



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

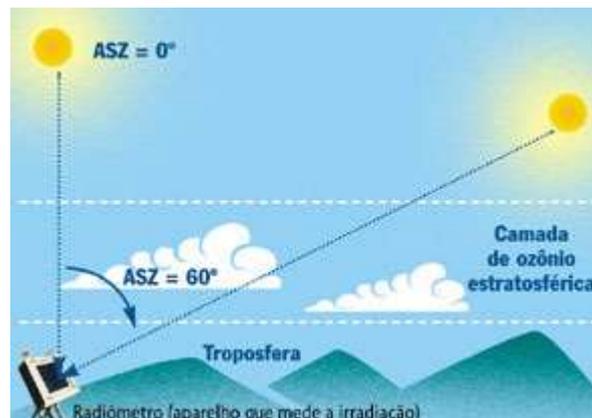
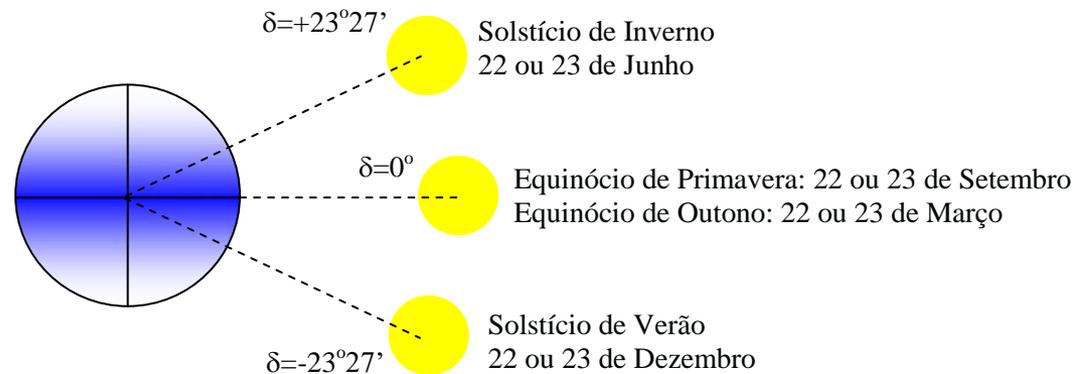
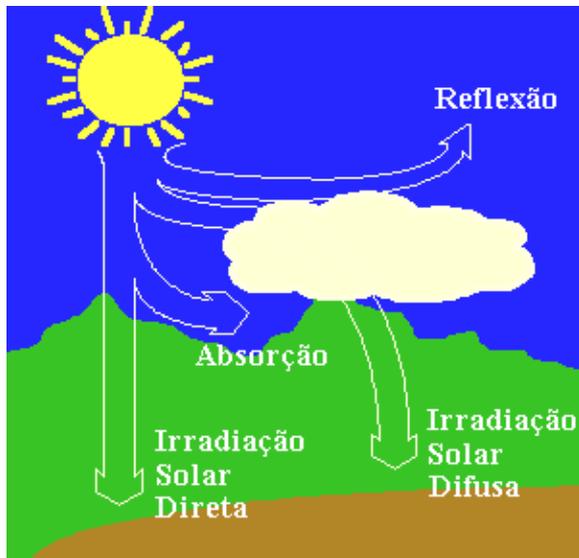
Prof. Fábio Marin

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; σ 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.

