



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS  
LEB 306 – Meteorologia Agrícola  
1º Semestre de 2017



# Balanço de radiação e energia em superfícies naturais

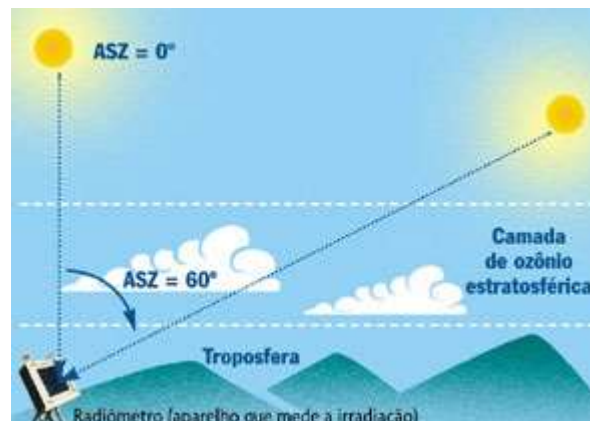
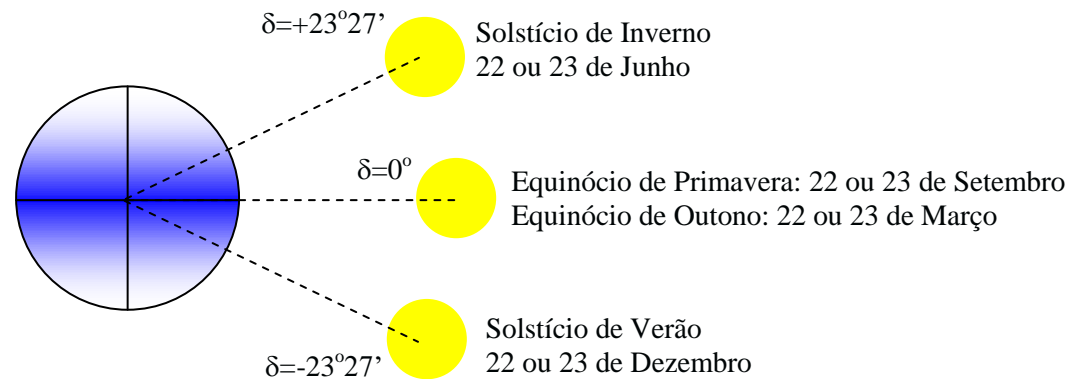
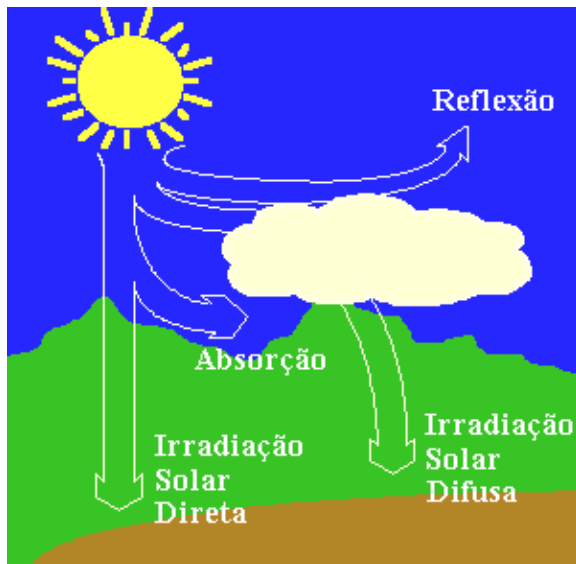
Prof. Fábio Marin

# Principal fonte energética para todos os processos...

- ✓ Todos os seres vivos exigem um fornecimento contínuo de energia livre, cuja fonte é a energia radiante do sol.
- ✓ A energia fixada na fotossíntese, embora represente um valor percentual pequeno em relação ao balanço energético de uma planta, é o início da cadeia trófica da Terra.
- ✓ Além disso, condiciona o balanço energético dos ecossistemas e a sobrevivência dos seres vivos, pois o nível energético do ambiente, representado pela temperatura, deve estar dentro de limites adequados à atividade fisiológica.

# Relembrando sobre a disponibilidade de energia radiante do sol

A magnitude da radiação solar global incidente em determinado instante numa superfície horizontal é função das **condições atmosféricas** e da **inclinação dos raios solares em relação à superfície**, o que depende da: localização geográfica (latitude e longitude); e da declinação solar (variável com a época do ano).



# Revisando as Leis da Radiação

*Para exemplificar vamos assumir a temperatura do sol (5500°C) e a temperatura média da superfície terrestre (18°C)*

→ **Lei de Wien:** o produto da temperatura absoluta de um corpo pelo comprimento de onda em que ocorre a maior emissão energética é constante:

$$\lambda \text{ (nm)} = 2,897 \cdot 10^6 \text{ nm} \cdot \text{K} / T \text{ (K)}$$

→ **Lei de Stefan-Boltzman:** qualquer substância acima de zero grau absoluto (K) absorve e emite radiação.

$$E = e \cdot \sigma \cdot T^4$$

onde  $e$  = radiação emitida pelo corpo;  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman, igual a  $5,673 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ , e  $T$  a Temperatura em K.

