,06	0,82	6,54			Des. Colmos
2006	35	194	0,71	19,20	1,35	17,10	0,75	0,07	0,89	6,93			Des. Colmos
2006	48	198	0,68	18,94	1,29	15,69	1,96	0,07	0,83	6,36			Des. Colmos
2006	49	199	0,66	17,94	1,35	15,66	0,93	0,08	0,87	6,35			Des. Colmos
(*)	2006	50	200	0,66	17,53	1,22	14,08	2,23	0,07	5,71	5,0 - 6,0	2,15	Des. Colmos
2006	76	226	0,64	15,82	0,61	14,04	1,17	0,04	0,89	5,69			Des. Colmos
2006	79	229	0,67	16,60	0,69	14,35	1,56	0,04	0,86	5,82			Des. Colmos
2006	80	230	0,70	17,27	0,80	15,41	1,06	0,05	0,89	6,25			Des. Colmos
2006	83	233	0,64	15,57	0,77	14,45	0,35	0,05	0,93	5,86			Des. Colmos
								0,057	0,866	6,169			
2006	88	238	0,63	14,63	0,69	12,26	1,67	0,05	0,84	4,97			Des. Colmos
2006	95	245	0,64	14,64	0,52	13,37	0,75	0,04	0,91	5,42			Des. Colmos
2006	100	250	0,64	14,87	0,61	15,10	-0,85	0,04	1,02	6,12			Des. Colmos
2006	101	251	0,68	14,73	0,60	16,83	-2,70	0,04	1,14	6,83			Des. Colmos
2006	111	261	0,69	14,35	0,38	14,29	-0,31	0,03	1,00	5,79			Des. Colmos
(*)	2006	113	263	0,64	13,57	0,54	12,37	0,66	0,04	5,01	7,0 - 8,0	3,2	Des. Colmos
2006	114	261	0,58	11,79	0,46	12,15	-0,82	0,04	1,03	4,93			Des. Colmos
2006	115	262	0,52	10,16	0,38	10,53	-0,76	0,04	1,04	4,27			Des. Colmos
2006	116	263	0,63	13,01	0,46	14,39	-1,84	0,04	1,11	5,83			Des. Colmos
2006	117	264	0,21	3,20	-0,10	3,10	0,21	-0,03	0,97	1,26			Des. Colmos
								0,031	0,996	5,044			
2006	147	294	0,63	10,15	0,35	13,15	-3,36	0,03	1,30	5,33			Maturação
2006	148	295	0,63	10,26	0,48	12,63	-2,85	0,05	1,23	5,12			Maturação
2006	149	296	0,51	8,18	0,34	9,74	-1,91	0,04	1,19	3,95			Maturação
2006	150	297	0,59	10,10	0,38	12,42	-2,70	0,04	1,23	5,04			Maturação
2006	152	299	0,49	7,88	0,30	13,40	-5,81	0,04	1,70	5,43			Maturação
2006	165	312	0,53	9,41	0,31	10,96	-1,86	0,03	1,16	4,44			Maturação
2006	166	313	0,59	9,98	0,35	11,53	-1,90	0,04	1,16	4,68			Maturação
2006	184	331	0,46	8,33	0,28	8,70	-0,65	0,03	1,04	3,53			Maturação
(*)	2006	192	339	0,56	10,09	0,40	9,73	-0,04	0,04	3,95	8,0 - 9,0	3,7	Maturação
2006	193	340	0,50	8,60	0,35	11,73	-3,48	0,04	1,36	4,76			Maturação
								0,038	1,234	4,623			Maturação