Balanço 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)*

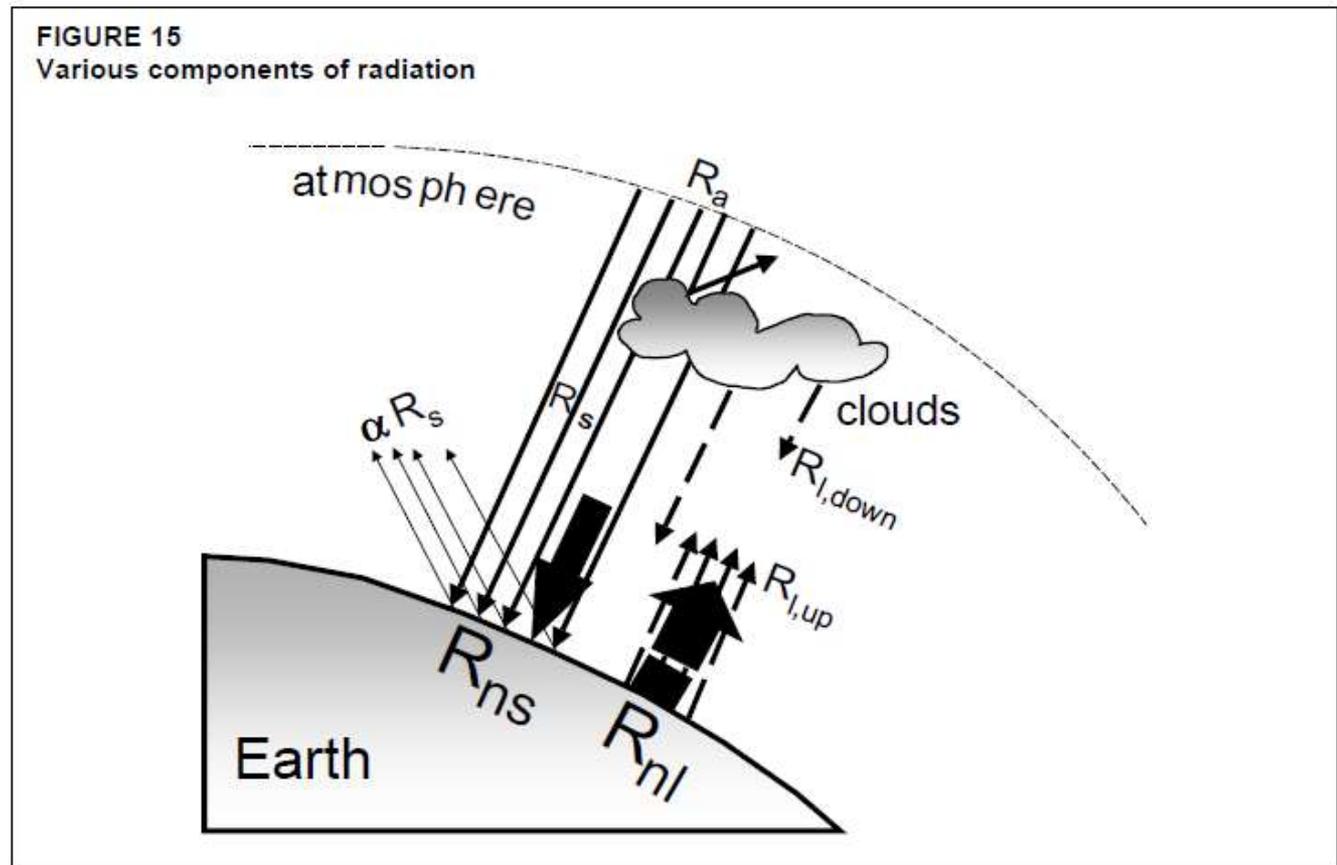
$$t = Q_{gt} / Q_{g\downarrow} \text{ ou } t\% = (Q_{gt} / Q_{g\downarrow}) \cdot 100$$

