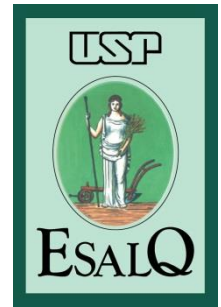




UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA 'LUIZ DE QUEIROZ'  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIODISSISTEMAS  
LEB0495 - Análise Física do Ambiente

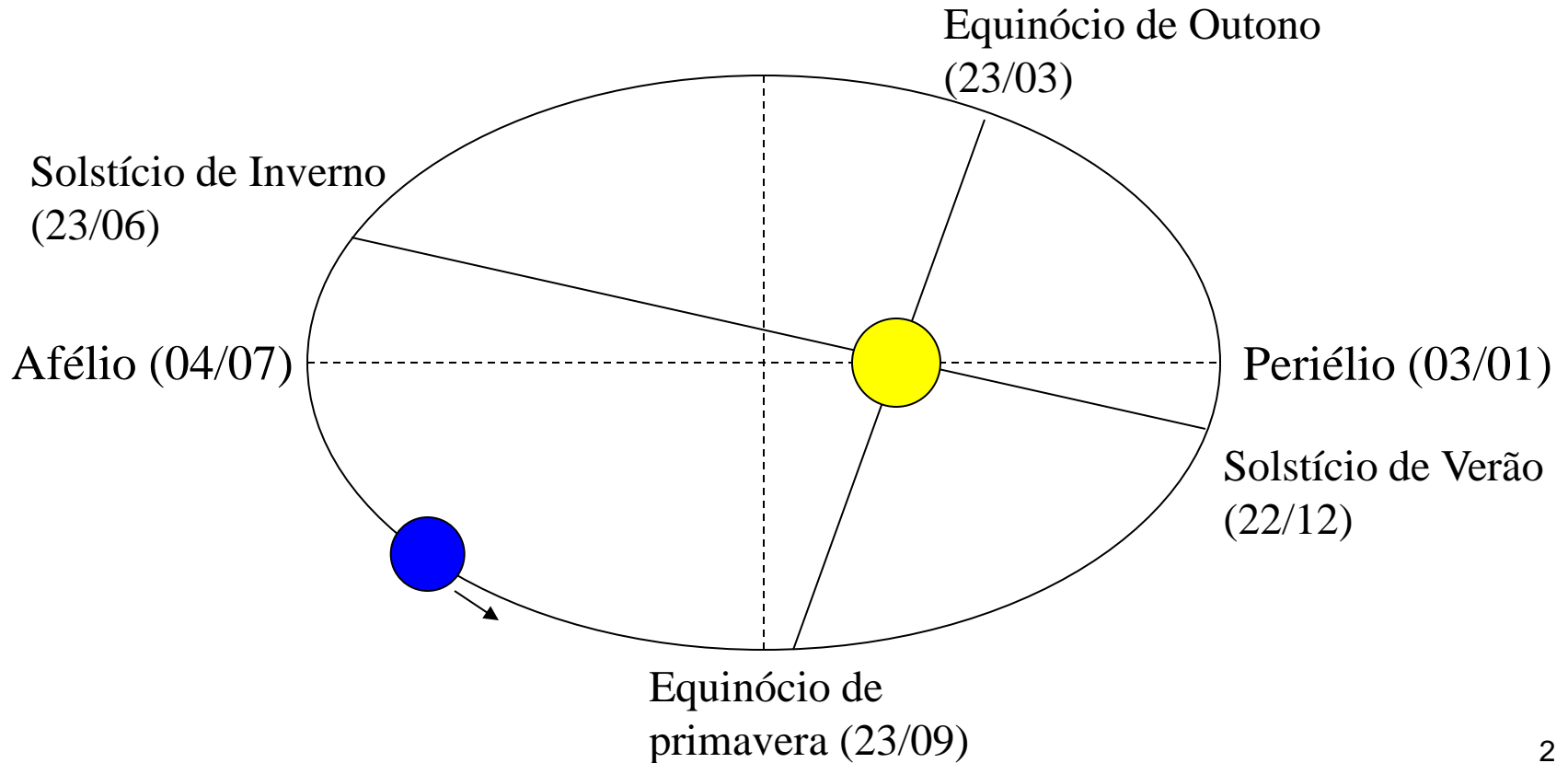


# Energia Solar

Prof. Felipe Gustavo Pilau

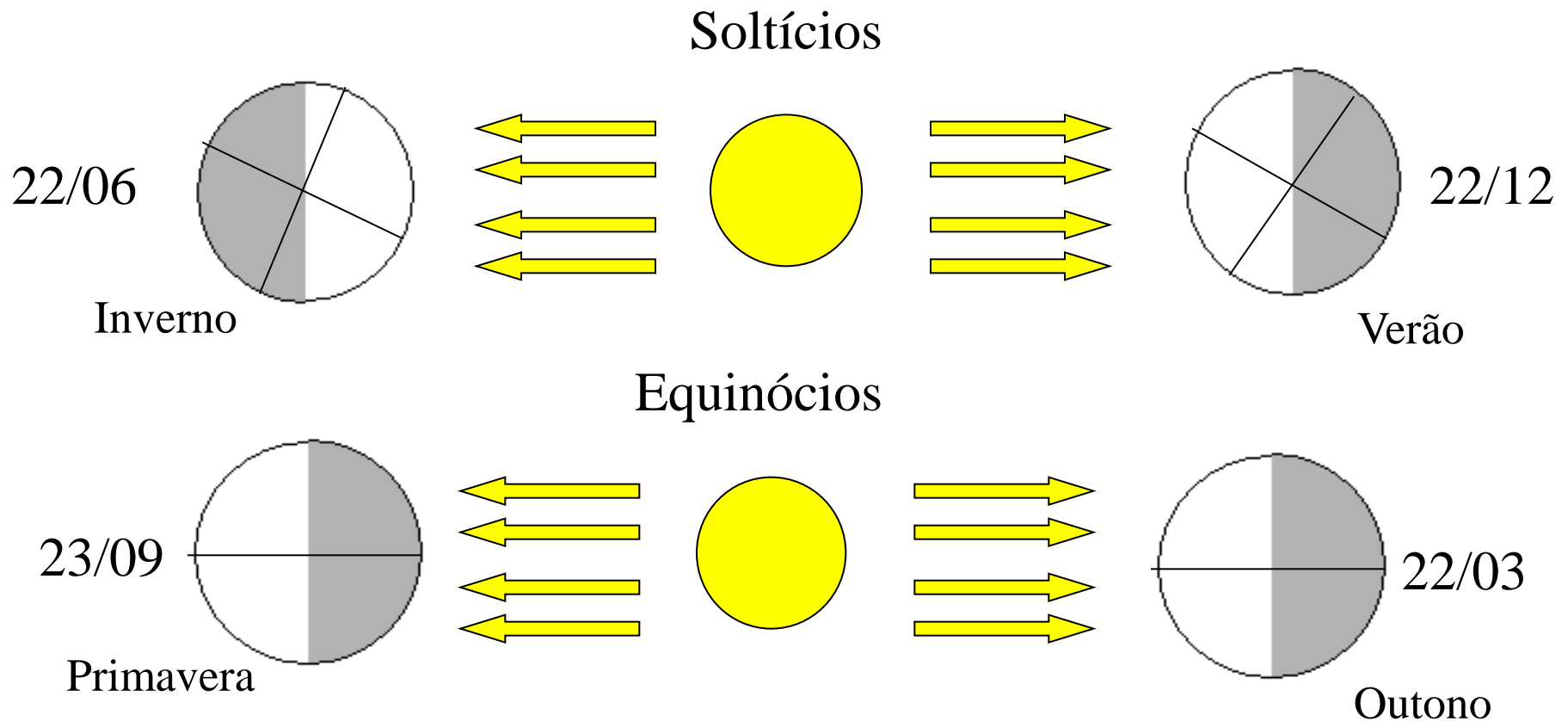
# Movimento de translação

- Posição relativa Terra-Sol:



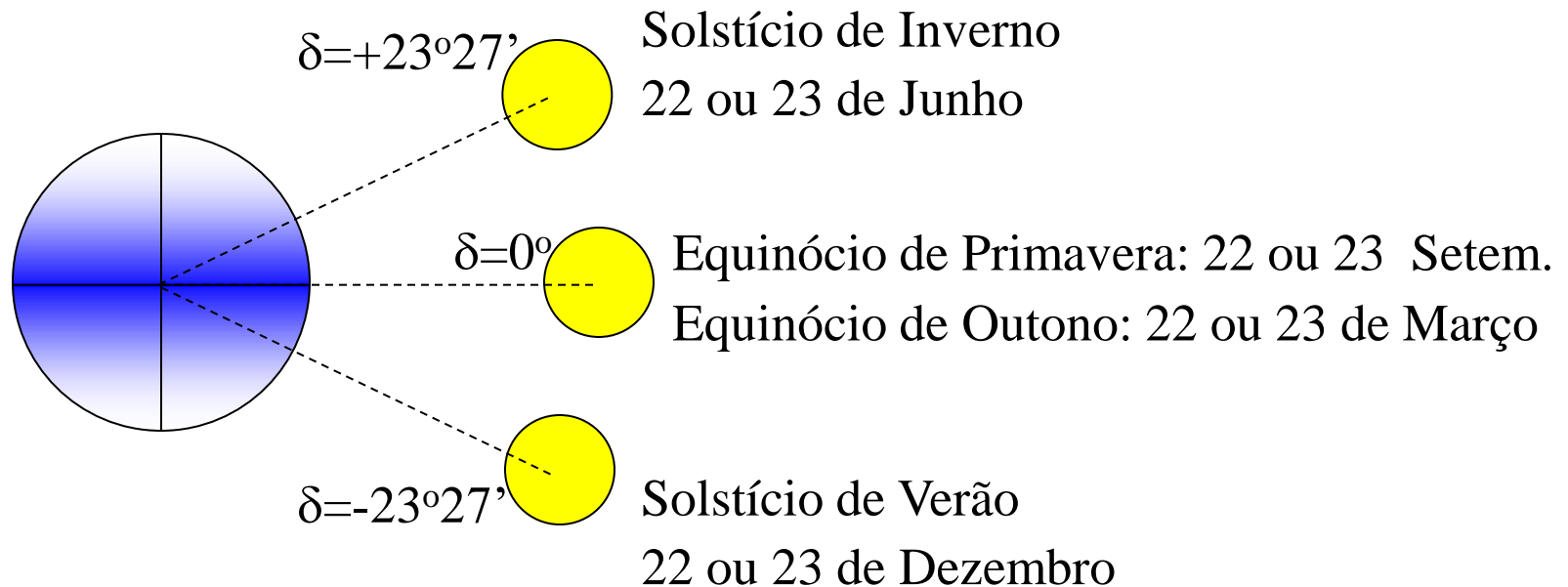
# Estações do ano

- Posição relativa Terra-Sol:



# Declinação Solar

- ângulo formado entre uma linha imaginária ligando o centro da Terra ao centro do sol, com o plano do Equador. Ao longo do ano, a declinação varia entre  $-23^{\circ}27'$  (solstício de verão) e  $+23^{\circ}27'$  (solstício de inverno). (*Do latim: solstitiu = Sol Parado*).