# Revisando as Leis da Radiação

→ **Lei de Lambert ou Lei dos Cossenos:** a densidade de fluxo de energia radiante recebida por uma superfície é diretamente relacionada ao ângulo de incidência dos raios solares:

$$I_s = I_o \cos Z$$

onde  $I_s$  é a densidade de fluxo de energia radiante incidente,  $I_o$  é a densidade de fluxo de energia radiante da fonte e  $Z$  é o ângulo zenital

→ **Lei de Beer:** a densidade de fluxo de energia radiante diminui exponencialmente a medida que penetra no interior de um meio homogêneo:

$$I_i = I_o \cdot e^{-k \cdot m}$$

onde  $I_o$  é a densidade de fluxo de energia radiante incidente no topo do meio considerado,  $I_i$  é a densidade de fluxo de energia radiante incidente no nível "i",  $k$  é o coeficiente de absorção ou extinção e 'm' a massa do corpo a ser atravessada.

# Balanco de radiação em comunidades vegetais

O balanço de radiação de uma folha é dependente das suas propriedades de **Reflexão, Transmissão e Absorção** da energia radiante.

## Refletância (r), transmitância (t) e absortância (a)

1. *Refletância ou Albedo (r)*

$$r = Q_{g\uparrow} / Q_{g\downarrow} \text{ ou } r\% = (Q_{g\uparrow} / Q_{g\downarrow}) \cdot 100$$

2. *Transmitância (t)*

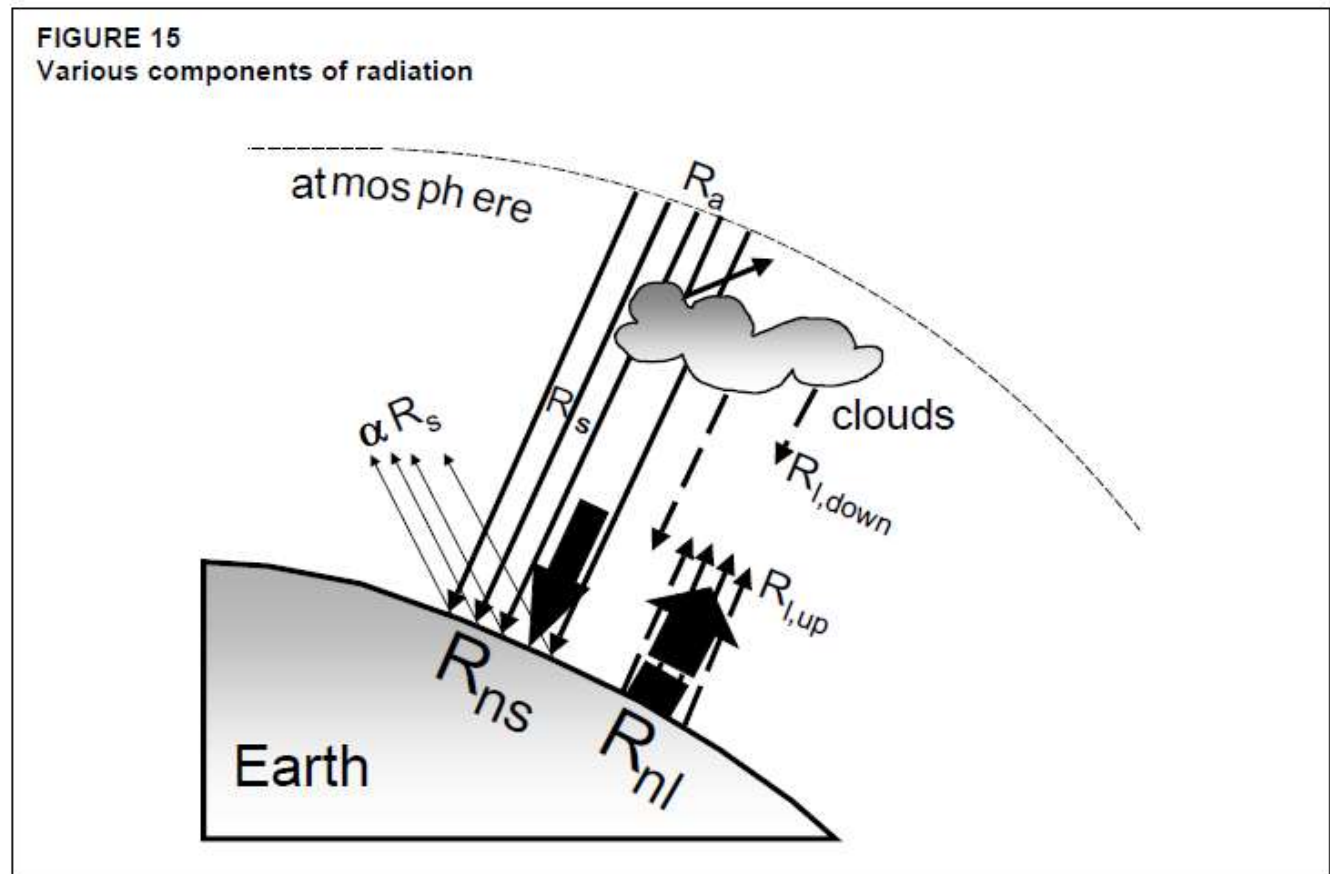
$$t = Q_{gt} / Q_{g\downarrow} \text{ ou } t\% = (Q_{gt} / Q_{g\downarrow}) \cdot 100$$

3. *Absortância (a)*

$$a = Q_{ga} / Q_{g\downarrow} \text{ ou } a\% = (Q_{ga} / Q_{g\downarrow}) \cdot 100$$