Lisímetros

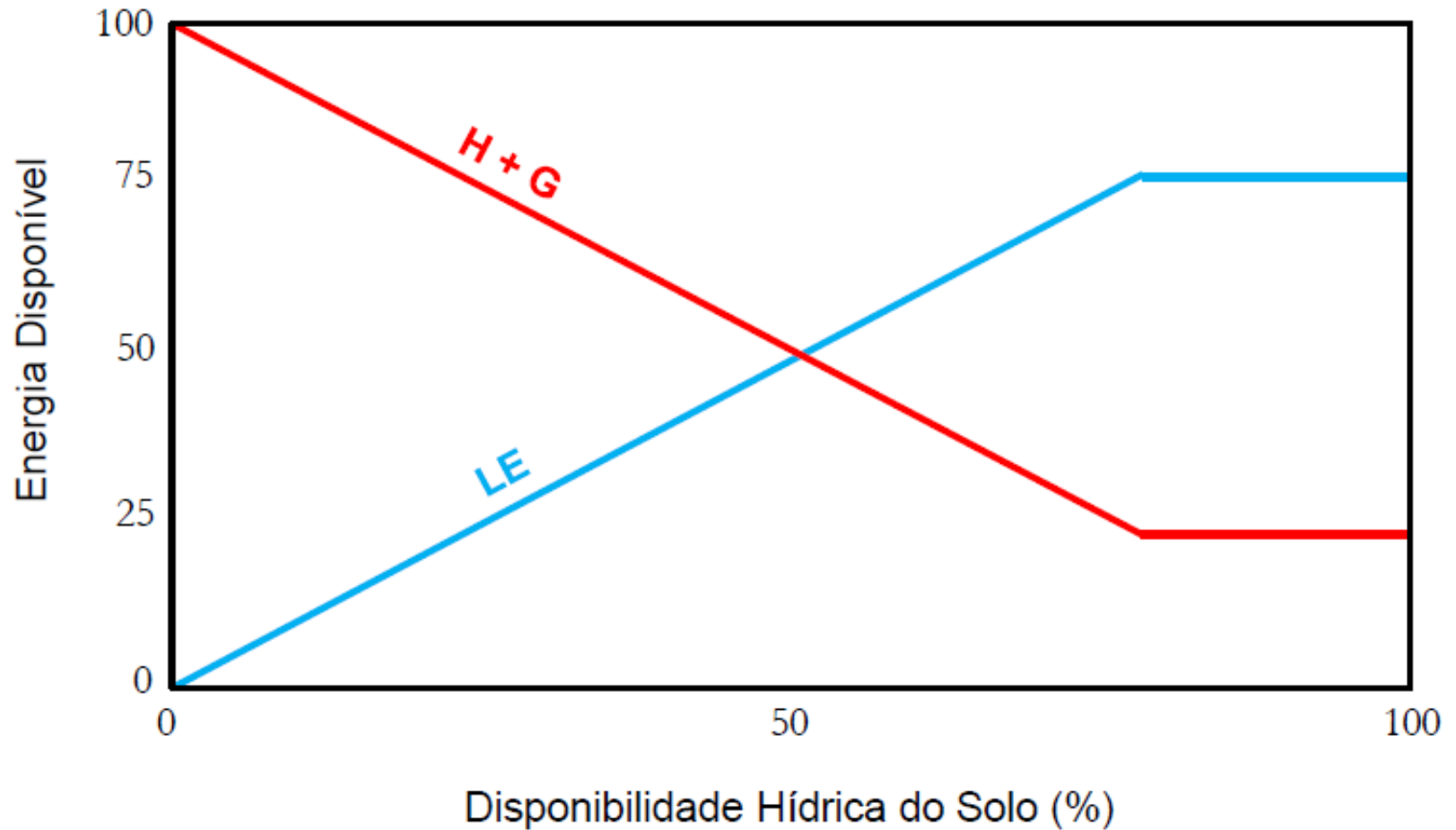
Lisímetro Pesagem



Lisímetro Drenagem



Influencia da Disponibilidade Hídrica do Solo na Partição do Balanço de Energia



Conceitos

- ✓ Evapotranspiração de Referência (ET_o)
- ✓ Evapotranspiração Real (ETR)
- ✓ Evapotranspiração de Oasis (ETO)
- ✓ Evapotranspiração da Cultura (ET_c)
- ✓ Evapotranspiração real da Cultura (ET_r)



A Força Motriz

Diferença de potencial entre os diferentes compartimentos que compõem o percurso da água: solo-planta-atmosfera

Potencial total (Ψ) é a soma dos potenciais parciais:

Potenciais parciais:

Temperatura (Ψ_t)