3. *Absortância (a)*

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

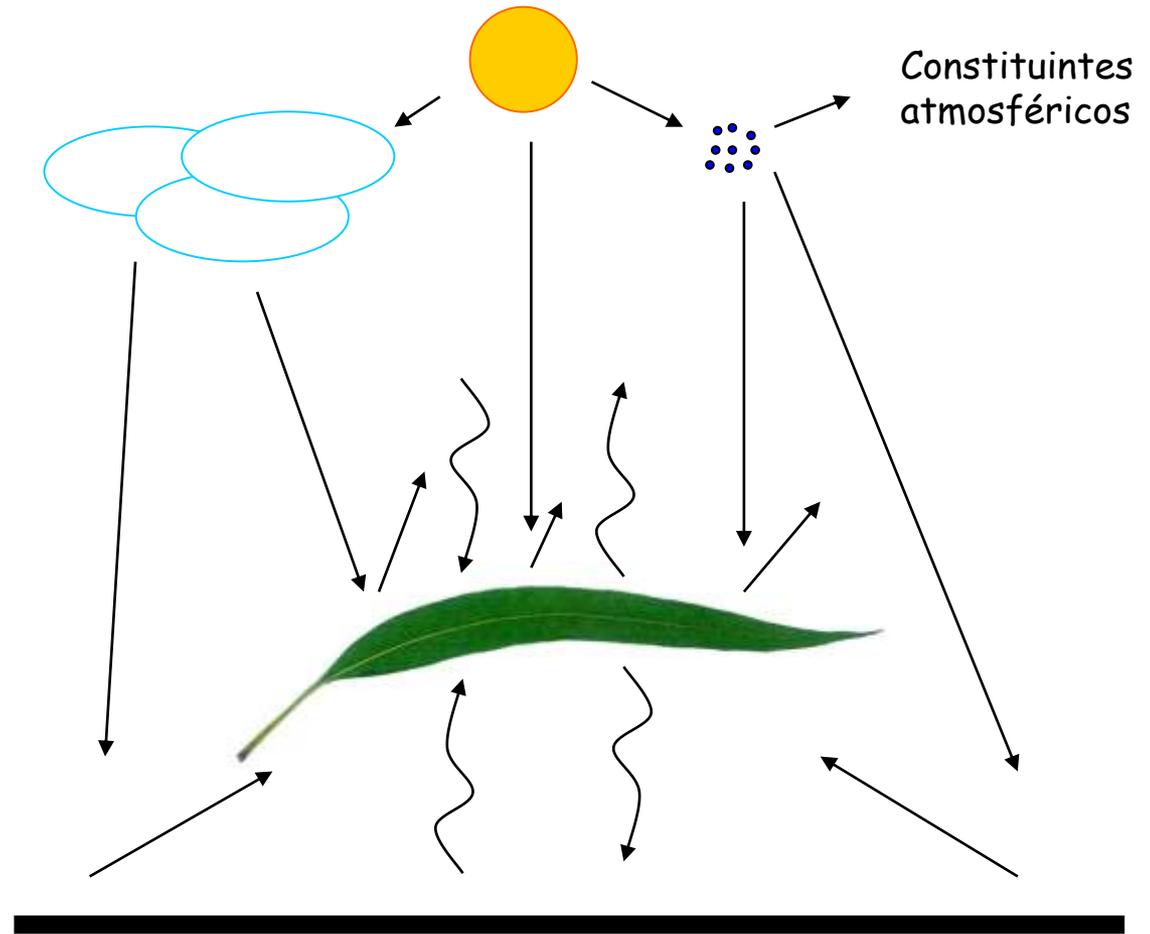
Balanço de Radiação

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



Fonte: Boletim FAO 56