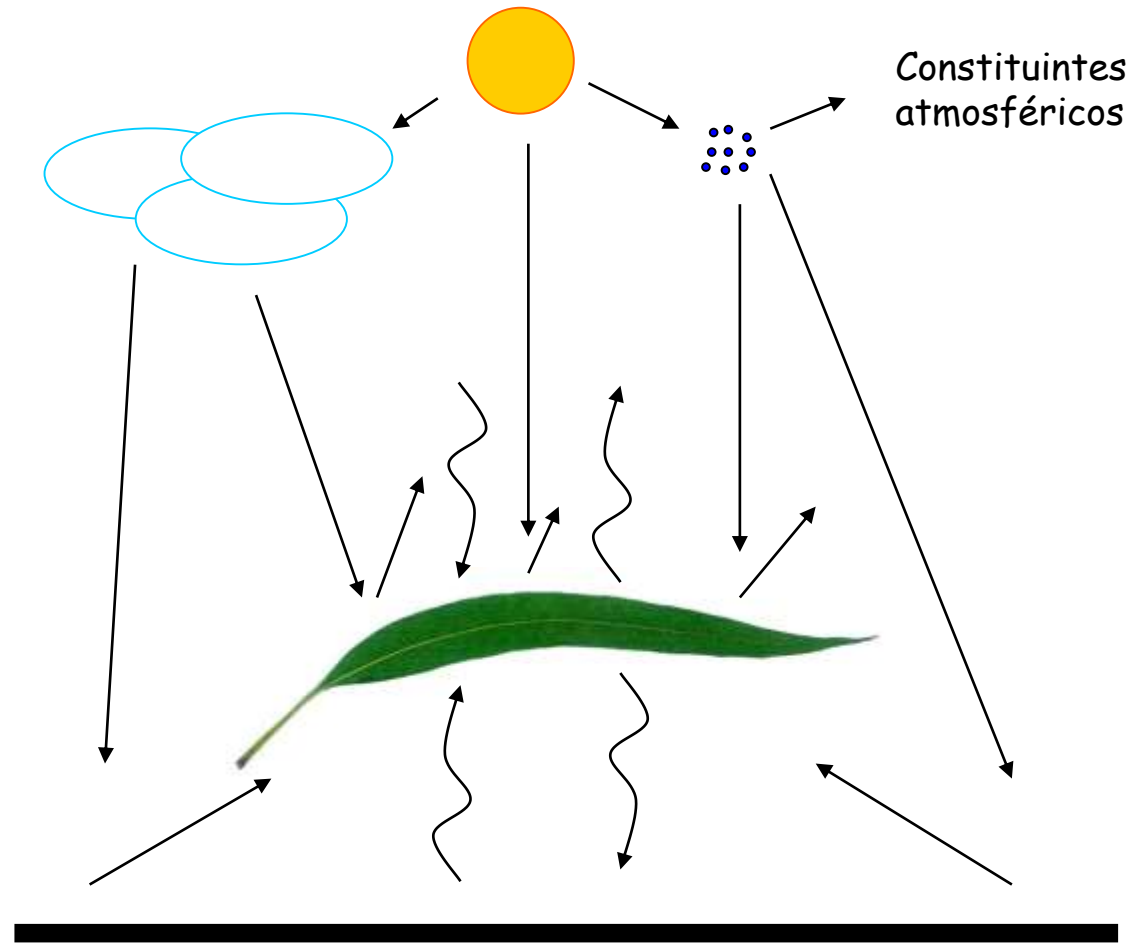
# Balanço de Radiação

A Terra reflete a radiação (de ondas curtas) emitida pelo Sol, mas também emite sua própria radiação (de ondas longas).