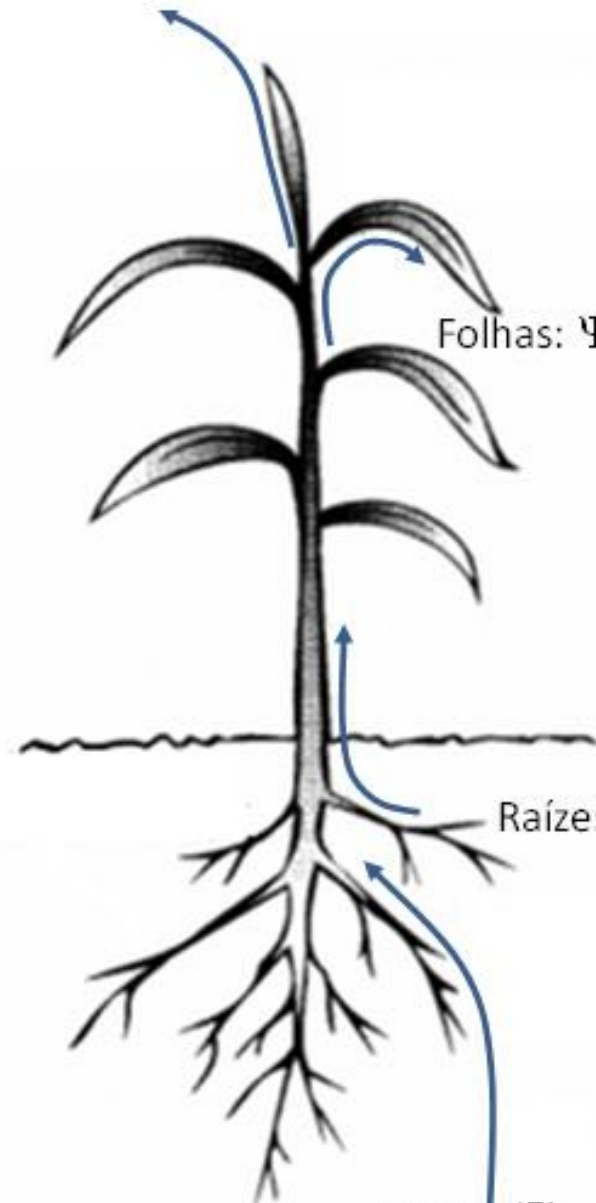
Soluto (Ψ_s)

Gravitacional (Ψ_g)

Mátrico (Ψ_τ)

Pressão (Ψ_p)