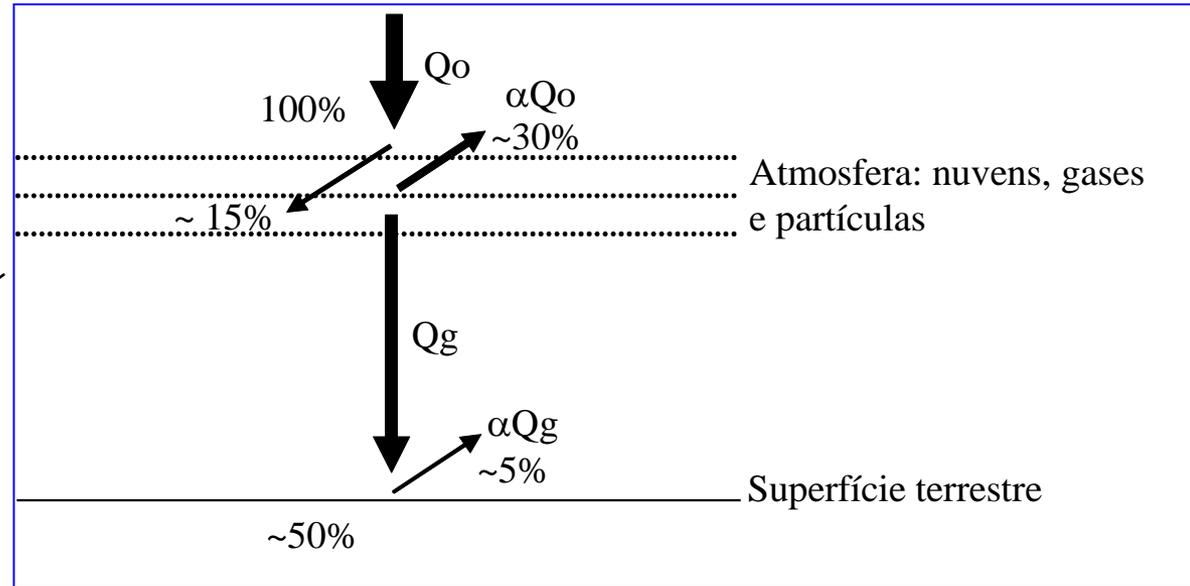
Balanco de Radiação para uma Folha



Balanço médio de ondas curtas:

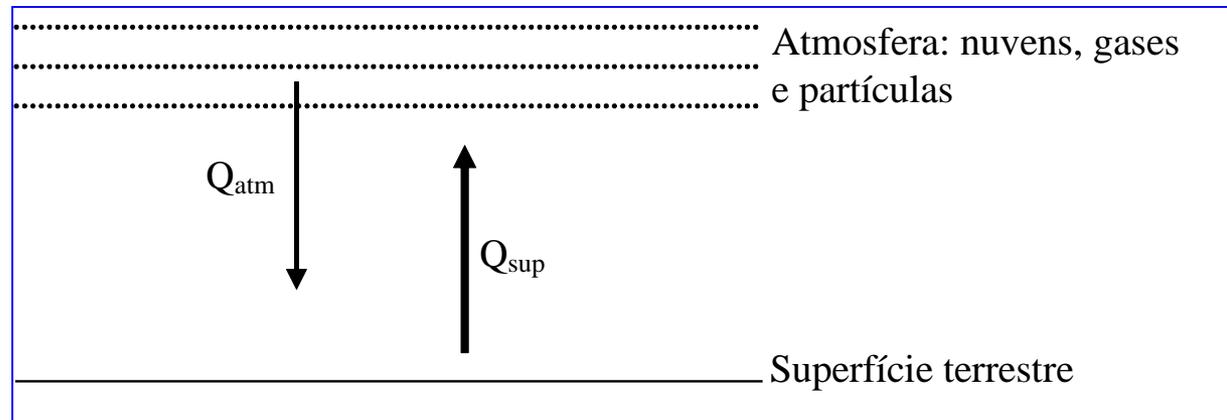
Balanço de Radiação

$\lambda < 3000 \text{ nm}$



Balanço médio de ondas longas:

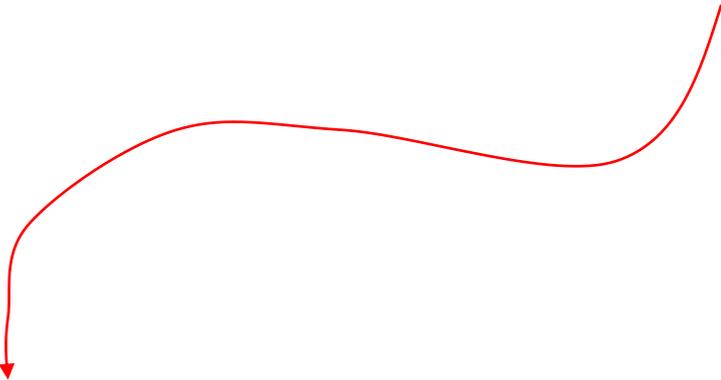
$\lambda > 3000 \text{ nm}$



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



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

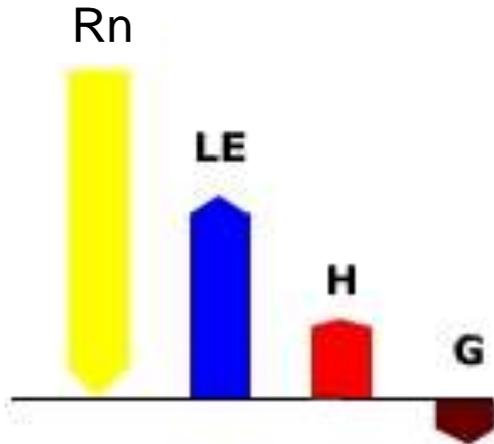
+

Arm.
Carbono

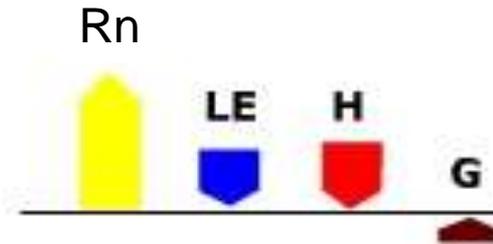
=

Fluxo de
CO₂

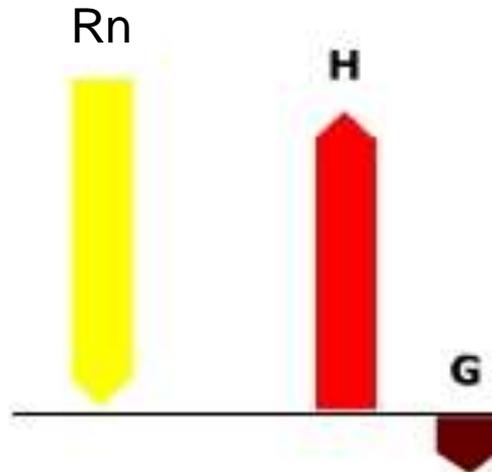
Superfície úmida - dia



Superfície úmida - noite



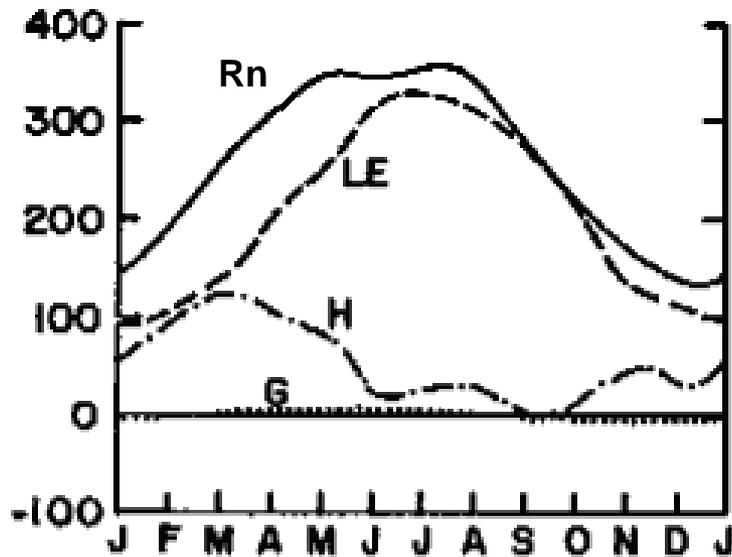
Superfície seca - dia



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)