Fonte: Boletim FAO 56

# Balanco de Radiação para uma Folha

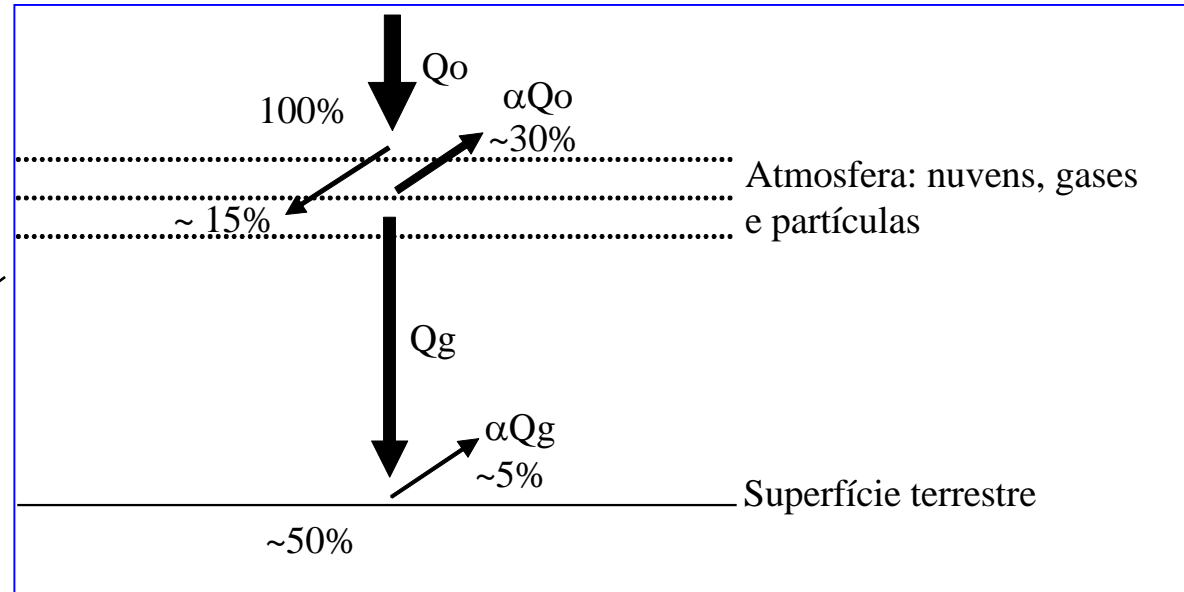




## Balanco médio de ondas curtas:

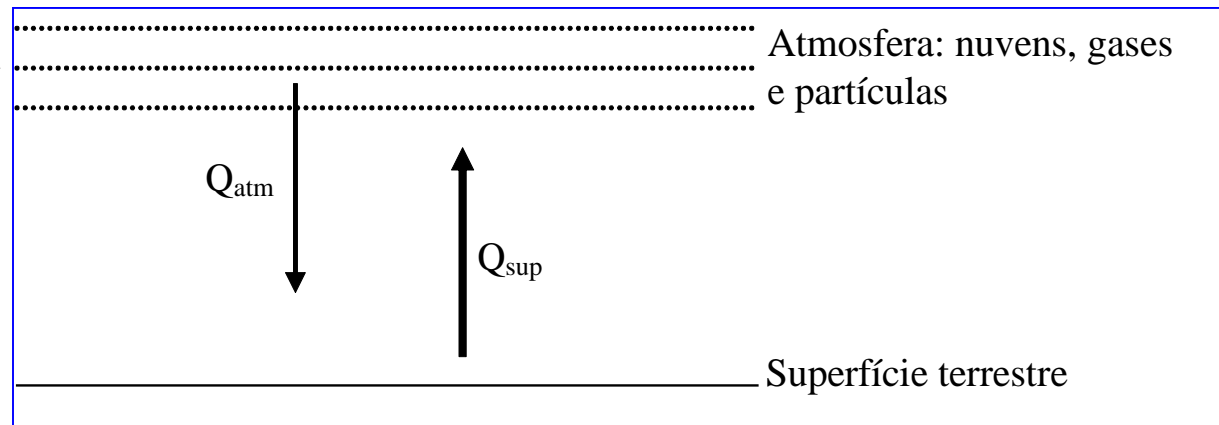
### Balanco de Radiação

$\lambda < 3000 \text{ nm}$



## Balanco médio de ondas longas:

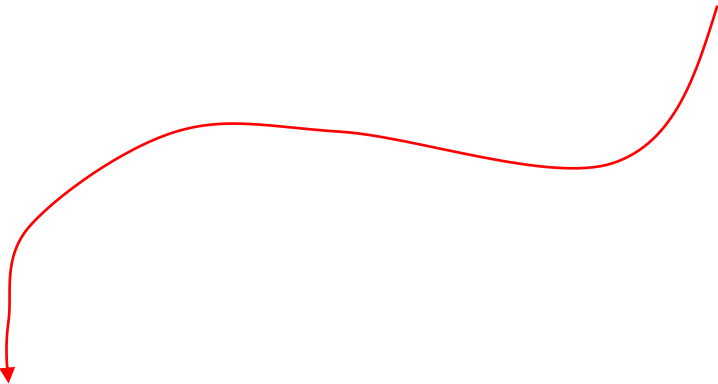
$\lambda > 3000 \text{ nm}$



$$\text{BOC} + \text{BOL} = \text{Rn}$$



**Balanço de Radiação**



$$\text{Rn} = \text{Calor Sensível} + \text{Calor no Solo} + \text{Calor Latente} + \text{Fotossíntese}$$