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

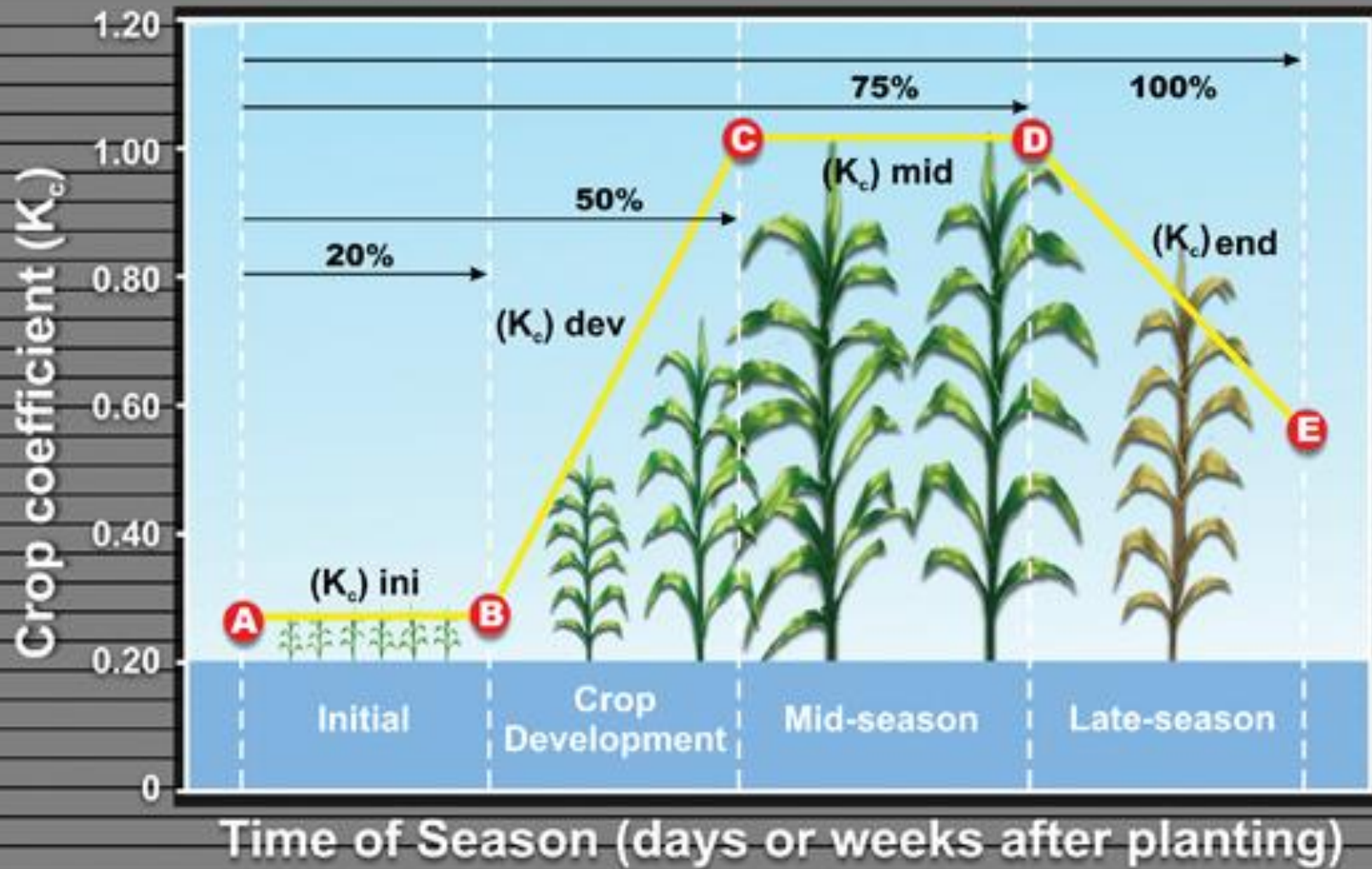


Folhas: $\Psi_{folha} = -1,5$ a -3 MPa

Raízes: $\Psi_{raiz} = -0,3$ a -2 MPa

Solo: $\Psi_{solo} = -0,01$ a $-1,5$ MPa

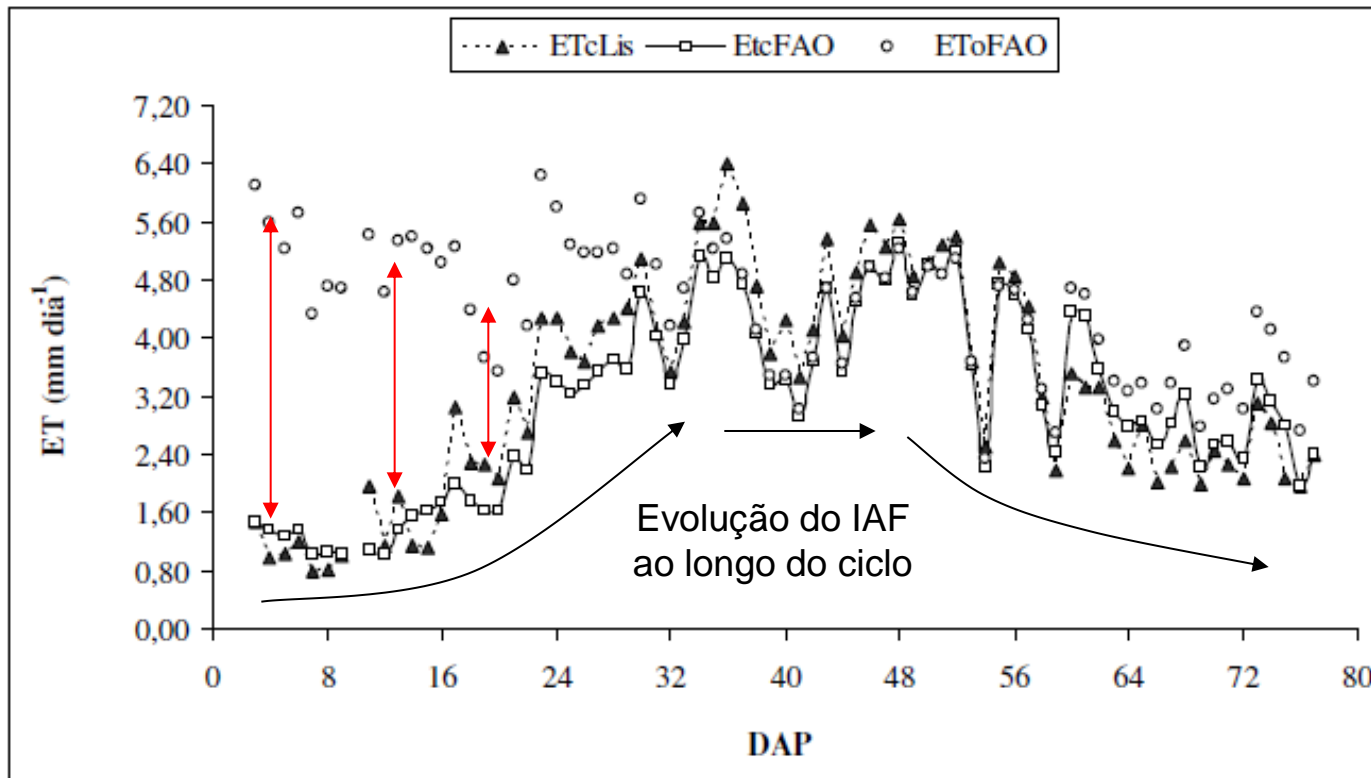
- ✓ **Potencial Térmico** (Ψ_T): função da variação do potencial químico da água devido à diferença entre a temperatura do sistema em um determinado estado e a temperatura da água no estado tomado como padrão. Desprezado por considerar-se que os processos são isotérmicos ou quase. Temperatura de referência tomada como a própria temperatura do sistema.
- ✓ **Potencial de Solutos** (Ψ_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. Ψ_s é zero quando a água é pura.
- ✓ **Potencial de Pressão** (Ψ_p): quando a pressão for positiva há aumento do Ψ . Pressão positiva dentro da célula equivale ao potencial de turgescência. O Ψ_p pode ser também igual a zero, como nas células em estado de plasmólise incipiente.
- ✓ **Potencial Mátrico** (Ψ_m): define as influências que as forças superficiais e espaços (colóides, proteínas, macromoléculas, etc.) presentes nas células e espaços intercelulares. O Ψ_m é, em geral, negativo, podendo ser zero em sistemas isentos de partículas coloidais.
- ✓ **Gravidade** – O Ψ_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.



ETcLis – Evapotranspiração da cultura medida

ETcFAO – Evapotranspiração da cultura estimada ($ETc = Kc \times ETo$)