$LE/Rn \approx 0,75$

$H/Rn \approx 0,20$

$G \approx 0,05$

Ambiente
Úmido

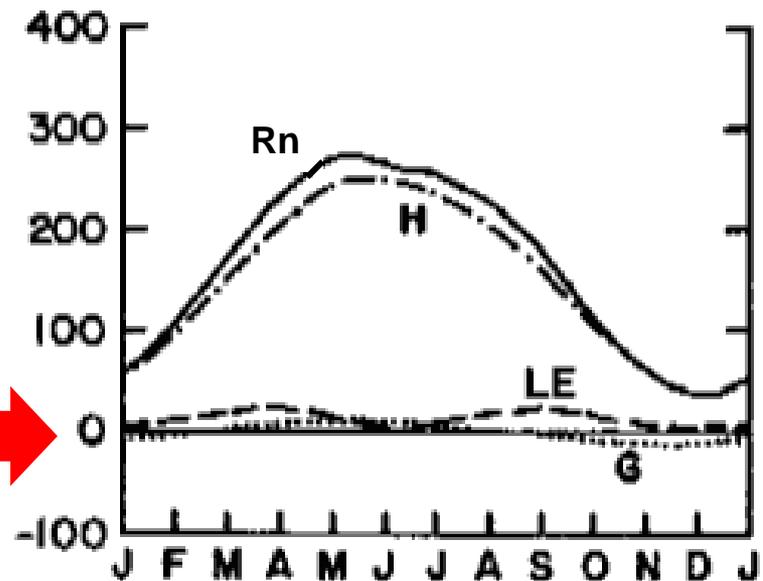
$LE/Rn \approx 0,10$