**Balanço de Energia**

# REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS FLUXOS DE ÁGUA, CARBONO, RADIAÇÃO E ENERGIA NA BIOSFERA.

BOC

+

BOL

=

Chuva

=

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

+

Escoamento lateral

+

Drenagem

+

Arm. Água

+

Respiração do solo

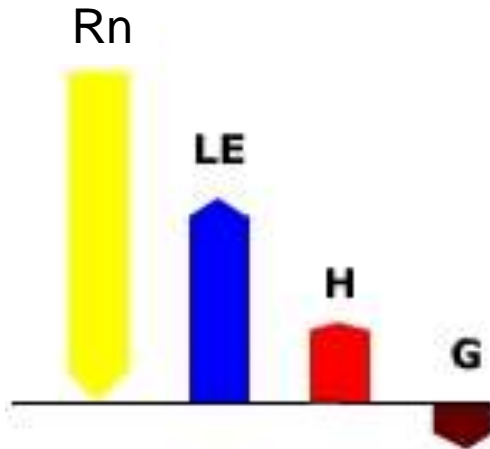
+

Arm. Carbono

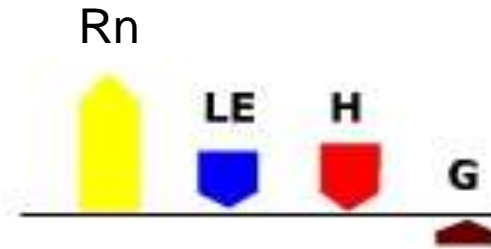
=

Fluxo de CO<sub>2</sub>

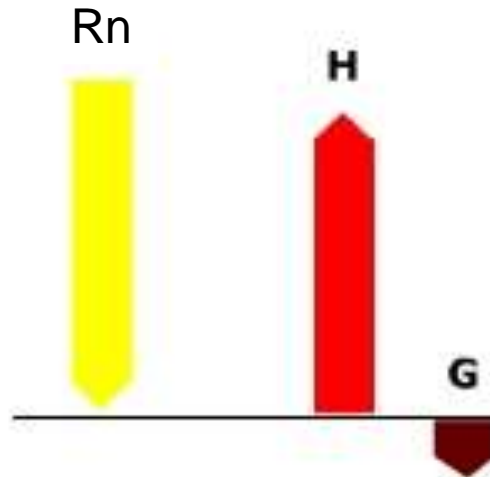
**Superfície úmida - dia**



**Superfície úmida - noite**



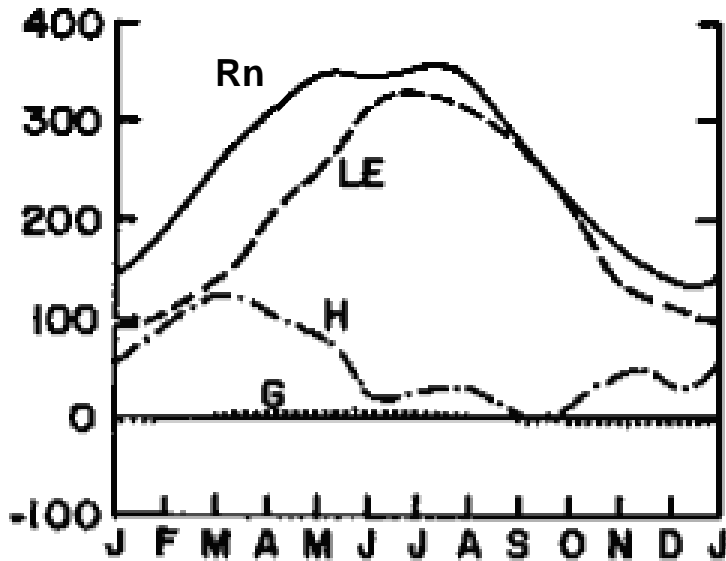
**Superfície seca - dia**



**Normalmente,  
quando a  
superfície está  
úmida LE  
predomina,  
consumindo  
cerca de 70 a  
80% de Rn**

**Sob condição  
de superfície  
seca, o  
processo de  
aquecimento do  
ar predomina**

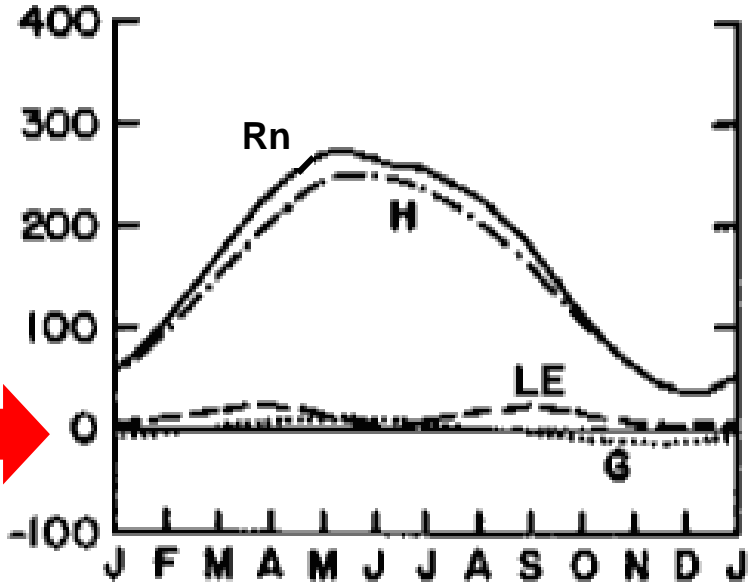
West Palm Beach, Florida (26.7°N)