# Cálculo da Declinação

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ \frac{360(NDA - 80)}{365} \right]$$

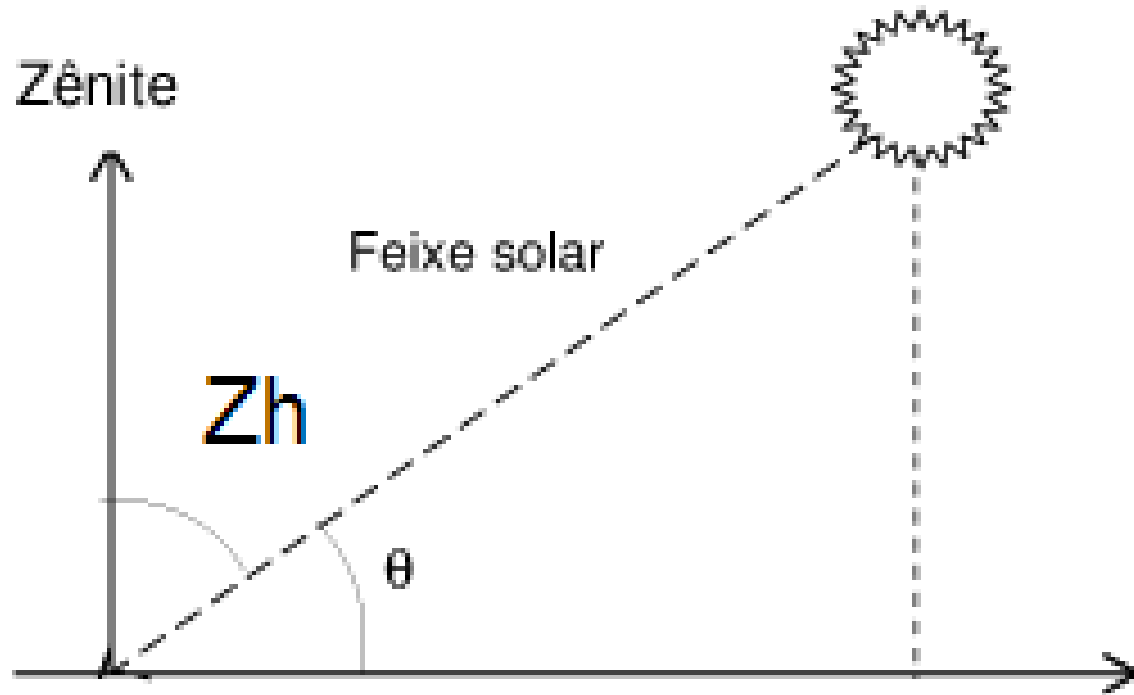
NDA é o número do dia do ano

# NDA

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365

# Cálculo do Ângulo Zenital

- $Z_h = f(\text{latitude, ângulo horário, declinação})$



# Cálculo do Ângulo Zenital

$$\cos Zh = \operatorname{sen}\phi.\operatorname{sen}\delta + \cos\phi.\cos\delta.\cos h$$

$\phi$  é a latitude do local (graus e décimos)

$\delta$  é a declinação do sol (graus e décimos)



# Ângulo Zenital ao Meio-Dia

Quando o sol passa pelo meridiano no local (meio-dia):

$$h = 0 \text{ e } \cos 0 = 1$$

Assim,

$$\cos Z_{12} = \operatorname{sen}\phi \cdot \operatorname{sen}\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot 1$$

$$\cos Z_{12} = \cos(\delta - \phi)$$

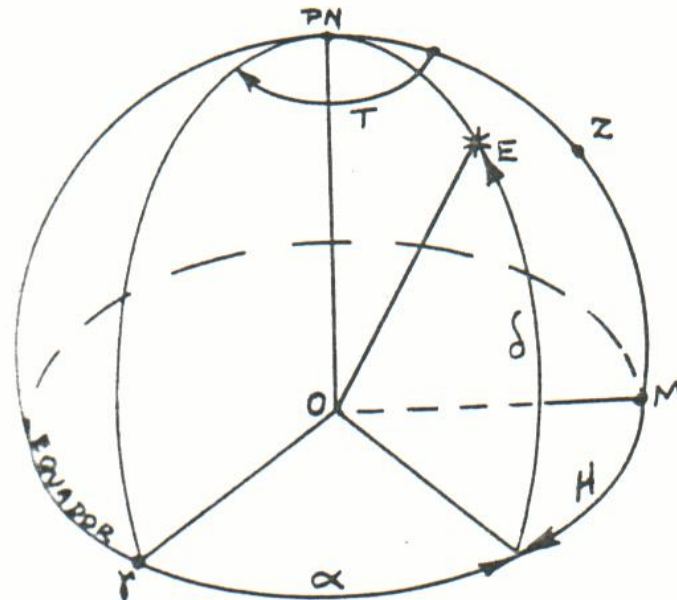
$$Z_{12} = \delta - \phi$$

Exercício rápido: Calcule o Ângulo Zenital ao meio-dia, em Campinas, para o solstício de verão, equinócios e solstício de inverno.

# Ângulo Horário

$h$  é ângulo horário do sol – ângulo formado pelo plano meridiano do sol e o plano meridiano do local determinado.

$$h = (\text{hora local} - 12) \cdot 15^\circ \cdot \text{hora}^{-1}$$



# Constante Solar

- Constante solar ( $J_0$ ) é um valor que expressa a densidade de fluxo de radiação (energia/área.tempo) em uma superfície perpendicular aos raios solares, acima da atmosfera;
- Distância Terra-Sol:  $1,5 \cdot 10^8$  km
- Potência do Sol:  $3,87 \cdot 10^{26}$  W
- Área da esfera:  $4 * \pi * r^2 = 2,83 \cdot 10^{23}$  m<sup>2</sup>
- $J_0 = 3,87 \cdot 10^{26}$  W /  $2,83 \cdot 10^{23}$  m<sup>2</sup>  $\cong 1367$  W/ m<sup>2</sup>

# Cálculo da Constante Solar

- $J_0 = I/A = 1367 \text{ W/m}^2$  ou  $118,11 \text{ MJ/m}^2.\text{d}$
- Corrigindo  $J_0$  para a variação da distância Terra-Sol ao longo do ano, tem-se que

- $J_0' = J_0 (d/D)^2$

$$(d/D)^2 = 1 + 0,033 * \cos(NDA * 360/365)$$

# Cálculo do Fotoperíodo (N)

- $N = \text{hora do pôr-do-sol} - \text{hora do nascer-do-sol}$
- Considerando a trajetória simétrica do solo em relação ao meio-dia, podemos admitir que:
- $N = 2 * hn/15^\circ \text{ hora}^{-1}$
- Ao nascer, o ângulo zenital é  $90$  e  $\cos 90 = 0$ . Assim,

$$0 = \text{sen}\phi.\text{sen}\delta + \text{cos}\phi.\text{cos}\delta.\text{cosh}n$$

$$\text{cosh}n = \frac{(-\text{sen}\phi.\text{sen}\delta)}{(\text{cos}\phi.\text{cos}\delta)} = -\text{tg}\phi.\text{tg}\delta$$

$$hn = \arccos(-\text{tg}\phi.\text{tg}\delta)$$

# Exercício

- Calcule para o dia de hoje, em Piracicaba: (lat.: $22^{\circ}43'S$ )
  - a) a declinação solar
  - b) o ângulo zenital ao meio-dia
  - c) o fotoperíodo e o horário do nascer e pôr-do-sol
  - d) a constante solar

# Radiação Solar Extraterrestre 'Qo'

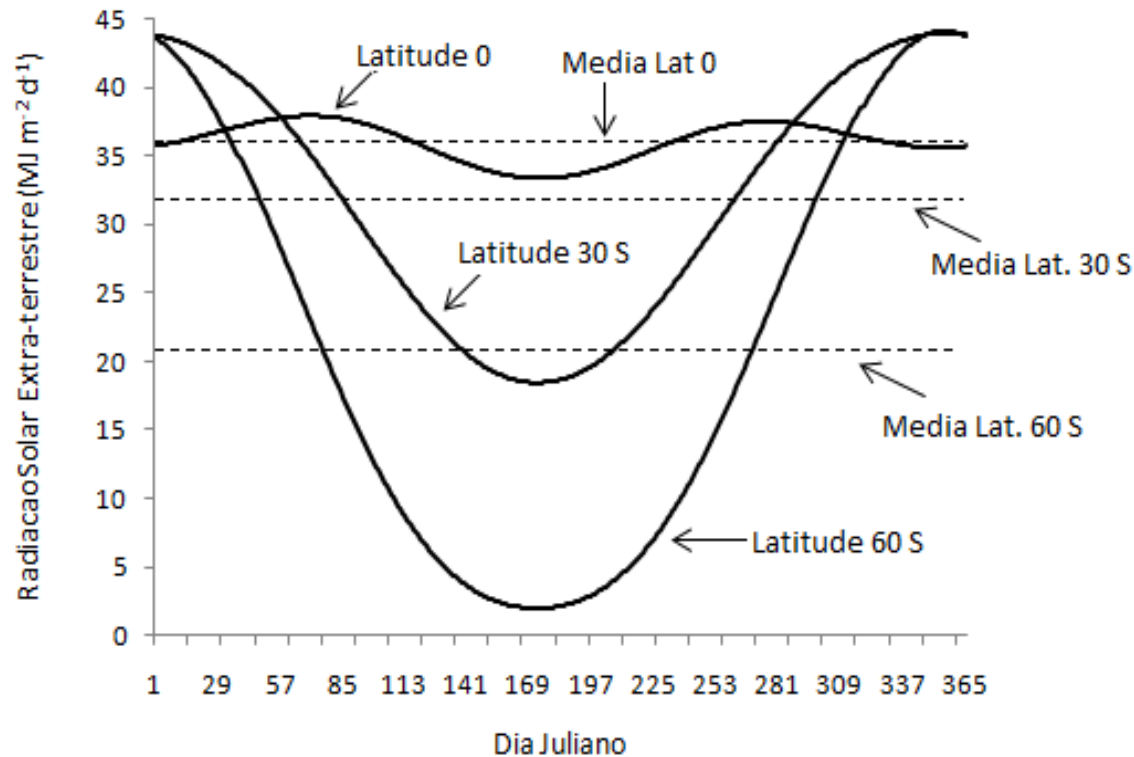
Radiação solar incidente por unidade de área numa superfície posicionada paralelamente à superfície da Terra e no topo da atmosfera – sem qualquer interação com a atmosfera. É uma função da *latitude* ( $\Phi$ ), da época do ano (*declinação solar* ( $\delta$ )) e do *ângulo horário* ( $hn$ ) (função da  $\Phi$  e  $\delta$ ).

$$Q_o = 37,6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \left[ \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right) hn \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}hn \right]$$

$$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{NDA \cdot 360}{365}\right)$$

# Radiação Solar Extraterrestre

Calcule  $Q_0$  para localidades de  $\theta$  iguais a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $60^\circ$ S, para as datas de solstícios e equinócios.





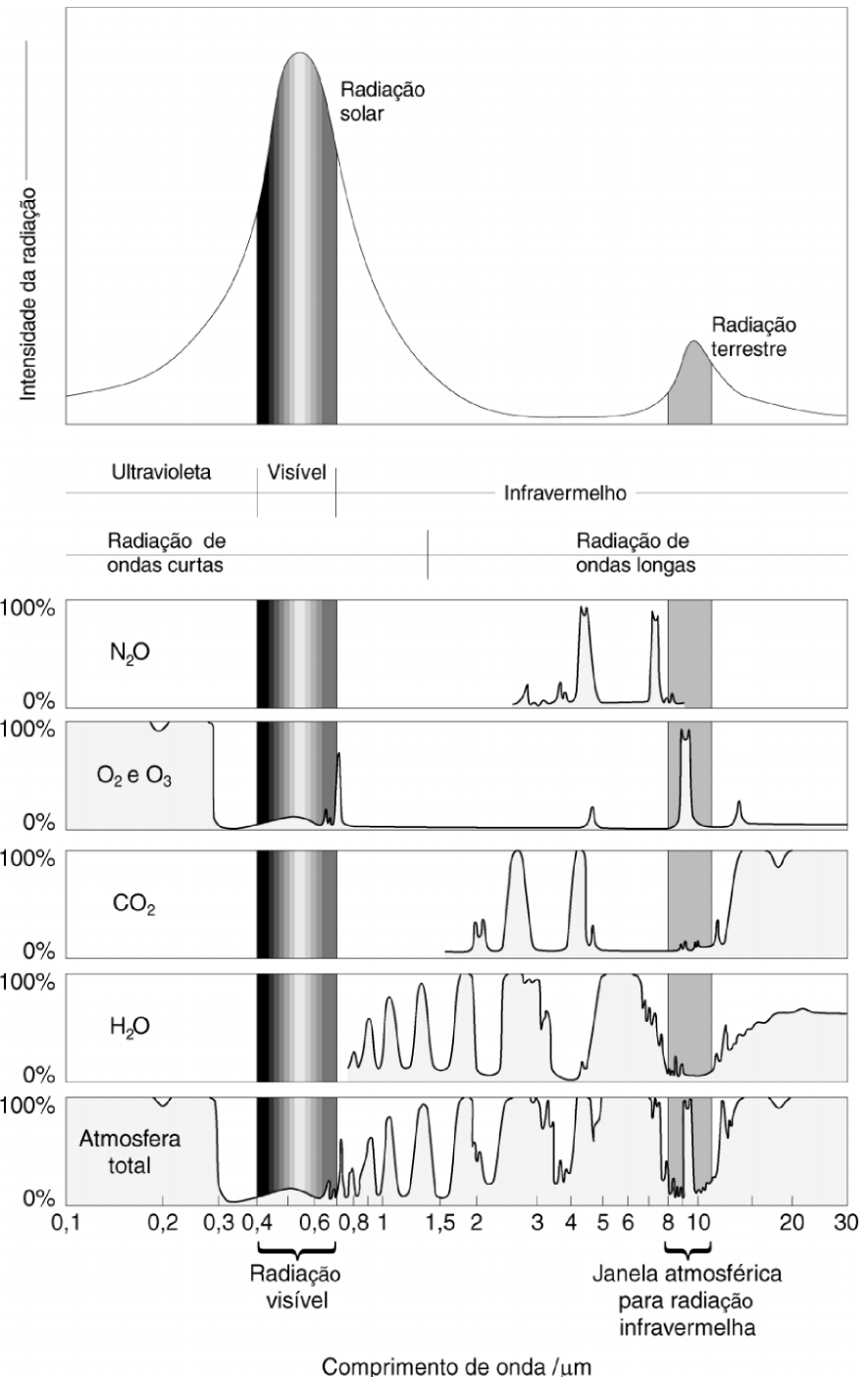
# EXERCÍCIO

→ Calcule para Piracicaba e sua cidade natal, para a data de seu aniversário: a declinação solar, o ângulo zenital ao meio-dia, o fotoperíodo, os horários de nascer e pôr-do-sol, a constante solar e a radiação solar extraterrestre.