$H/Rn \approx 0,85$

$G \approx 0,05$

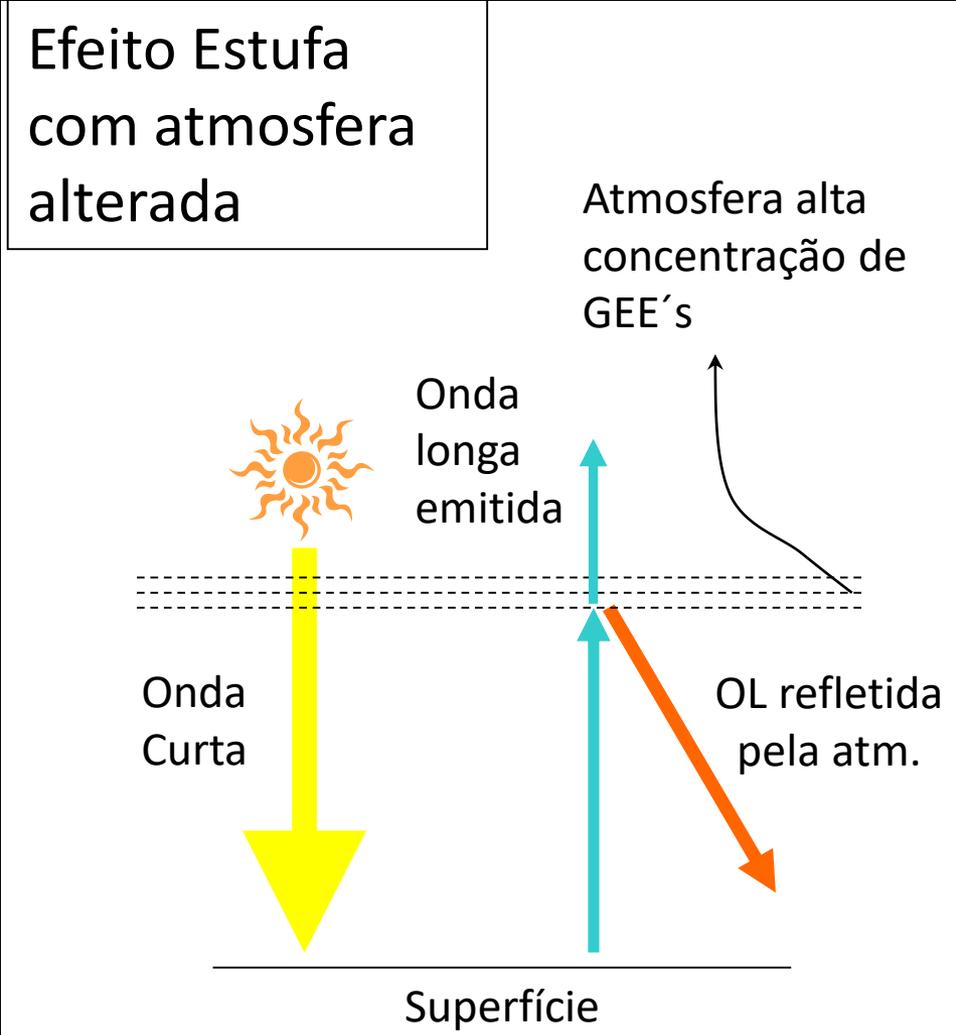
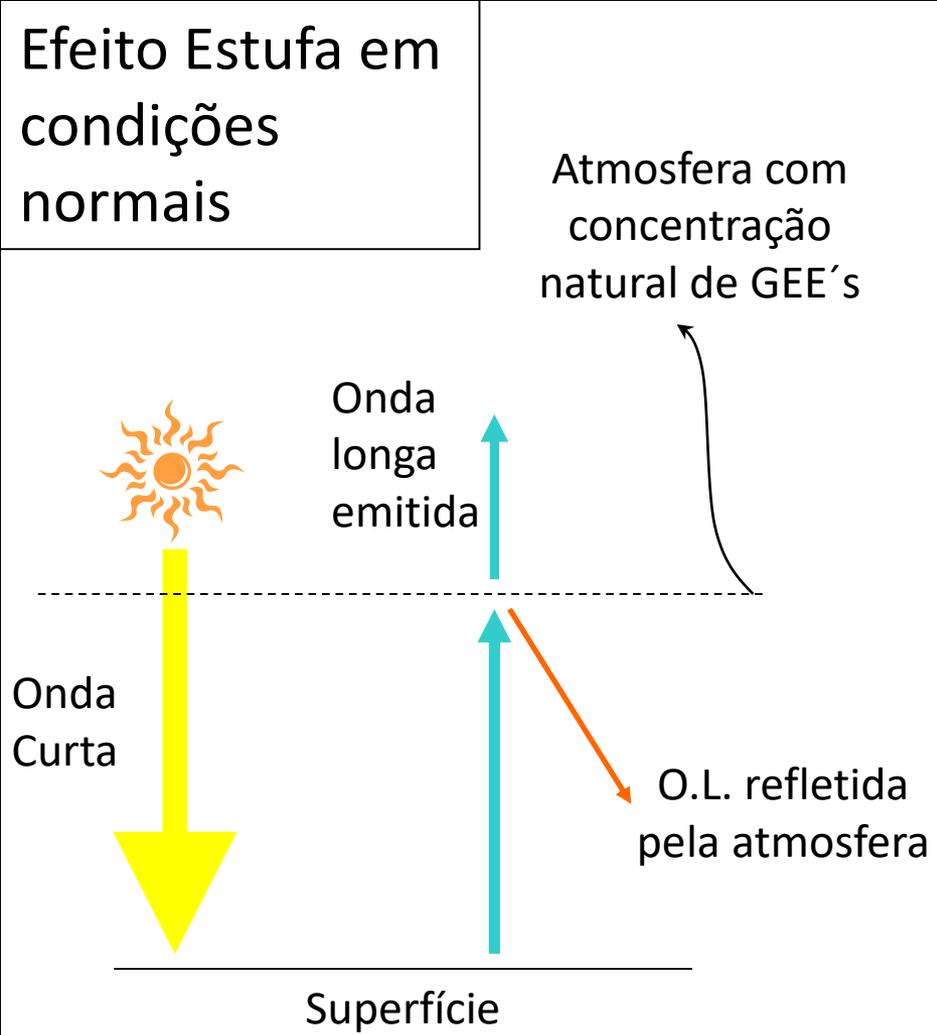
Ambiente
Seco