LE/Rn ≈ 0,75  
 H/Rn ≈ 0,20  
 G ≈ 0,05  
 Ambiente Úmido

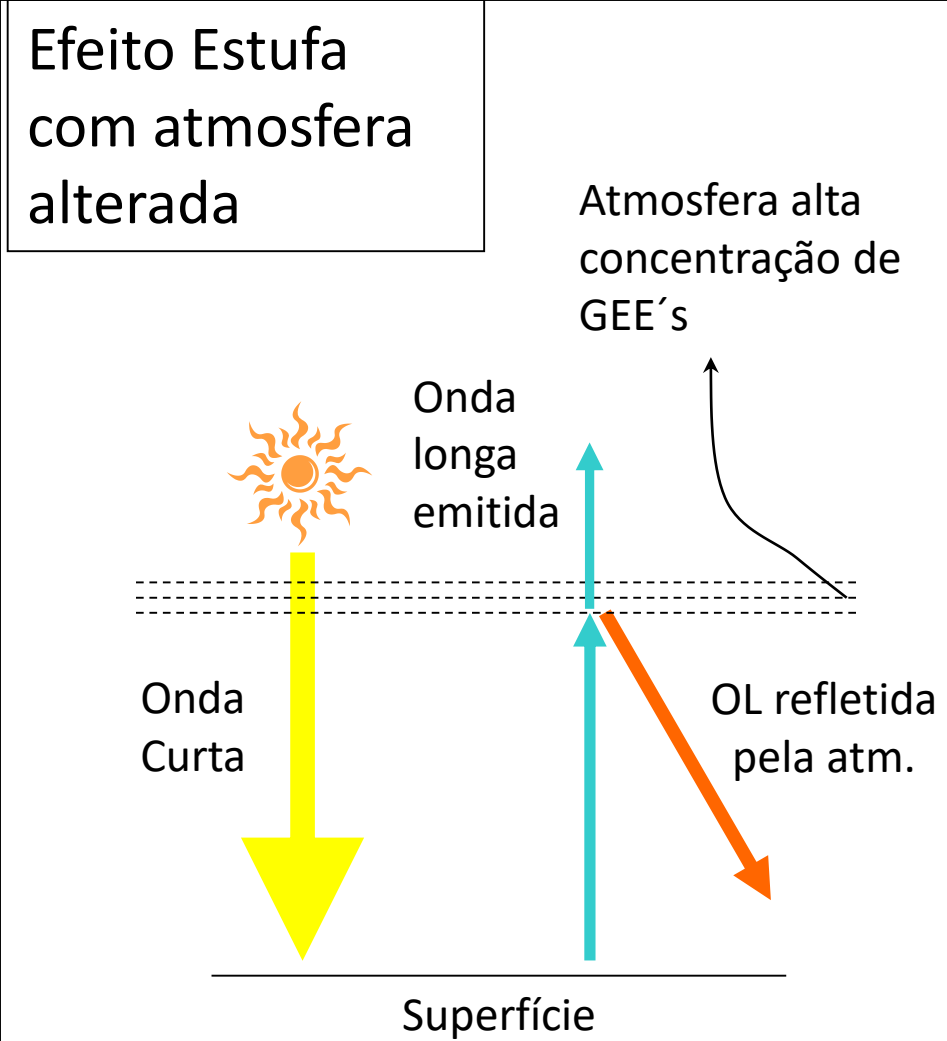
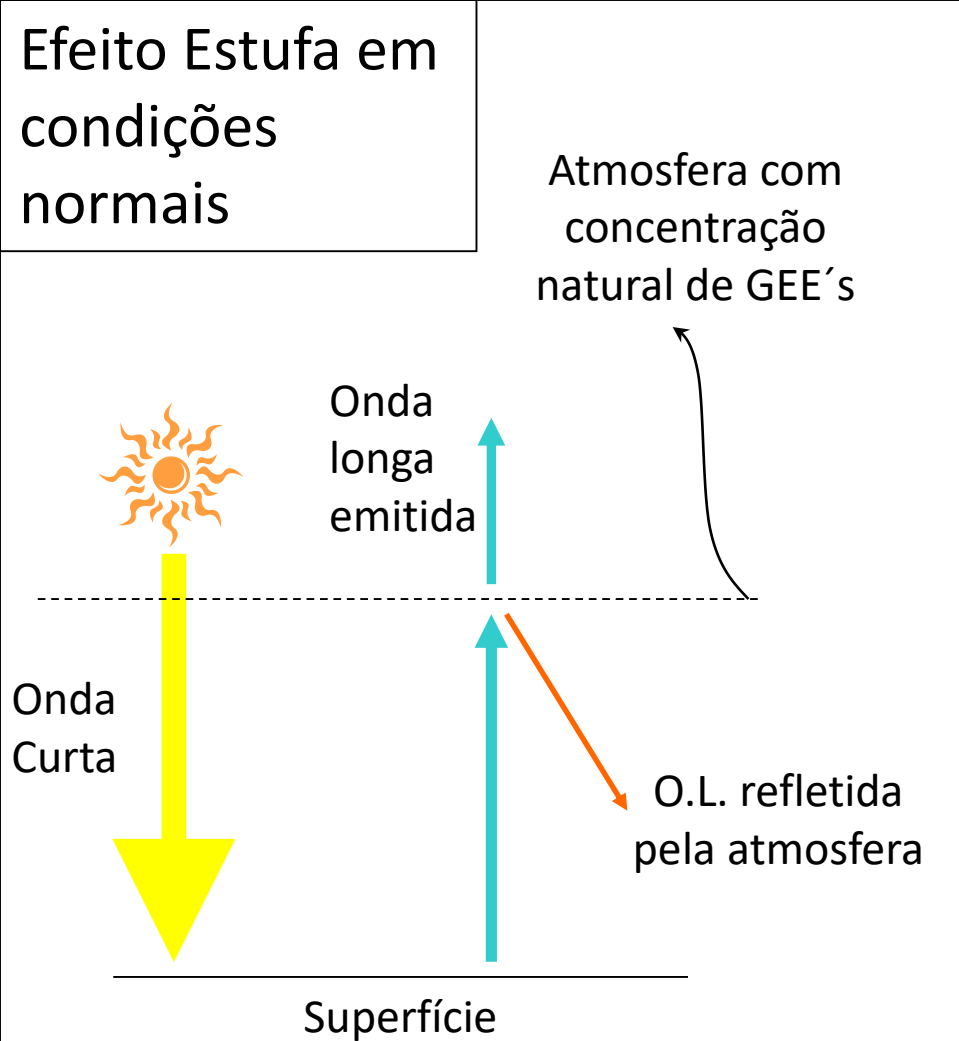
LE/Rn ≈ 0,10  
 H/Rn ≈ 0,85  
 G ≈ 0,05  
 Ambiente Seco

Yuma, Arizona (32.7°N)



# Efeito Estufa: bases físicas

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



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.