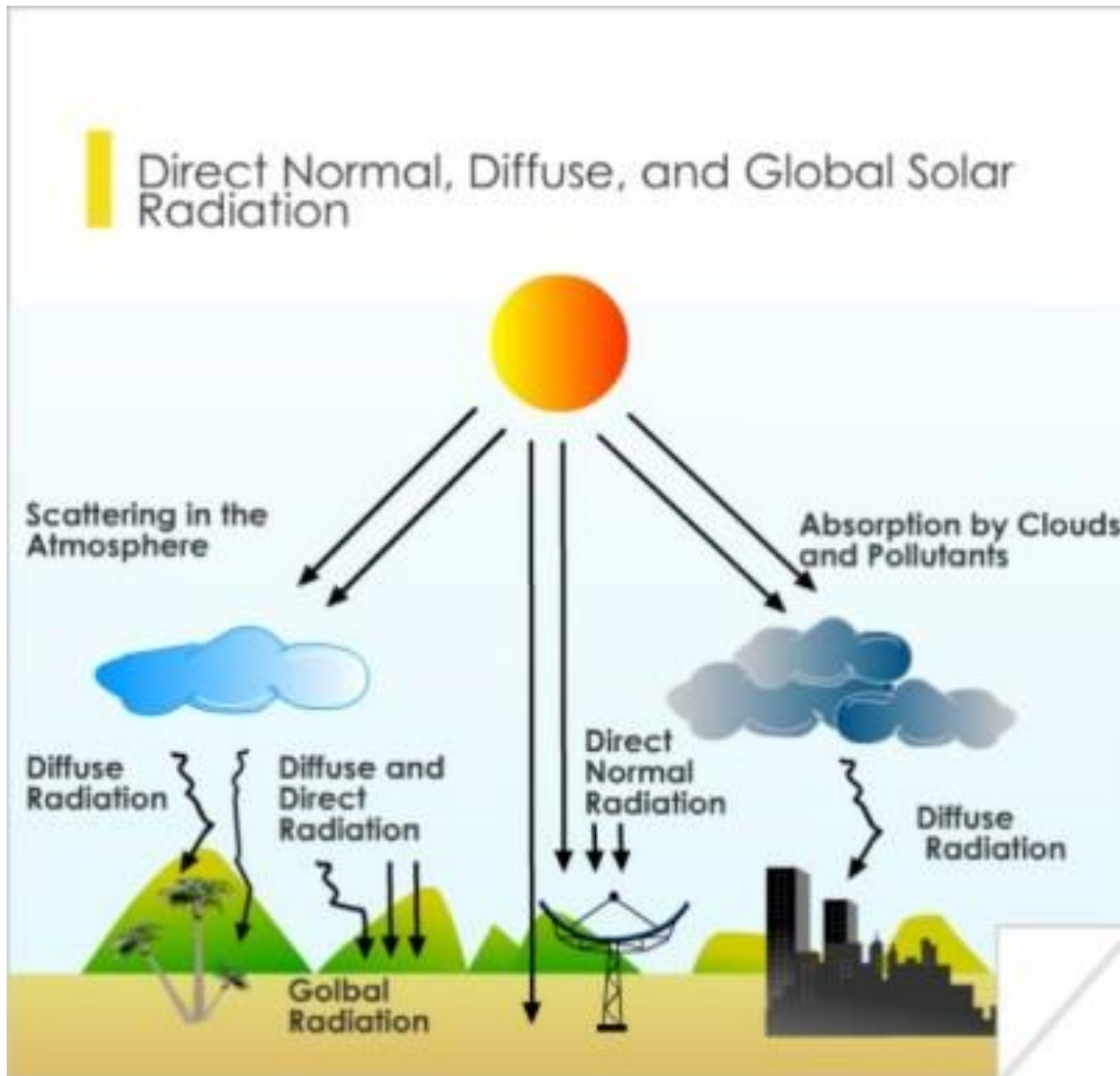
# A atmosfera como um filtro: efeitos quantitativos e qualitativos

## Radiação Solar

- Radiação ultravioleta (UV):  $10\text{nm} < \lambda < 400\text{nm}$
- Radiação visível (VIS):  $400\text{nm} < \lambda < 700\text{nm}$
- Radiação Infravermelho próximo (IVP) :  $700\text{nm} < \lambda < 3000\text{nm}$



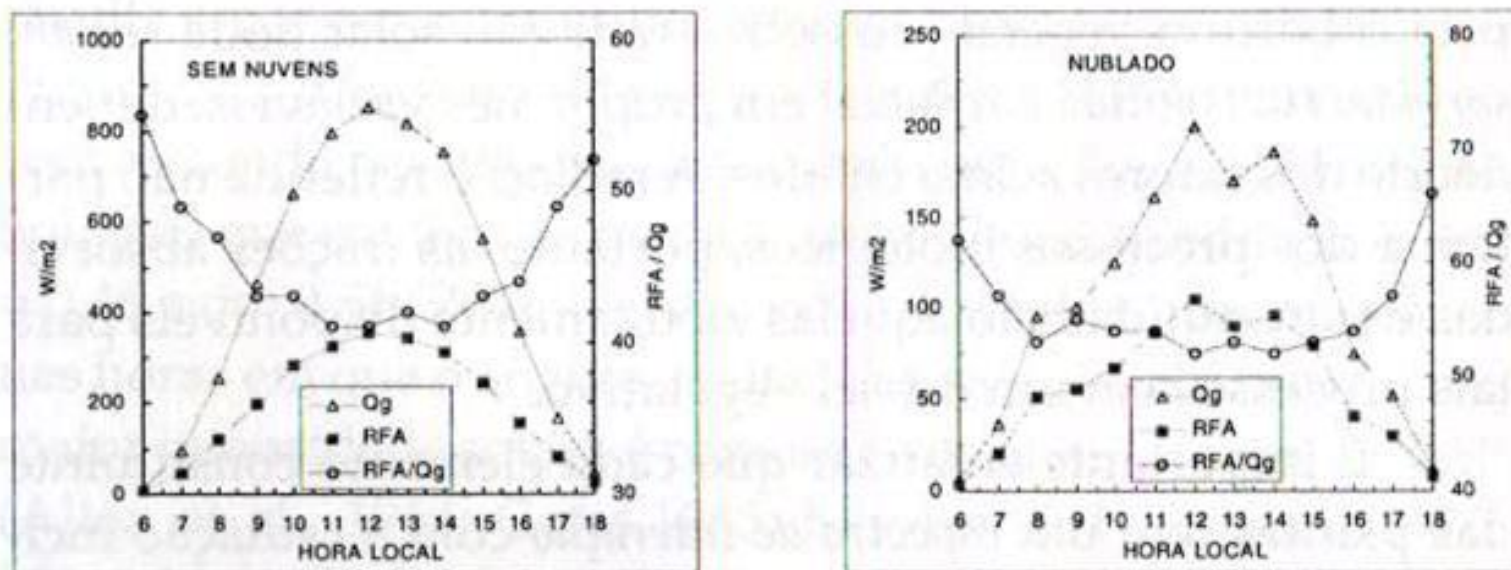
# Radiação solar: direta e difusa



Constituintes atmosféricos (aerossóis, partículas de poeira e gotículas de água, nuvens, nevoeiros, etc.) mudam a direção dos raios solares.

Tal processo gera a radiação multi-direcional, denominada de difusa. Parte dessa radiação retorna ao espaço sideral. Quanto maior a espessura da camada da atmosfera a ser atravessada pela radiação solar, maior a difusão.

b) *Nebulosidade → Quantidade x Qualidade (céu claro e nublado)*



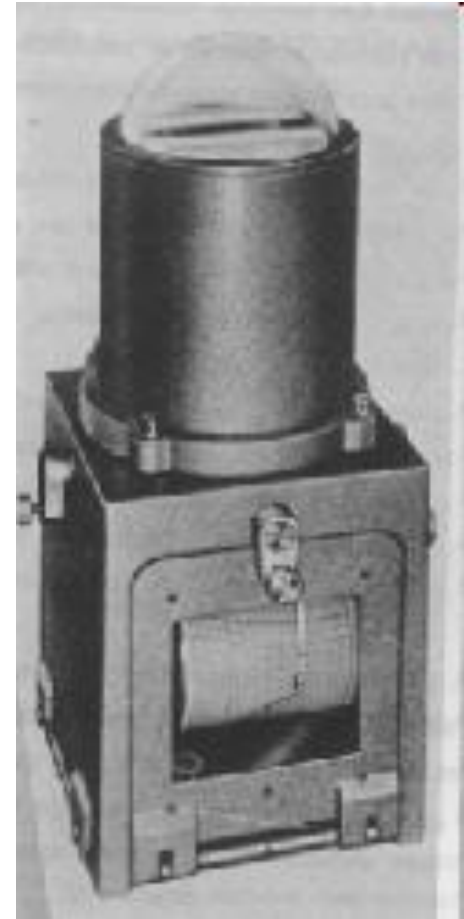
**FIGURA 11.1** Variação horária da radiação solar incidente ( $Q_g$ ), da RFA, e da fração  $RFA / Q_g$ , em Piracicaba, SP, para um dia sem nuvens e um nublado. Adaptado de Assunção (1994).

**Dia de céu claro: RFA = 45% de  $Q_g$  (41% a 55%)**  
**Dia de céu nublado: RFA = 56% de  $Q_g$  (52% a 66%).**

# Medida da Radiação Solar Global

- ✓ Actinógrafo de Robitzsch

Equipamento projetado em 1915 e constituído de duas placas metálicas pintadas de branco e preto. O aquecimento diferencial decorrente da absorção de radiação solar, que gera uma dilatação diferenciada, transferida por um sistema de alavancas para uma pena (registro).



# Medida da Radiação Solar Global

- ✓ Piranômetro de Termopar

O elemento sensor é uma placa com termopares, que geram uma corrente elétrica conforme a superfície se aquece, como consequência da incidência de radiação solar.



# Medida da Radiação Solar Global

- ✓ Piranômetro de Fotodiôdo de Silício

O sensor deste equipamento responde à absorção de radiação solar gerando uma corrente elétrica proporcional.



# Estimativa da Radiação Solar Global

Conhecendo-se a relação entre  $Q_g$  e  $Q_o$ , interação com a atmosfera (absorção e difusa) e insolação, podemos realizar como correção entre essas variáveis:

## Equação de Angstrom-Prescott

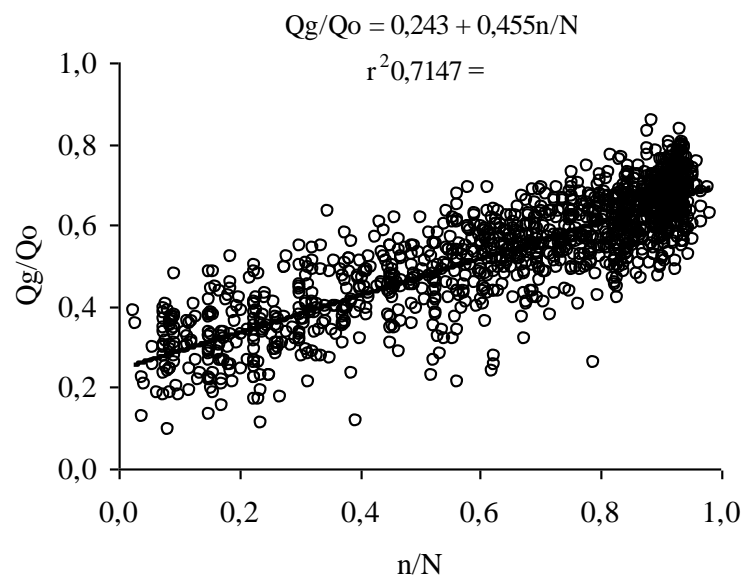
$$Q_g/Q_o = (a + b * n/N)$$

$$Q_g = Q_o * (a + b * n/N)$$

$n$  é a insolação (horas) - valores medidos;

$N$  é o fotoperíodo (horas) - valores estimados;

$a$  e  $b$  representam a transmitância global da atmosfera. Tais coeficientes são dependentes da latitude e das condições atmosféricas do local.



Determinação dos coeficientes  $a$  e  $b$ , da equação de Angstrom, para Araras/SP. Pilau et al., (2007)



# a e b

Nos locais onde não houver dados disponíveis, pode-se fazer a seguinte aproximação:

$$a = 0,29 * \cos \phi$$

$$b = 0,52$$

TABELA 5.4 Coeficientes a e b da Equação de Angström-Prescott, para algumas localidades brasileiras.