EToFAO – Evapotranspiração de referência



Fonte: FIGUEIRÊDO et al., 2009

Coeficiente de Cultivo

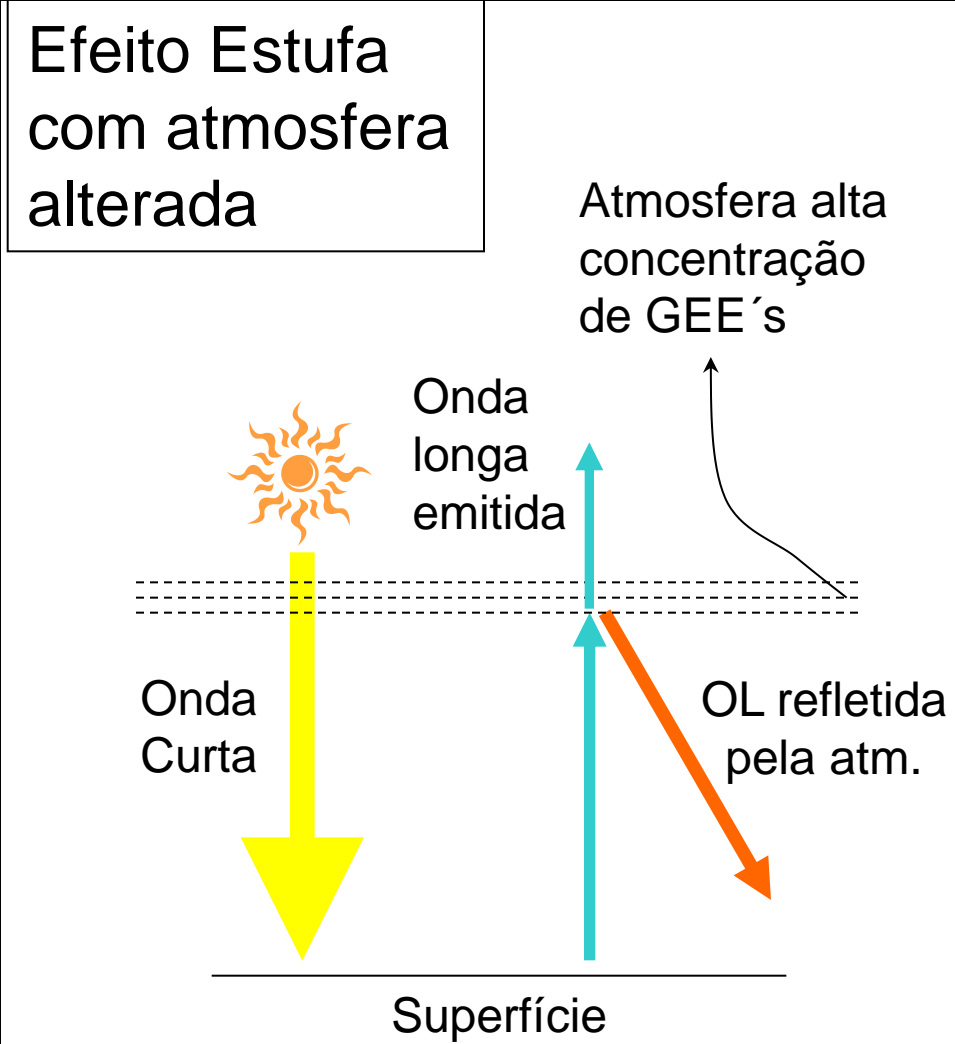
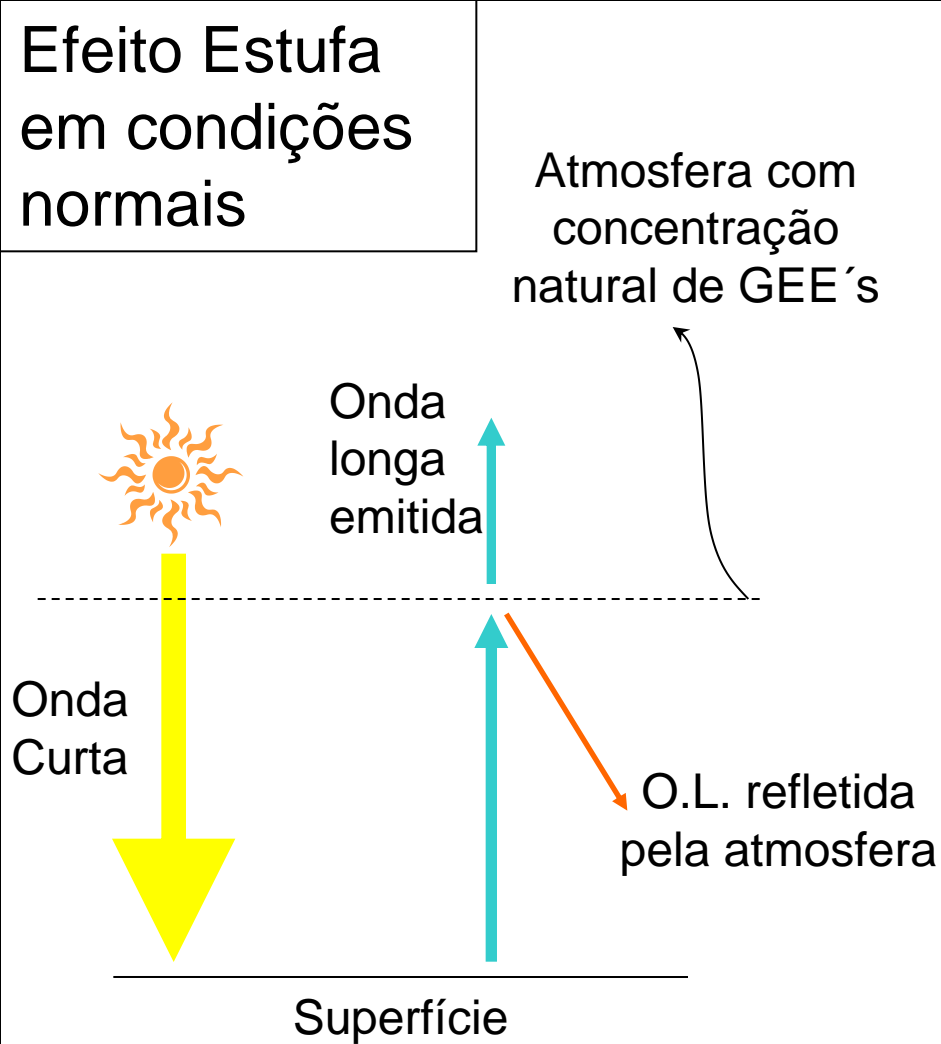
Cultura	Kc Inicial	Kc Interm.	Kc Final
Cevada	0.30	1.15	0.25
grão de bico	0.40	1.00	0.35
algodão	0.35	1.15-1.20	0.70-0.50
Milho	0.30	1.20	0.35
Amendoim	0.40	1.15	0.60
Sorgo	0.30	1.00-1.10	0.55
Amendoim	0.40	1.15	0.50
Girassol	0.35	1.15	0.35
Trigo	0.30	1.15	0.25