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

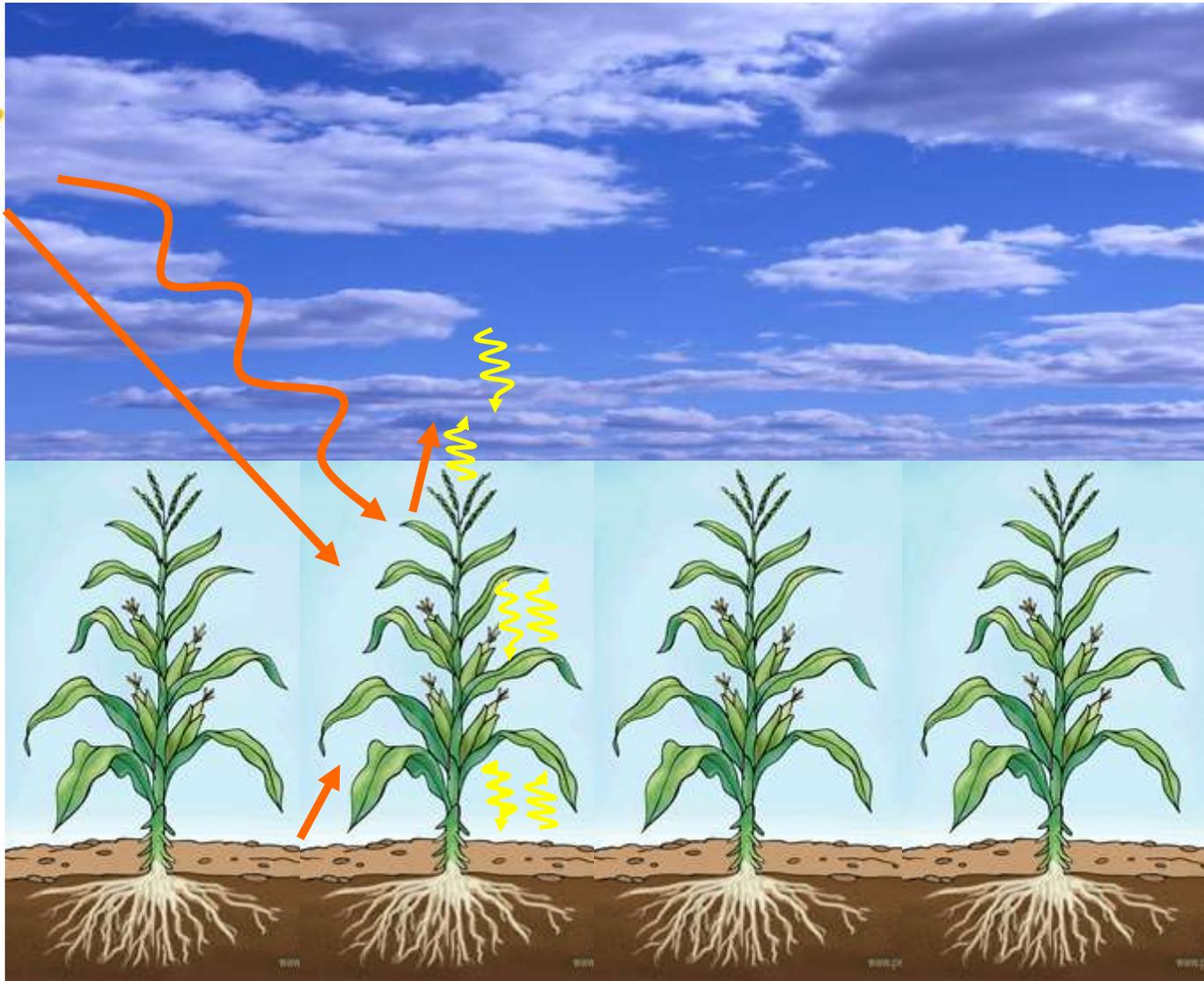
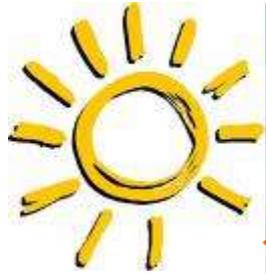
$$Q_{atm} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4$$

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

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

σ (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 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°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).