Localidade	Período	a	b
Botucatu - SP	Anual	0,24	0,45
Campinas - SP	Anual	0,23	0,56
Mococa - SP	Anual	0,40	0,41
Monte Alegre do Sul - SP	Anual	0,19	0,61
Piracicaba - SP	Outono-Inverno	0,28	0,51
Piracicaba - SP	Primavera-Verão	0,25	0,50
Pindamonhangaba - SP	Anual	0,28	0,51
Presidente Prudente - SP	Anual	0,19	0,39
Ribeirão Preto - SP	Anual	0,13	0,73
São Luiz - MA	Anual	0,26	0,33
Fortaleza - CE	Anual	0,27	0,36
Teresina - PI	Anual	0,31	0,37
João Pessoa - PB	Anual	0,28	0,36
Recife - PE	Anual	0,30	0,38
Petrolina - PE	Anual	0,32	0,37
Propriá - SE	Anual	0,33	0,41
Paulo Afonso - BA	Anual	0,31	0,33
Irecê - BA	Anual	0,33	0,33
Salvador - BA	Anual	0,29	0,39
Manaus - AM	Anual	0,26	0,49
Viçosa - MG	Anual	0,23	0,38
Alegrete - RS	Anual	0,19	0,49
Cachoeirinha - RS	Anual	0,20	0,56
Cruz Alta - RS	Anual	0,20	0,53
Encruzilhada do Sul - RS	Anual	0,15	0,47
Erechim - RS	Anual	0,19	0,47
Farroupilha - RS	Anual	0,17	0,60
Eldorado do Sul - RS	Anual	0,15	0,47
Ijuí - RS	Anual	0,25	0,46
Júlio de Castilhos - RS	Anual	0,17	0,62
Osório - RS	Anual	0,17	0,50
Pelotas - RS	Anual	0,35	0,46
Quaraí - RS	Anual	0,25	0,38
Rio Grande - RS	Anual	0,27	0,32
Santa Rosa - RS	Anual	0,15	0,55
Santo Augusto - RS	Anual	0,17	0,53
Soledade - RS	Anual	0,23	0,41
São Gabriel - RS	Anual	0,23	0,45
Taquari - RS	Anual	0,24	0,41
Uruguaiana - RS	Anual	0,24	0,41
Vacaria - RS	Anual	0,25	0,46
Veranópolis - RS	Anual	0,21	0,40

Fonte: Vianello & Alves (1991), Cervellini et al. (1966), Ometto (1981), Lunardi & Cataneo (1994) e Ribeiro et al. (1982), Fontana & Oliveira (1996).

### Exemplo:

Latitude = 27°21'25" Sul

$Q_0 = 35,54 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

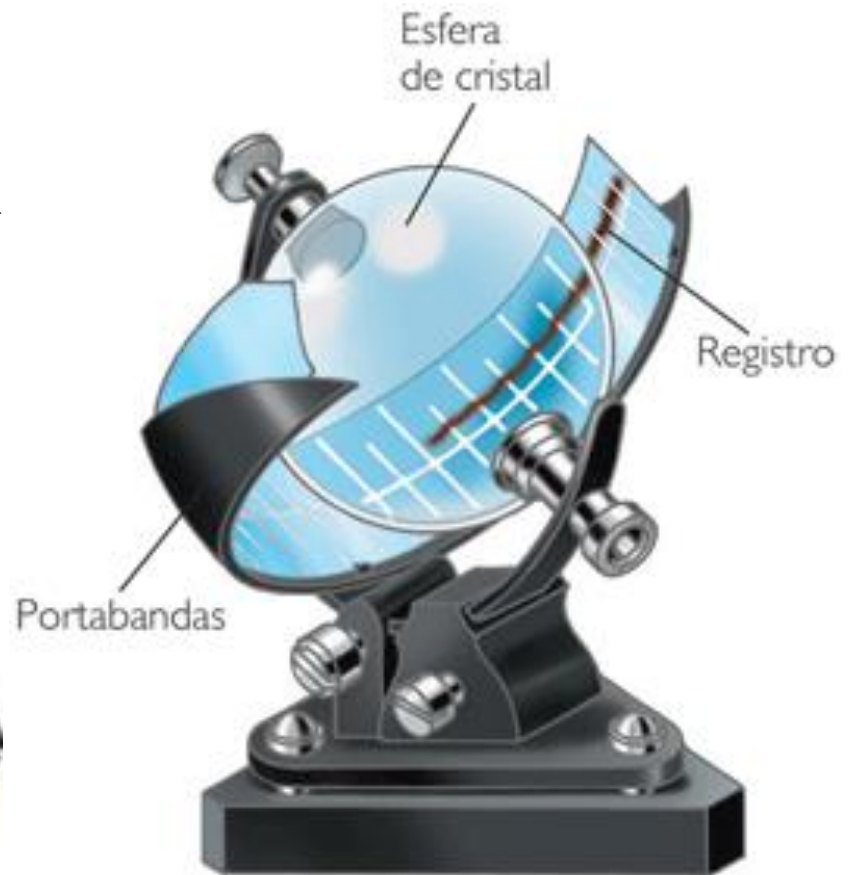
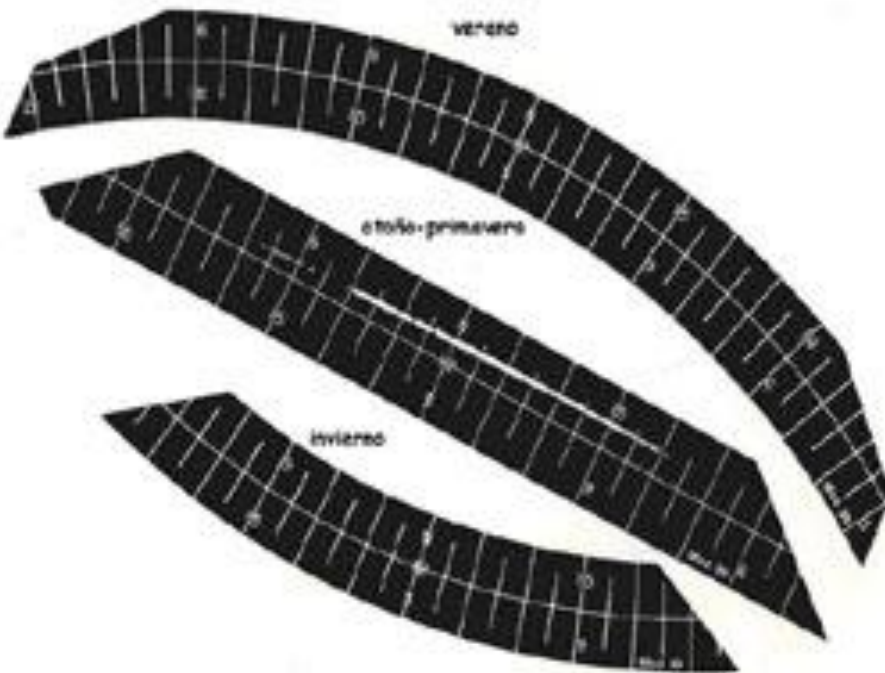
$N = 12\text{h}$

$n = 8,5\text{h}$

$Q_g = ?$

Medida do número de horas de brilho solar ( $n$ )

Heliógrafo - "Registro gráfico"



# Estimativa da Radiação Solar Global

✓ Método de Hargreaves e Samani (1982):

A amplitude térmica diária tem relação com a incidência de radiação solar, assim:

$$Q_g = k \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} Q_o$$

k é um coeficiente de ajuste variando entre  $0,16 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0,5}$ , para localidades situadas no interior, distantes do oceano; e  $0,19 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0,5}$  e para localidades litorâneas ou próximas a grandes corpos de água.

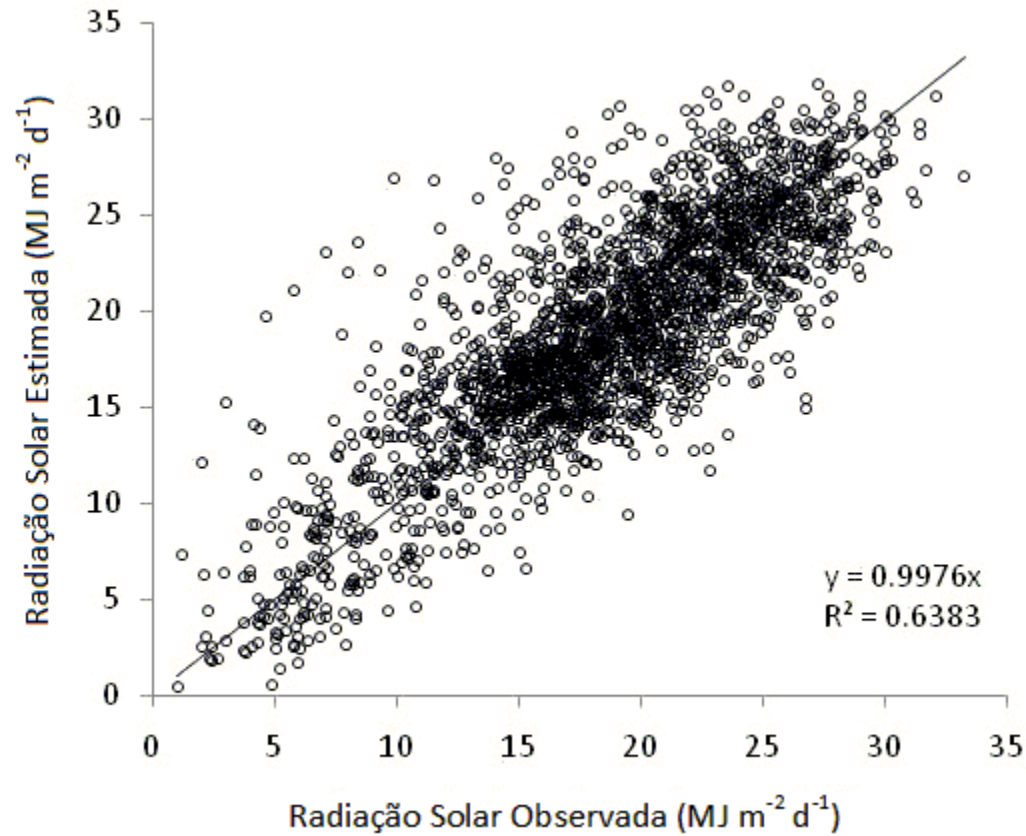
# Estimativa da Radiação Solar Global

✓ Método de Bristol & Campbell (1982):

$$Q_g = \{ A \cdot [1 - e^{(-B \cdot (T_{\max} - T_{\min})^C)}] \} \cdot Q_o$$

em que  $A$ ,  $B$  e  $C$  são coeficientes empíricos, sendo  $A=0,7812$ ,  
 $B=0,00515$ , e  $C=2,2$

# Método de Bristol & Campbel (1982)



# Exercício

✓ Determine a disponibilidade de energia radiante solar, extraterrestre ( $Q_0$ ) e global ( $Q_g$ ), para os 12 meses do ano, para as localidades:

1. São Luiz Gonzaga - RS (Lat. Long. Alt.)
2. São Carlos - SP (Lat. Long. Alt.)
3. Petrolina - PE (Lat. Long. Alt.)
4. Manaus - AM (Lat. Long. Alt.)

A partir dos dados de insolação e temperatura máxima e mínima do ar e  $Q_0$ , calcule a radiação solar global pelos métodos de Hargreaves e Samani (1982) e Bristol & Campbel (1982).

Apresente os resultados em forma gráfica. Faça uma comparação dos resultados entre as quatro localidades,

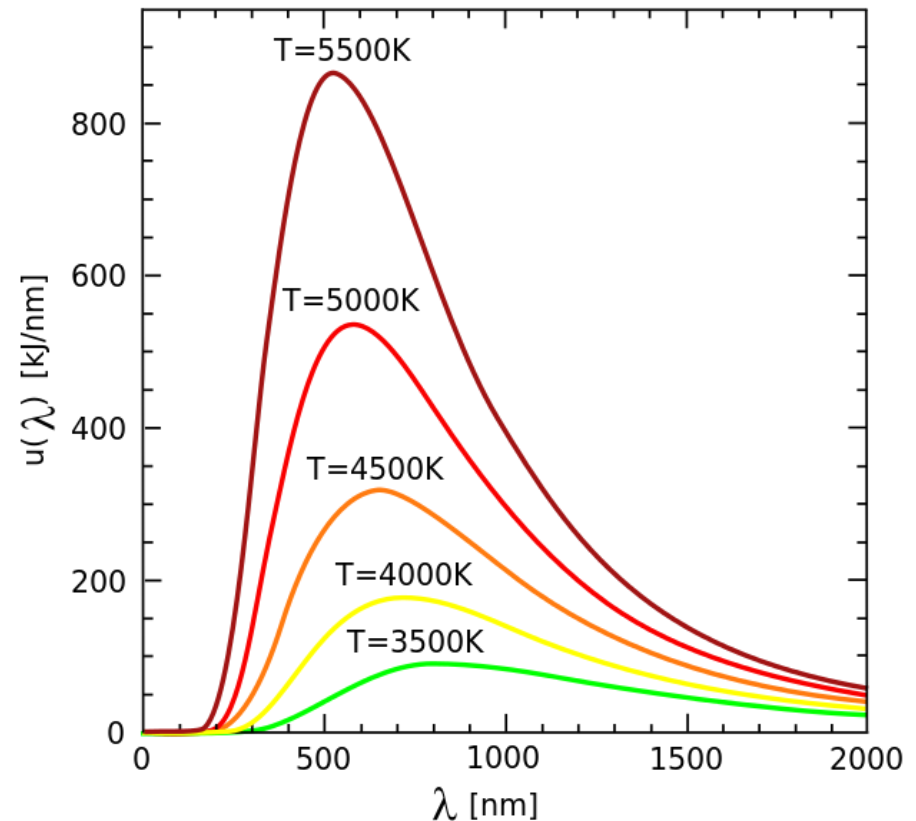
Para fins de cálculo, assumo o 15° dia de cada mês.