Complementando.... Balanco de Radiação e Energia as Mudanças Climáticas

→ Efeito Estufa: bases físicas

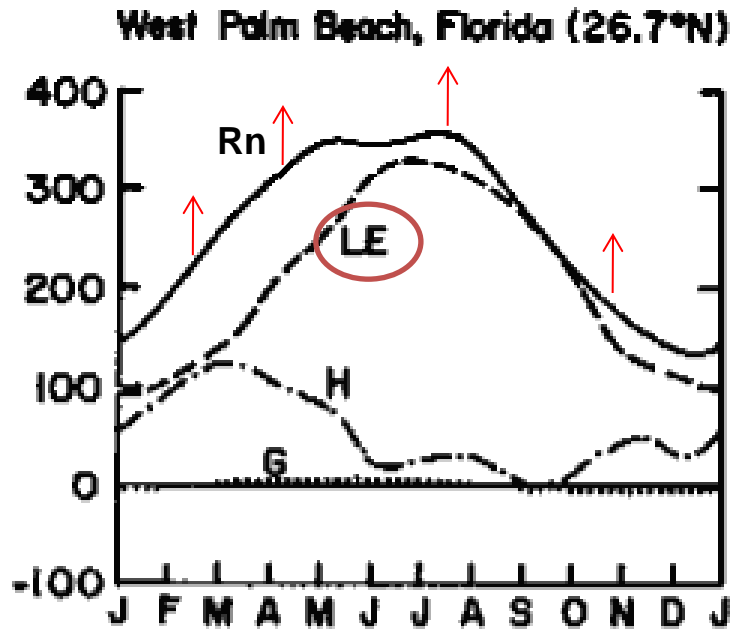
- GEEs atuam como filtros para a OL emitida pela superfície – temperatura em torno dos 300 K: **Alterações no BOL**
- Ondas curtas emitidas pelo Sol (temperatura em torno dos 6000K) sofrem pouca interferência da atmosfera terrestre, causando desequilíbrio no balanço de radiação da Terra. **Manutenção do BOC**

Aumento dos GEEs = R_n alterado



A quantidade de energia que chega ao sistema permanece o mesmo, mas uma parte da energia que era emitida ao espaço fica retida, aumentando sua temperatura.

Quais serão os impactos para locais úmidos e secos?



Locais úmidos: aumento de LE. Maior probabilidade de deficiência hídrica caso as chuvas não aumentem também.

Locais secos: temperatura ainda mais elevada. Seca intensificada.

$$LE/Rn \approx 0,75$$

$$H/Rn \approx 0,20$$

$$G \approx 0,05$$

Ambiente Úmido

$$LE/Rn \approx 0,10$$

$$H/Rn \approx 0,85$$

$$G \approx 0,05$$

Ambiente Seco