# Balanço de Radiação

- Saldo de radiação ( $R_n$ )
- $R_n = BOC + BOL$

$$BOC = Q_g - rQ_g$$

Dia: Positivo  
Noite: negativo

$$BOL = Q_a - Q_s$$

Dia: negativo  
Noite: negativo

$$R_n = Q_g (1-r) + Q_a - Q_s$$

Dia: positivo  
Noite: negativo



Balanço de ondas curtas - BOC

$$\text{BOC} = Q_g - rQ_g = Q_g (1 - r)$$

Balanço de ondas longas - BOL

$$\text{BOL} = Q_{atm} - Q_{sup}$$

Saldo de Radiação = BOC + BOL

$$R_n = \text{BOC} + \text{BOL} = Q_g - rQ_g + Q_{atm} - Q_{sup}$$

Lei de Stefan-Boltzmann

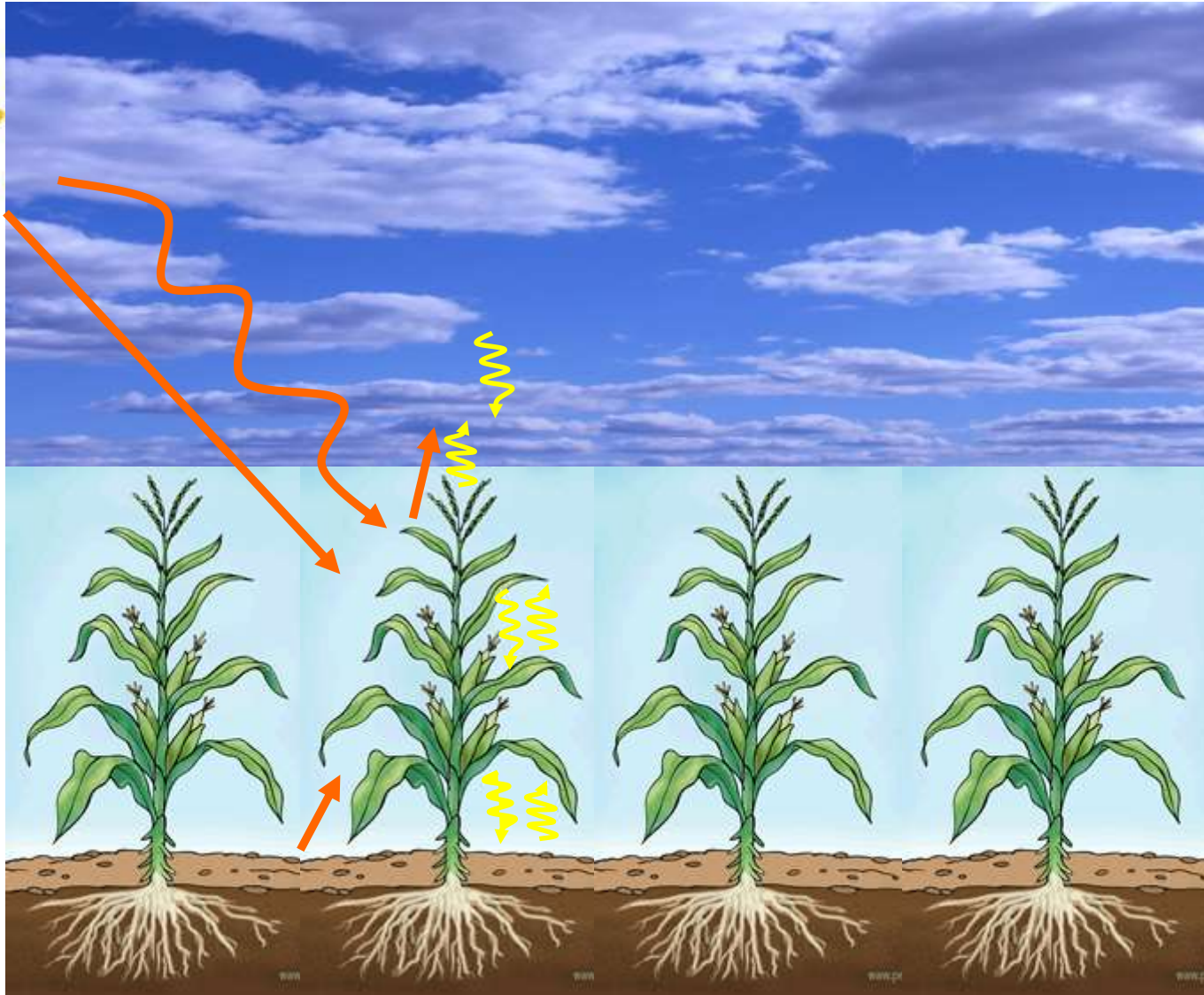
$$Q_{atm} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4$$

$$Q_{sup} = \varepsilon_{sup} \cdot \sigma \cdot T_{sup}^4$$

Tabela 10.1. Coeficientes de reflexão ( $r$ ) para algumas superfícies. Adaptado de Rosenberg et al. (1983) e de Vianello & Alves (1991).