# Leis da Radiação

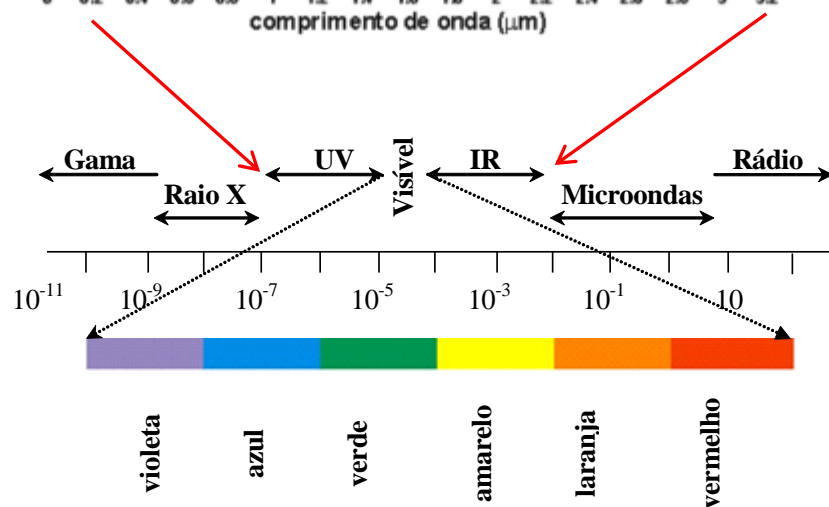
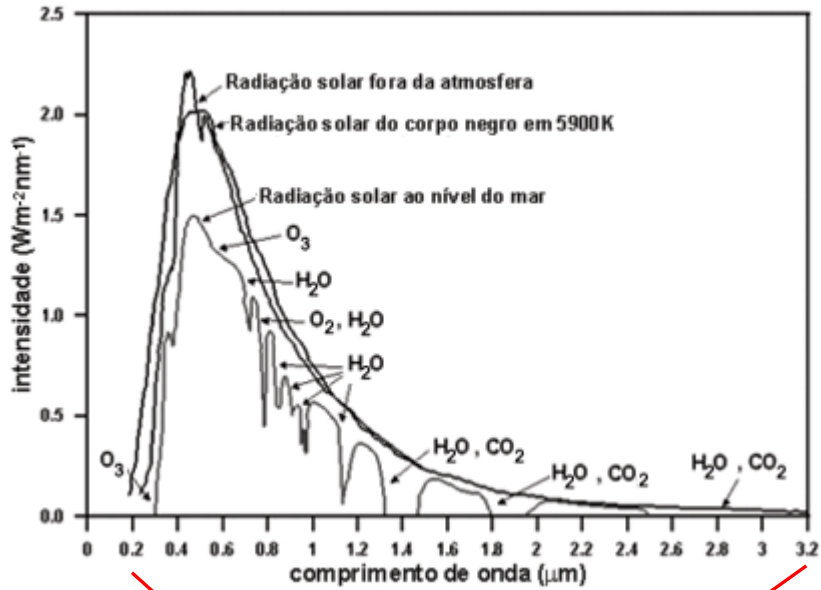
→ **Lei de Planck:** para radiação de corpo negro exprime a radiância espectral em função do comprimento de onda e da temperatura do corpo negro.

$$E_b = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[ e^{\left( \frac{hc}{k\lambda T} \right)} - 1 \right]}$$

em que  $E_b$  é a emitância espectral ( $\text{W m}^{-2}$ );  $T$  é a temperatura do corpo (K);  $h$  é a constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{J s}^{-1}$ ) e;  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J K}^{-1}$ ).



# Composição espectral da radiação solar



Cor	Comprimento de onda	Frequência (10 <sup>12</sup> Hz)
violeta	390 - 455	659 - 769
azul	455 - 492	610 - 659
verde	492 - 577	520 - 610
amarelo	577 - 597	503 - 520
laranja	597 - 622	482 - 503
vermelho	622 - 780	384 - 482



# Leis da Radiação

→ **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.

# Lei de Stefan-Boltzmann

Superfícies	e
Água	0,92 a 0,96
Areia molhada	0,95
Areia seca	0,89 a 0,90
Gelo	0,82 a 0,99
Solo molhado	0,95 a 0,98
Folhagem de algodoeiro	0,96
Folhagem de cana-de-açúcar	0,97
Folhagem de feijão	0,94
Folhagem de fumo	0,97
Folhagem de milho	0,94

# Leis da Radiação

→ **Lei de Lambert ou Lei do Cosseno:** 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 Kirchhoff:** a absorptividade ( $a$ ) e a emissividade ( $e$ ) de um corpo são iguais, para um dado comprimento de onda:

$$e_\lambda = a_\lambda$$

→ **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.

# Eficiência uso Radiação Solar

- ✓ Conversão em energia elétrica (painel solar): média de 15% a 24%, máxima de 39%. Qual seria a área necessária de painéis solares para atender toda a demanda nacional de energia elétrica?

CONSUMO (GWh)	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
<b>BRASIL</b>	<b>243.074</b>	<b>257.330</b>	<b>273.280</b>	<b>284.522</b>	<b>292.188</b>	<b>307.529</b>	<b>283.257</b>	<b>293.226</b>	<b>306.987</b>
RESIDENCIAL	63.576	68.581	74.089	79.340	81.291	83.613	73.622	72.718	76.162
INDUSTRIAL	111.626	117.128	121.717	121.979	123.893	131.278	122.539	130.927	136.221
COMERCIAL	32.276	34.388	38.198	41.544	43.588	47.626	44.434	45.222	47.531
OUTROS	35.596	37.234	39.276	41.659	43.416	45.011	42.663	44.359	47.073

## Atenuação da Radiação Solar Global em Comunidades Vegetais

*Lei de Absorção de Luz em Meios Homogêneos:* "é exponencial o decréscimo da luz, considerando-se o aumento da espessura do meio".

O modelo mais usado para estudo da atenuação da energia radiante em dosséis vegetados é o proposto por MONSI & SAEKI (1953): aplicação da Lei de Beer:

$$Q_{gi\downarrow} = Q_{g\downarrow} \cdot e^{-k \cdot IAF}$$

**k** é o coeficiente de extinção que para uma comunidade vegetal com folhas eretas o seu valor varia de 0,3 a 0,5 e para folhas horizontais varia entre 0,7 a 1,0.

**IAF** = distância na qual o feixe atravessa esse meio ou, no caso de comunidade de plantas, deve ser utilizado índice de área foliar.

Tabela 4. Radiação disponível, fotossíntese potencial e fotossíntese potencial por IAF da camada.

Altura da camada (cm)	Radiação disponível no topo da camada (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Fotossíntese potencial (FP) (g/cm <sup>2</sup> .dia)	FP/IAF
265-225	219	4,95	9,34
225-175	147	3,94	3,98
175-100	89	3,23	2,00
100- 20	42	1,60	1,37
20-solo	19	-	-

Fonte: ALLEN et alii (1964).



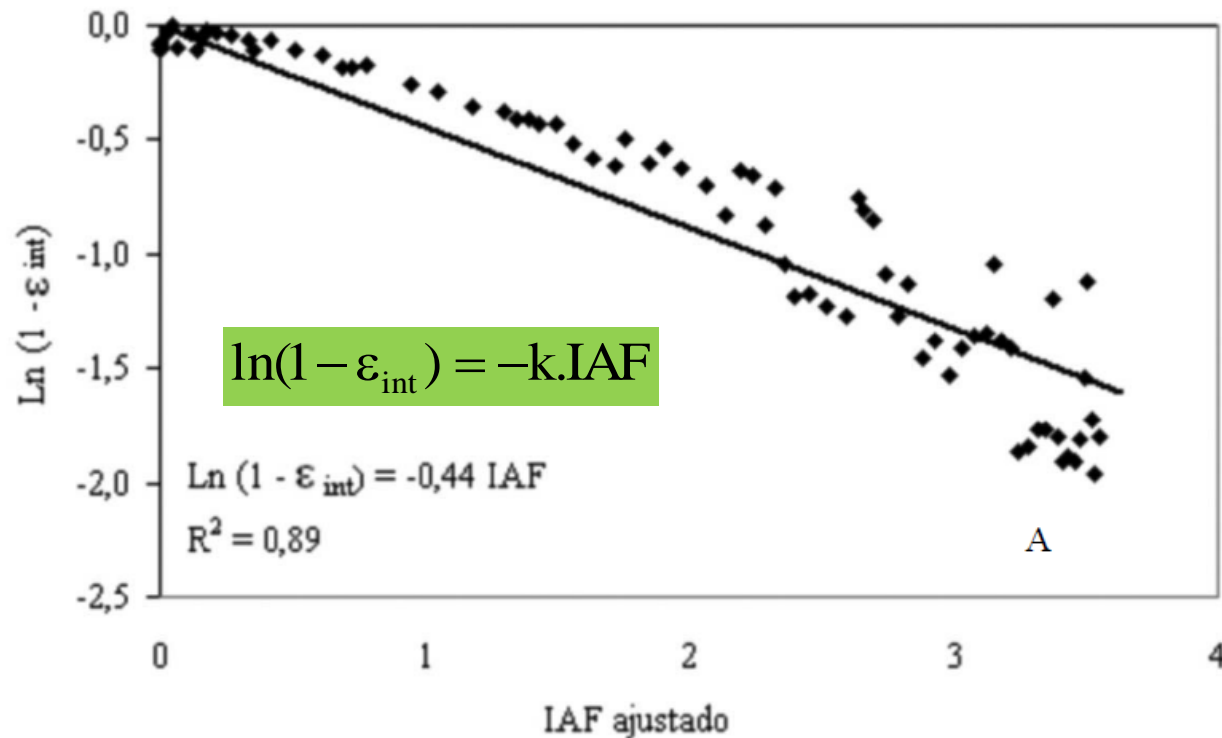
$$K^* = Q_g - \tau Q_g$$

A radiação solar interceptada ( $K^*$ ) é calculada a partir das medições da radiação solar incidente ( $Q_g$ ) e a fração transmitida ( $\tau.Q_g$ ) através da folhagem

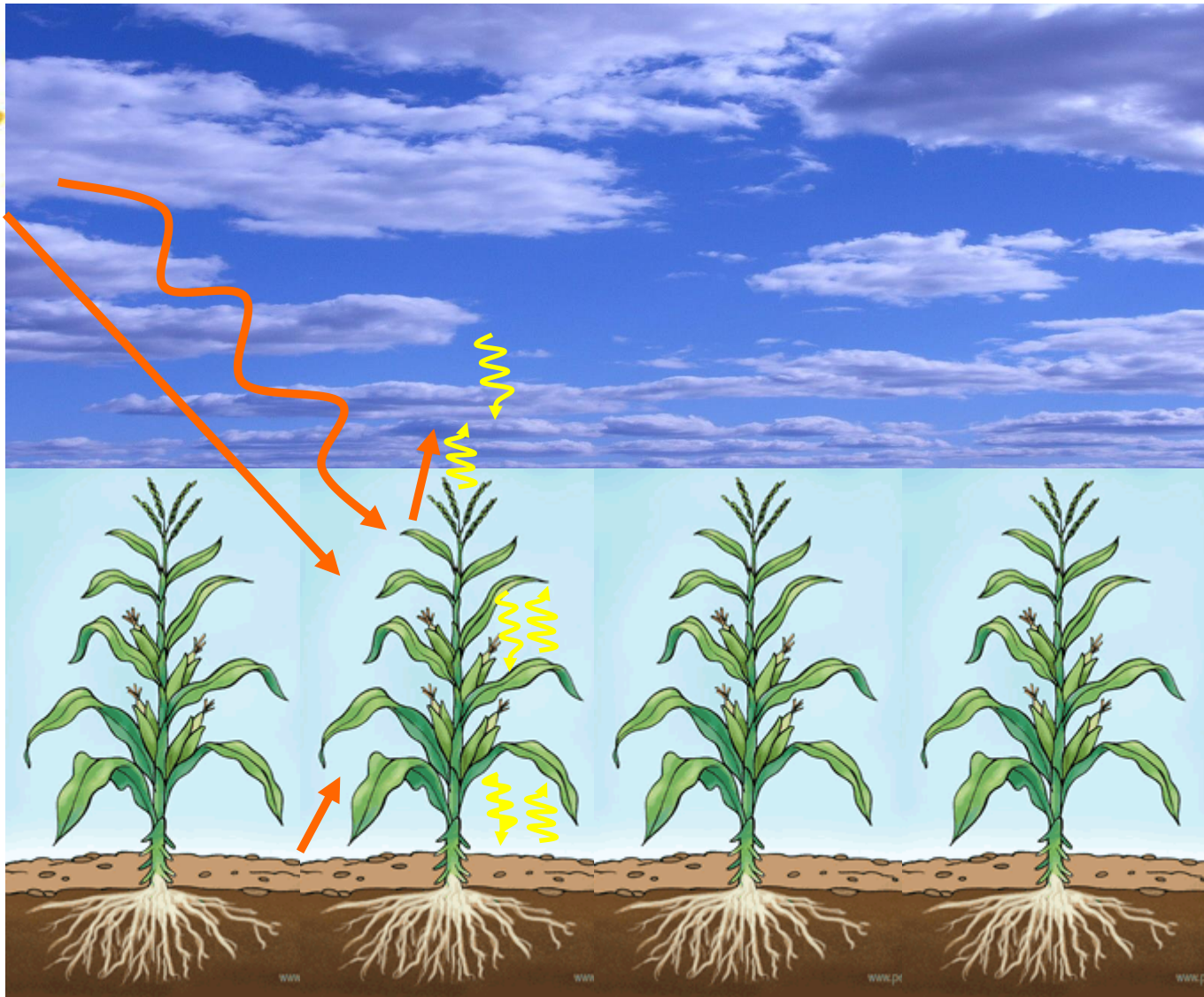
$$\varepsilon_{int} = \frac{K^*}{Q_g}$$

A eficiência de interceptação da radiação solar ( $\varepsilon_{int}$ ) é determinada a partir do quociente entre a radiação solar interceptada ( $K^*$ ) e total incidente ( $Q_g$ ) sobre a folhagem

**FIGURA 5-** Eficiência de interceptação ( $\varepsilon_{int}$ ) da radiação fotossinteticamente ativa em função do índice de área foliar, em vinhedos de 'Moscato Giallo' com (A) e sem cobertura plástica (B). Flores da Cunha-RS, 2005/2006.



# 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





# 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)*

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

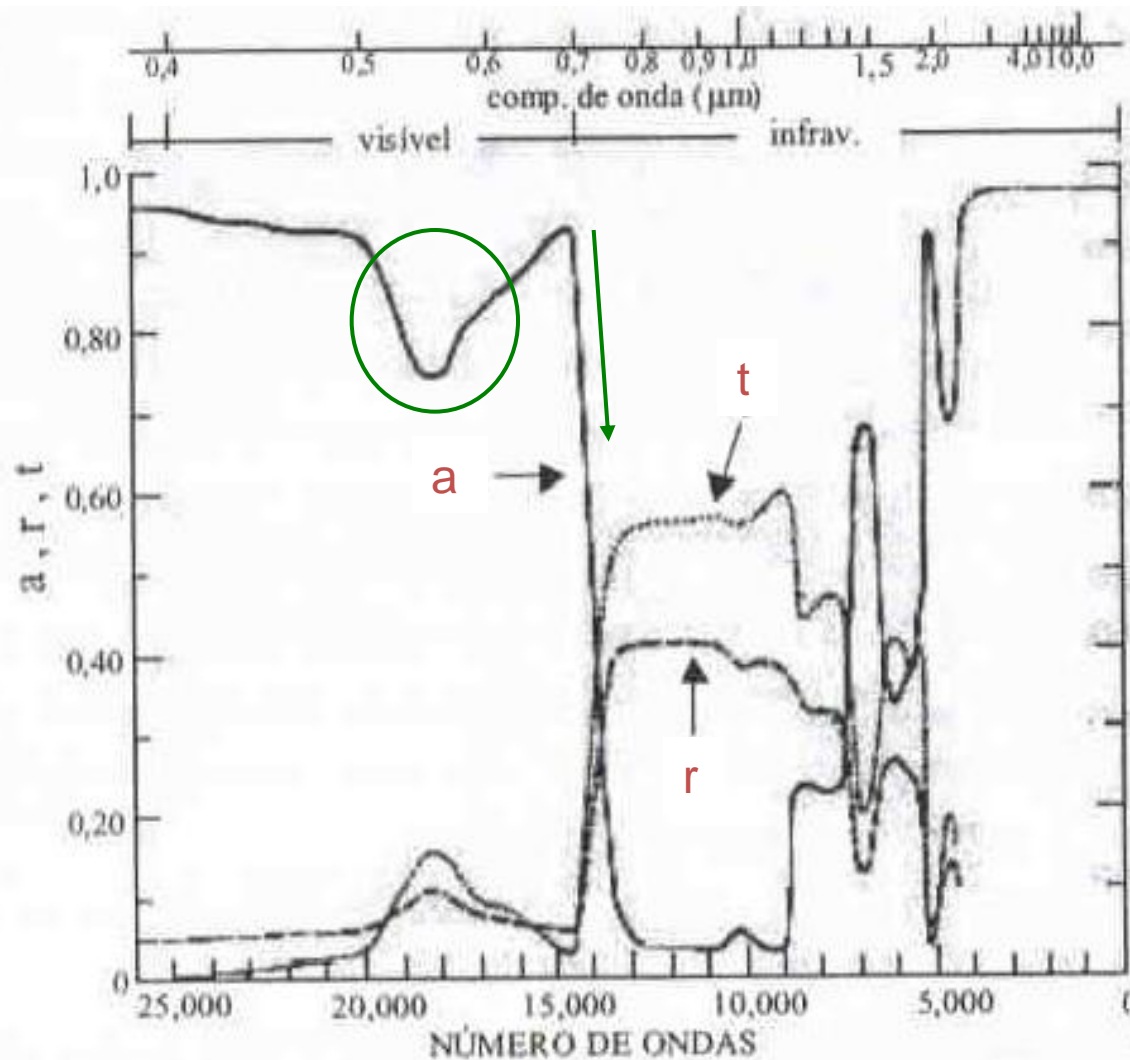
2. *Transmitância (t)*

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

3. *Absortância (a)*

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

Folhas largas e verdes: curvas espectrais de absorptância (a), reflectância (r) e transmitância (t)



Fonte: Angelocci, 2002 (Adaptado de Gates (1965))

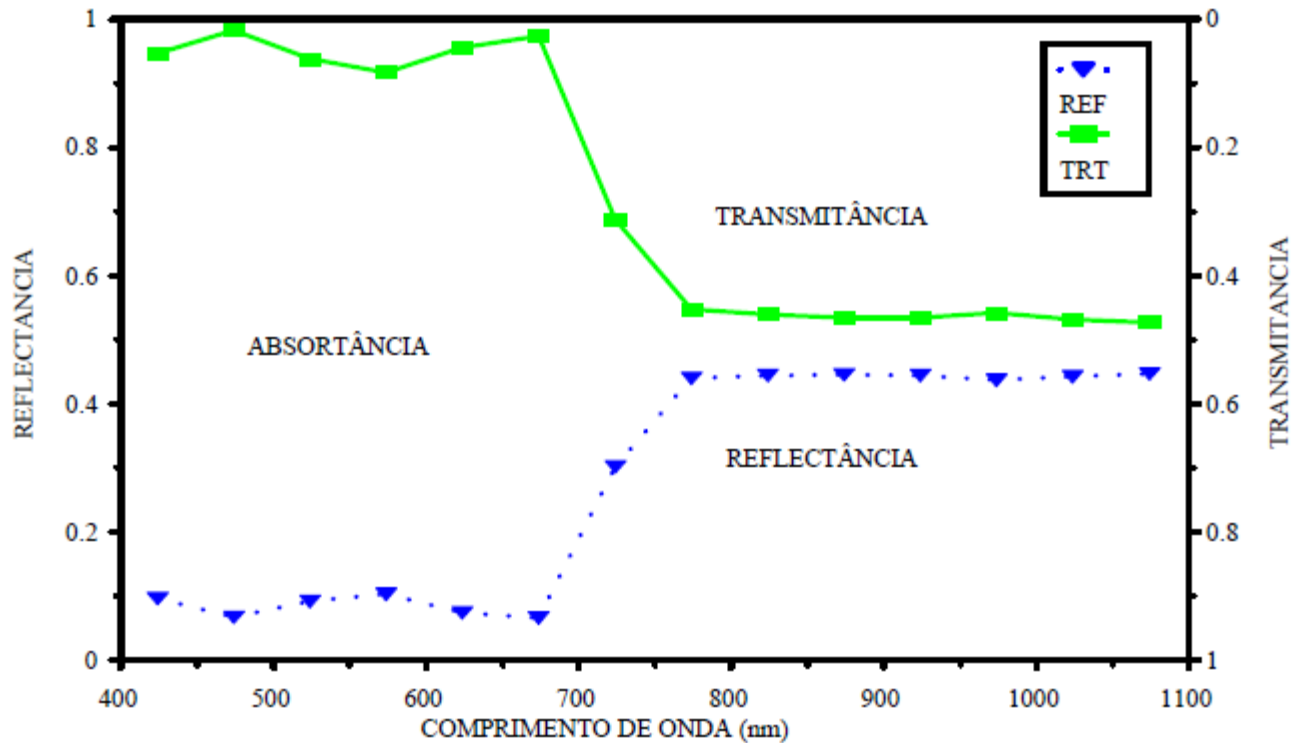


FIGURA 1. Reflectância e transmitância espectral da folha de amendoim irrigado em relação ao comprimento de onda. Rodelas, BA, 1995.

Em resumo para folhas largas verdes: pode-se adotar absorptância ( $a$ ) entre 0,75 a 0,90, com média de de 0,8 para  $\lambda$  de 400 a 700 nm. Para  $\lambda$  entre 700 e 1200 nm, absorptância média de 0,1, enquanto que para  $\lambda$  maior que 2000 nm, ' $a$ ' tende a 1.

## Valores médios de reflectância (r) para plantas de interesse agrícola

### Reflectância e absorptância em relação a elevação solar

Tabela 8.2. Refletância (r) e absorptância (a) de folhas de diferentes espécies, para baixas e altas elevações do sol, calculadas multiplicando-se a refletância e a absorptância espectral pela intensidade espectral da radiação solar, dividida pelo fluxo total de radiação solar. Dados obtidos no hemisfério norte, entre final de abril e meados de maio. (Fonte: Gates, 1980).