| Superfície      | Coef. de Reflexão (r, %) | Superfície              | Coef. de Reflexão (r, %) |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Água            | 5                        | Trigo                   | 24                       |
| Areia seca      | 35 a 45                  | Feijão                  | 24                       |
| Areia úmida     | 20 a 30                  | Tomate                  | 23                       |
| Solo claro seco | 25 a 45                  | Abacaxi                 | 15                       |
| Solo cinza      | 10 a 20                  | Sorgo                   | 20                       |
| Solo escuro     | 5 a 15                   | Videira                 | 18                       |
| Gramado         | 20 a 30                  | Floresta                | 10 a 15                  |
| Algodão         | 20 a 22                  | Nuvens                  | 50 a 90                  |
| Alface          | 22                       | Animal de pelo preto    | 10                       |
| Milho           | 16 a 23                  | Animal de pelo vermelho | 18                       |
| Arroz           | 12                       | Animal de pelo amarelo  | 40                       |
| Batata          | 20                       | Animal de pelo branco   | 50                       |

# Medida dos fluxos radiativos em comunidades vegetais



# Tipos de Cultivo

1. Monocultura (anual e perene)
2. Consórcios
3. Sistemas Agroflorestais
4. Cultivos em Ambiente Protegido



# Medida do Saldo de Radiação

## Saldo radiômetros

Medida separada dos balanços de ondas curtas e longas



Kipp & Zonen Net Radiometer

Medida conjugada dos balanços de ondas curtas e longas





# Balanço de Radiação

- Aproximação de Brunt (1932):

Admite-se que  $T_{sup} \cong T_{atm}$ , que  $\varepsilon_{sup} \cong 1$  e que  $\varepsilon_{atm} \propto$  umidade do ar ( $e_a$ ), tem-se que:

$$BOL = \left[ \sigma * \left[ \frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a}) * \left( 1,35 \frac{Q_g}{Q_{g_{cs}}} - 0,35 \right) \right]$$

$$Q_{g_{cs}} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot Q_o$$

→ Z é a altitude da estação (m)

- Estimativa do Saldo de radiação (SR) -

$$SR = Q_g(1 - \alpha) - \left\{ \sigma * \left[ \frac{(T_{max}^4 + T_{min}^4)}{2} \right] * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a}) * \left( 1,35 \frac{Q_g}{Q_{g_{cs}}} - 0,35 \right) \right\}$$

# Unidades das Equações

BOL - ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )

$\sigma$  (constante Stefan-Boltzmann) - ( $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  ou  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W K}^{-4} \text{ m}^{-2}$ )

Tmax - temperatura máxima diária ( $\text{K} = \text{T}^{\circ}\text{C} + 273,16$ )

Tmin - temperatura mínima diária ( $\text{K} = \text{T}^{\circ}\text{C} + 273,16$ )

ea - pressão atual de vapor (kPa)

$Q_g/Q_{g_{cs}}$  radiação de onda curta relativa - (máximo 1)

$Q_g$  radiação solar medida ou estimada (métodos estudados) - ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )

$Q_{g_{cs}}$  radiação solar céu límpido (sem nuvens) - ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )

SR - saldo de radiação - ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  ou  $\text{W m}^{-2}$ )

# Exercício

Calcule o saldo de radiação de uma área gramada, para hoje em Piracicaba (lat: 22°42'30''S, alt. 546m), assumindo que os dados diários registrados na estação foram:

$$T_{\max} = 34,1^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\min} = 20,6^{\circ}\text{C}$$

$$e_a = 1,31\text{kPa}$$

$$n = 10,5 \text{ horas}$$

$$\text{Albedo grama} = 23\% \text{ ou } 0,23$$

# Balanço de Radiação e Geada

- Do ponto de vista meteorológico, geada é quando há deposição de gelo sobre as superfícies expostas ao relento em noites de intenso resfriamento. Neste caso, temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  é o suficiente para provocar a geada.
- Do ponto de vista agrônômico, geada é um fenômeno atmosférico que provoca a morte das plantas ou de suas partes (folhas, ramos, frutos), devido à ocorrência de baixas temperaturas que acarretam o congelamento dos tecidos vegetais, havendo ou não a formação de gelo sobre as plantas.



# Efeitos da Geada

- O congelamento do tecido gera extravasamento do conteúdo celular e ruptura da membrana plasmática.
- Os resultado desse fenômeno é a desidratação das células, com secamento das folhas, necrosamento dos vasos condutores necrosados e danos aos Nos frutos.

# Sensibilidade à Geada

- Cada espécie (as vezes cada variedade!) tem uma temperatura letal abaixo da qual há morte dos vegetais.
- Ela pode ser variável em função da fase fenológica, estado nutricional e fitossanitário.

| Cultura  | Germinação | Florescimento | Frutificação |
|----------|------------|---------------|--------------|
| Trigo    | -9         | -2            | -4           |
| Aveia    | -8         | -2            | -4           |
| Feijão   | -5         | -3            | -4           |
| Girassol | -5         | -3            | -3           |
| Soja     | -3         | -3            | -3           |
| Milho    | -2         | -2            | -3           |
| Sorgo    | -2         | -2            | -3           |
| Algodão  | -1         | -2            | -3           |
| Arroz    | -0,5       | -1            | -1           |

# Planejamento e Controle

- A seleção de áreas e espécies/variedades
- Regiões mais elevadas têm maiores riscos (macroescala);
- Terrenos com face voltada para o Sul e áreas de vale podem ter “deposição” de ar frio com elevação do risco de geada (topoescala);
- Uso de técnicas de consorciação, nebulização e cobertura de plântulas podem ser utilizadas para controlar as geadas (microescala).