ESPÉCIE	CONDIÇÃO DA FOLHA	REFLETÂNCIA		ABSORPTÂNCIA	
		BAIXA (ELEVAÇÃO SOLAR)	ALTA	BAIXA (ELEVAÇÃO SOLAR)	ALTA
Algodoeiro		0,277	0,221	0,397	0,524
Bananeira		0,333	0,262	0,415	0,546
Bordo	Muito pequena	0,256	0,206	0,325	0,458
	Média	0,282	0,231	0,374	0,490
<i>Acer</i>	Pequena	0,232	0,187	0,396	0,511
<i>Saccharinum</i>	Média	0,284	0,225	0,347	0,487
	Média	0,286	0,220	0,431	0,558
	Grande	0,305	0,238	0,398	0,531
Carvalho		0,339	0,270	0,431	0,547
Choupo	Médias	0,237	0,198	0,324	0,448
Girassol	1ª folha	0,317	0,255	0,398	0,521
	3ª folha	0,269	0,213	0,407	0,565
	4ª folha	0,280	0,219	0,443	0,565
	5ª folha	0,282	0,220	0,400	0,532
Nogueira	Muito pequena	0,282	0,231	0,374	0,490
	Pequena	0,303	0,239	0,341	0,473
	Média	0,284	0,225	0,427	0,543
	Grande	0,312	0,244	0,414	0,541
	muito grande	0,311	0,245	0,444	0,565
Pessegueiro		0,306	0,246	0,480	0,586

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

# Fatores Físicos envolvidos na Interceptação, Absorção e Refletância da Luz Solar pelas Folhas

a) Ângulo solar  
"Lei do Cosseno de Lambert"

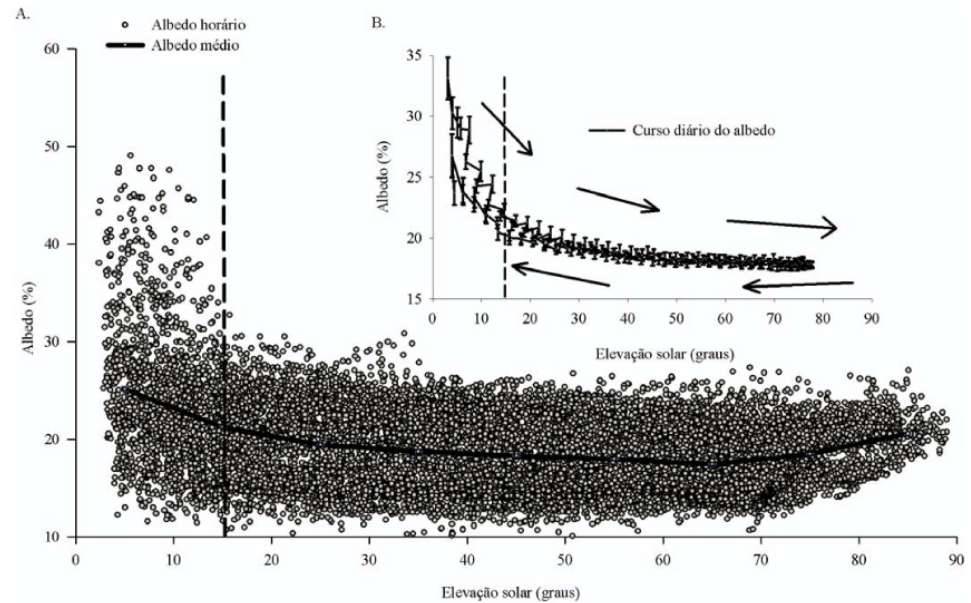
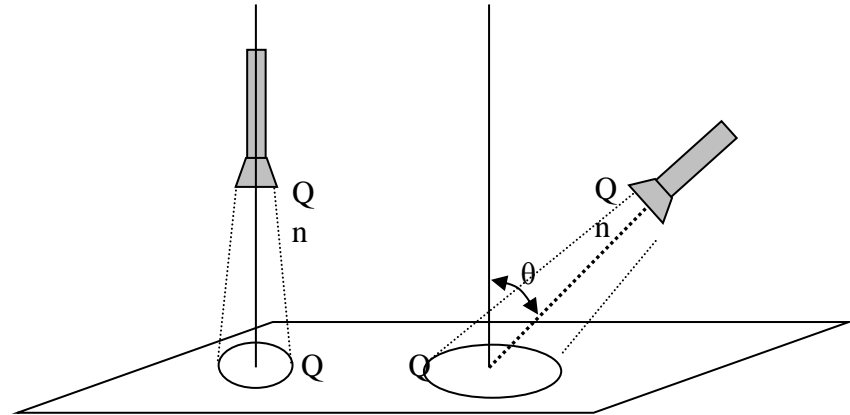
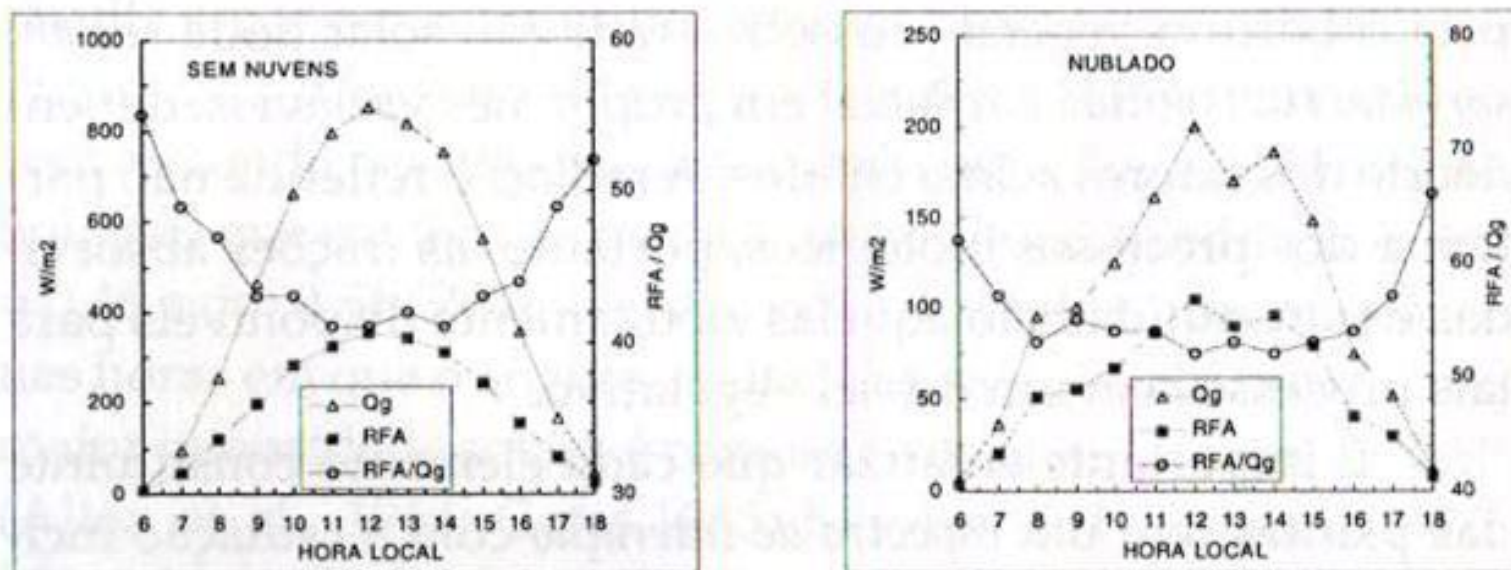


Figura 1. Variação do albedo (A) e curso diário do albedo (B) em função do ângulo de elevação solar. Barra vertical na Figura 1B corresponde ao erro padrão

Fonte: Paulo J. de O. P. de Souza et al., 2010



b) *Nebulosidade → Quantidade x Qualidade (céu claro e nublado)*



**FIGURA 11.1** Variação horária da radiação solar incidente ( $Q_g$ ), da RFA, e da fração RFA /  $Q_g$ , em Piracicaba, SP, para um dia sem nuvens e um nublado. Adaptado de Assunção (1994).

**Dia de céu claro: RFA = 45% de  $Q_g$  (41% a 55%)**  
**Dia de céu nublado: RFA = 56% de  $Q_g$  (52% a 66%).**

# Fatores Morfológicos e Fisiológicos envolvidos na Interceptação, Absorção e Refletância da Radiação Solar pelas Folhas

- a) *Idade da planta*
- b) *Mudanças sazonais*
- c) *Pubescência: pêlos, espinhos e outras formações nas folhas*
- d) *Arranjo espacial das folhas nas plantas (sol e sombra)*
- e) *Inclinação das folhas*

Erectófila

Planófila

Intermediária

- f) *Estatura de planta*

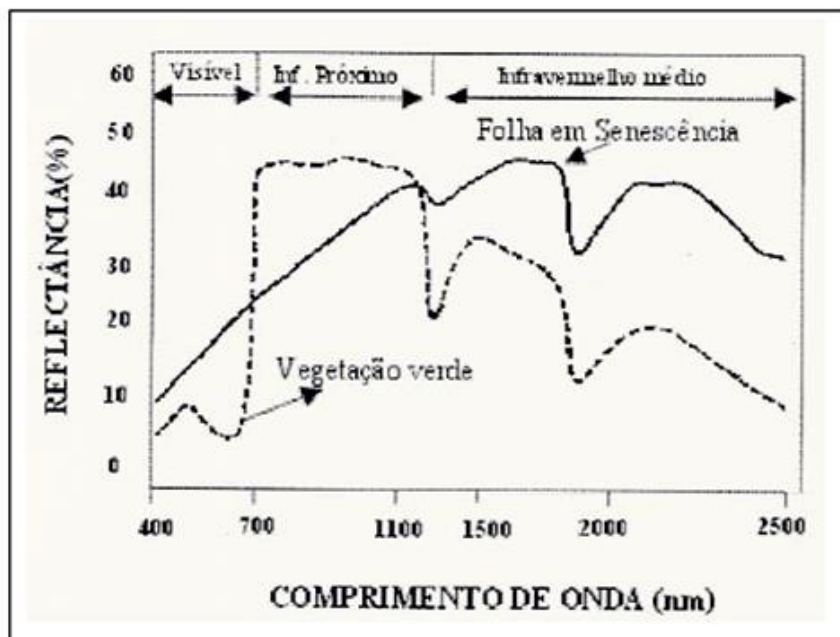
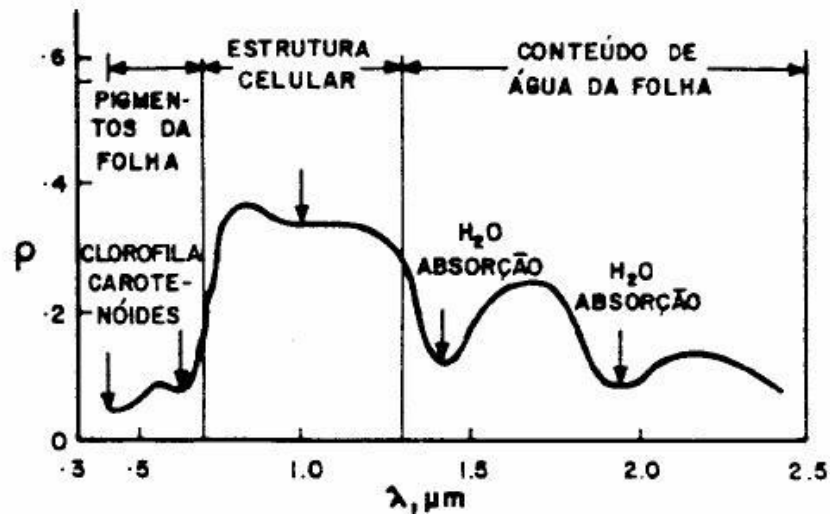


Figura 4.16 – Curvas da reflectância espectral de folhas verdes e senescentes. FONTE: Guyot (1990)



Curva de reflectância típica de uma folha verde. Fonte: Novo (1989)

Aspectos relacionados ao comportamento espectral da folha:

- **Região do visível** (400 nm a 700 nm): os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. Pigmentos são: clorofila (65%), carotenos (6%), e xantofilas (29%). Os valores percentuais destes pigmentos existentes podem variar grandemente de espécie para espécie. A energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e por espalhamento. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência, e também convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese;
- **Região do infravermelho próximo** (700 nm a 1300 nm): nesta região existe uma absorção pequena da radiação eletromagnética e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região. A reflectância espectral é quase constante nessa região. Gates et al. (1965) determinou que a reflectância espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos à folha, como disponibilidade de água, por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região. De maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e conseqüentemente, maior será também a reflectância;
- **Região do infravermelho médio** (1300 nm a 2600 nm): A água absorve consideravelmente a REM incidente na região espectral compreendida entre 1300 nm a 2000 nm. Em termos mais pontuais, a absorção da água se dá em 1100 nm; 1450 nm; 1950 nm; 2700 nm e 6300 nm.



## Efeito da Nutrição mineral

DATA: 11/08/97

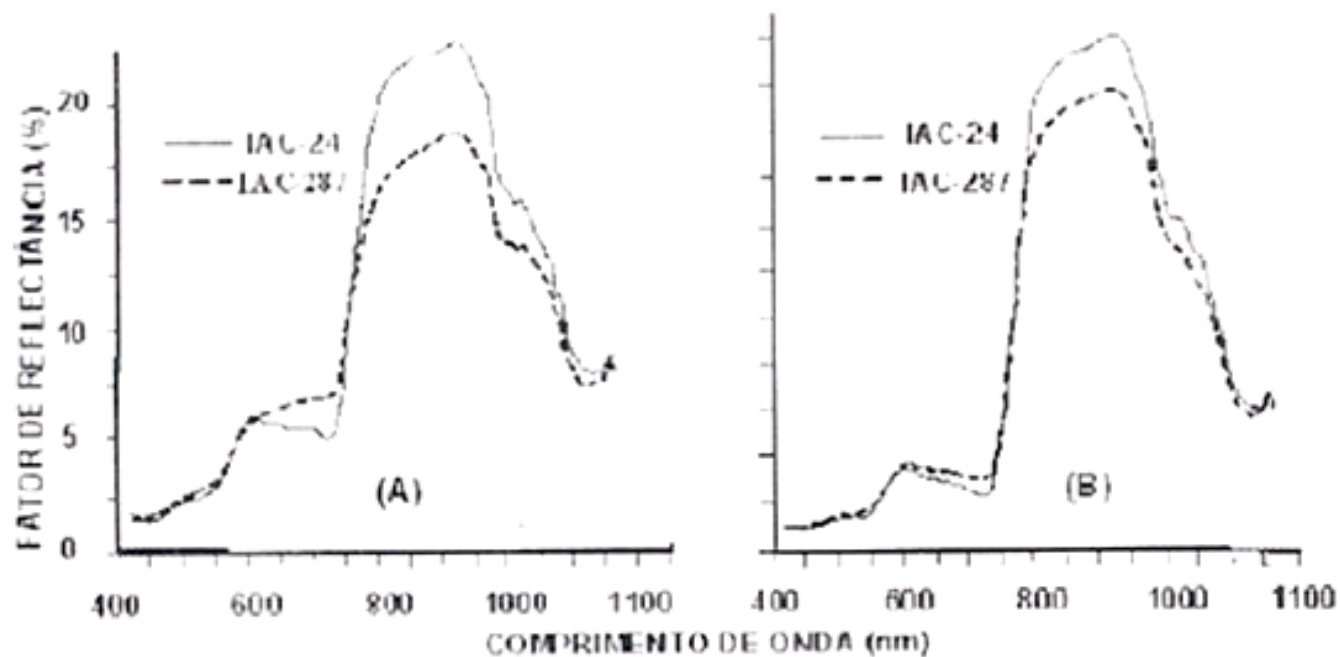


Figura 4.21- Curvas do fator de reflectância das cultivares de trigo IAC-24 e IAC-287 com 100% de reposição de água, sem adubação nitrogenada (A) e com 120 Kg de nitrogênio por hectare (B). Fonte: Dainese et al. (2000)

## Efeito do Conteúdo de água na folha

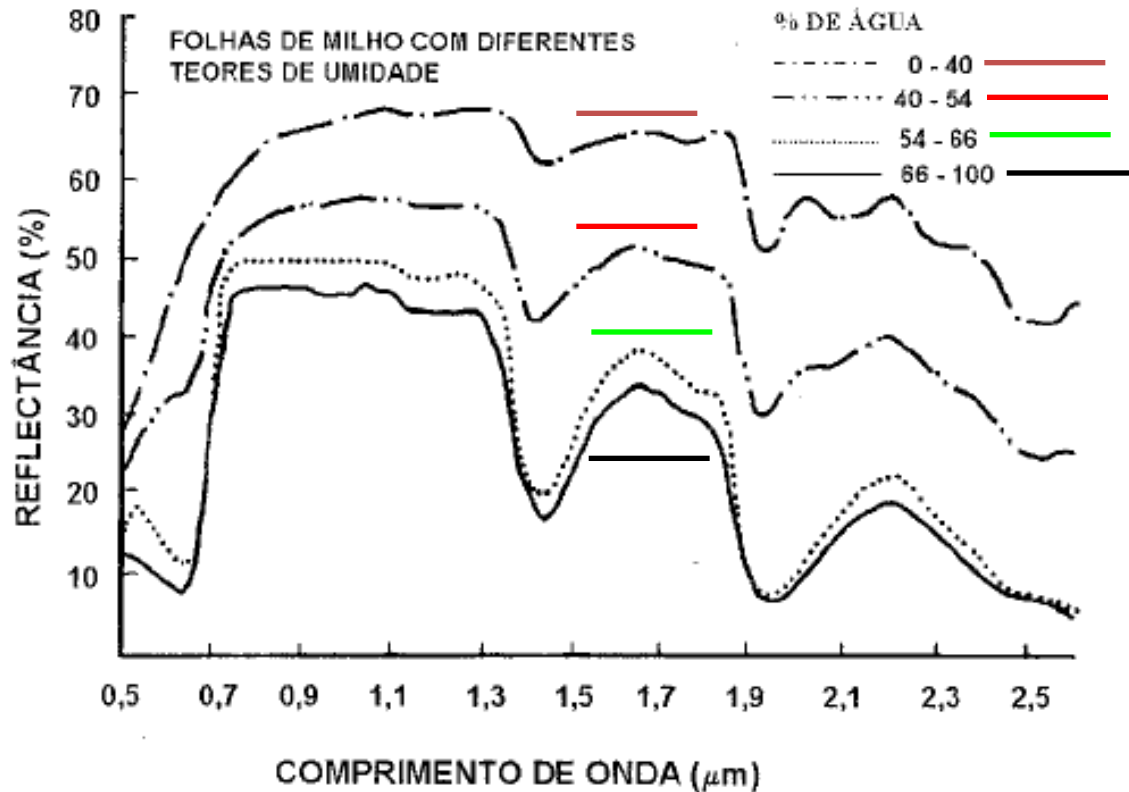
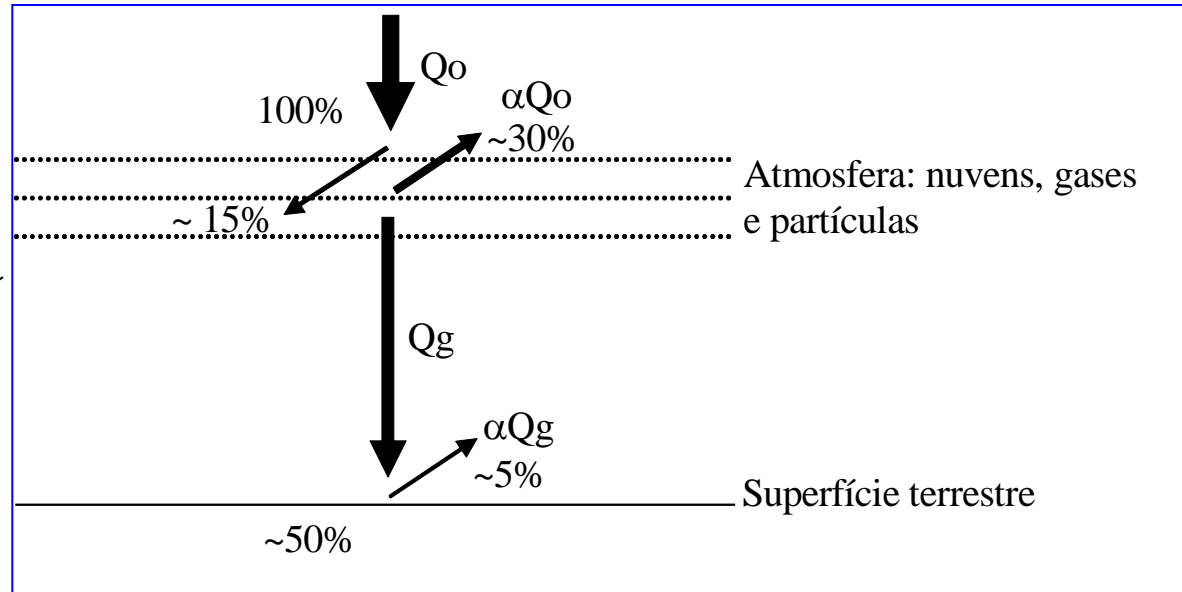


Figura 4.22 – Curvas da reflectância espectral, obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdos de água. FONTE: Hoffer (1978)

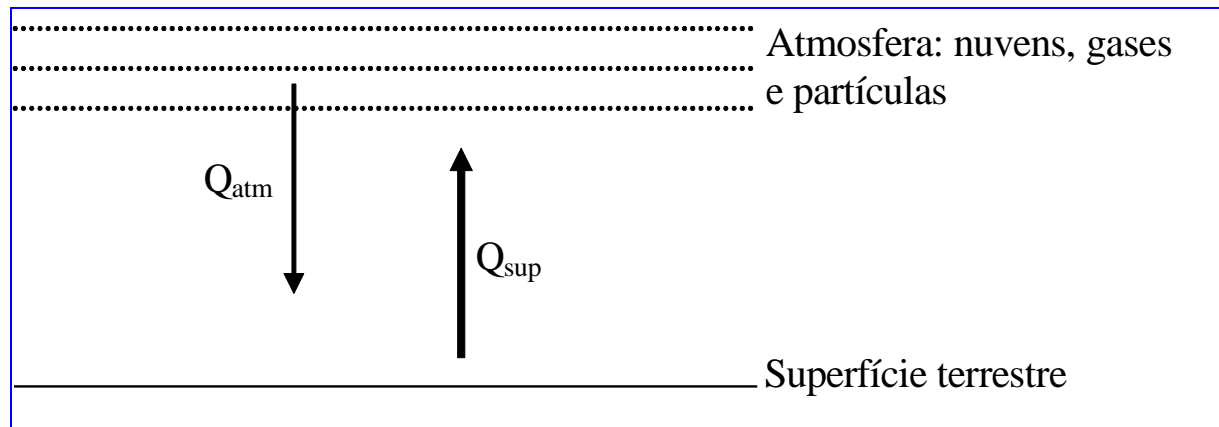
### Balanço médio de ondas curtas:



### Balanço de Radiação

$\lambda < 3000 \text{ nm}$

### Balanço médio de ondas longas:



$\lambda > 3000 \text{ nm}$

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**

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

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

# Balanço de Radiação

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

$$BOC = Q_g - rQ_g$$

$$BOL = Q_a - Q_s$$

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

Dia: Positivo  
Noite: negativo

Dia: negativo  
Noite: negativo

Dia: positivo  
Noite: negativo

# Medida do Saldo de Radiação

## Saldo radiômetros

Medida separada dos balanços de ondas curtas e longas

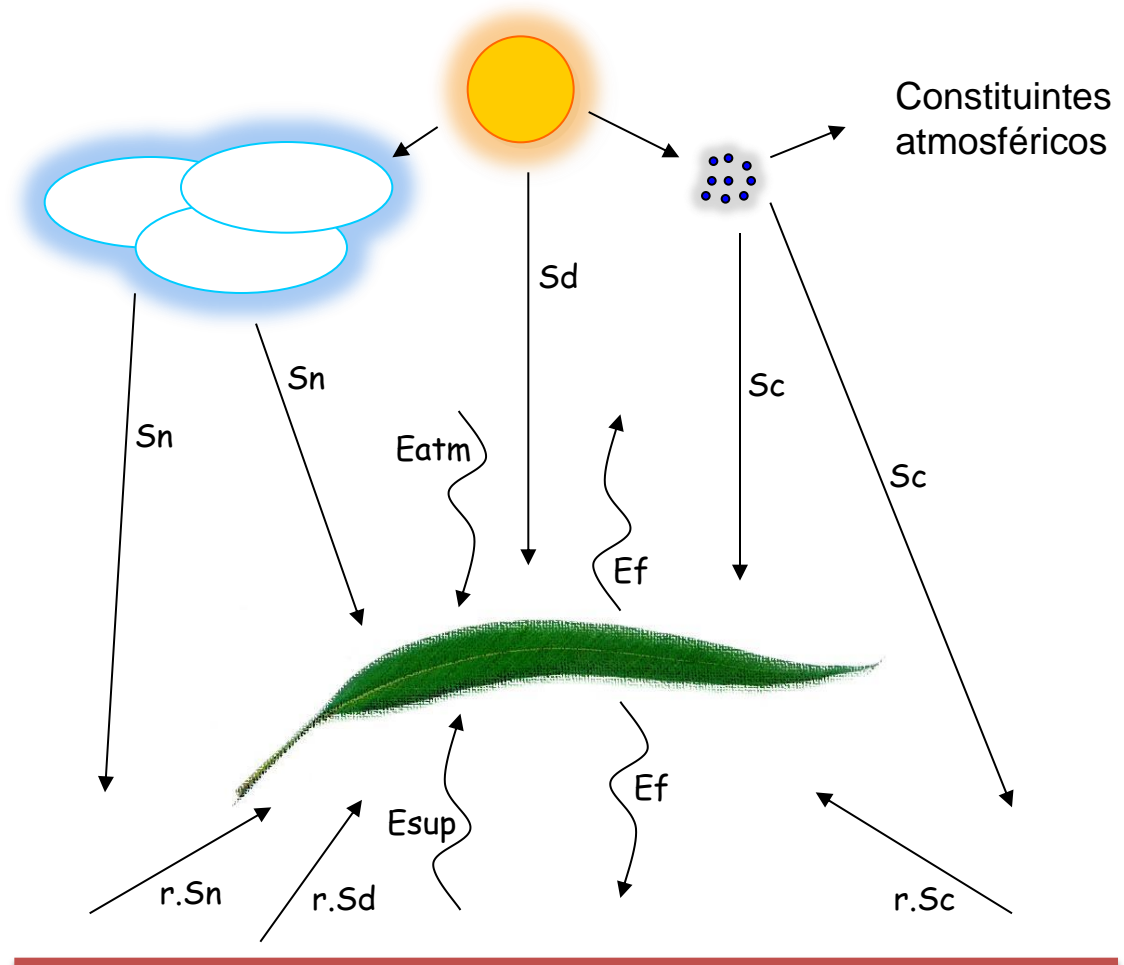


Kipp & Zonen Net Radiometer

Medida conjugada dos balanços de ondas curtas e longas



# "Dossel homogêneo ou Esparso"



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

$$BOL = 0,96 \sigma (Tsup^4 + Tatm^4) - 1,92 \sigma Tf^4$$

$$Rn = BOC + BOL$$