



Aula 2- RADIAÇÃO SOLAR

Calculando o valor de Q_o , Q_g e PAR
Conceituando a Produtividade Potencial

Prof. Fábio Marin

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"
Departamento de Engenharia de Biosistemas
LEB 306 – Meteorologia Agrícola



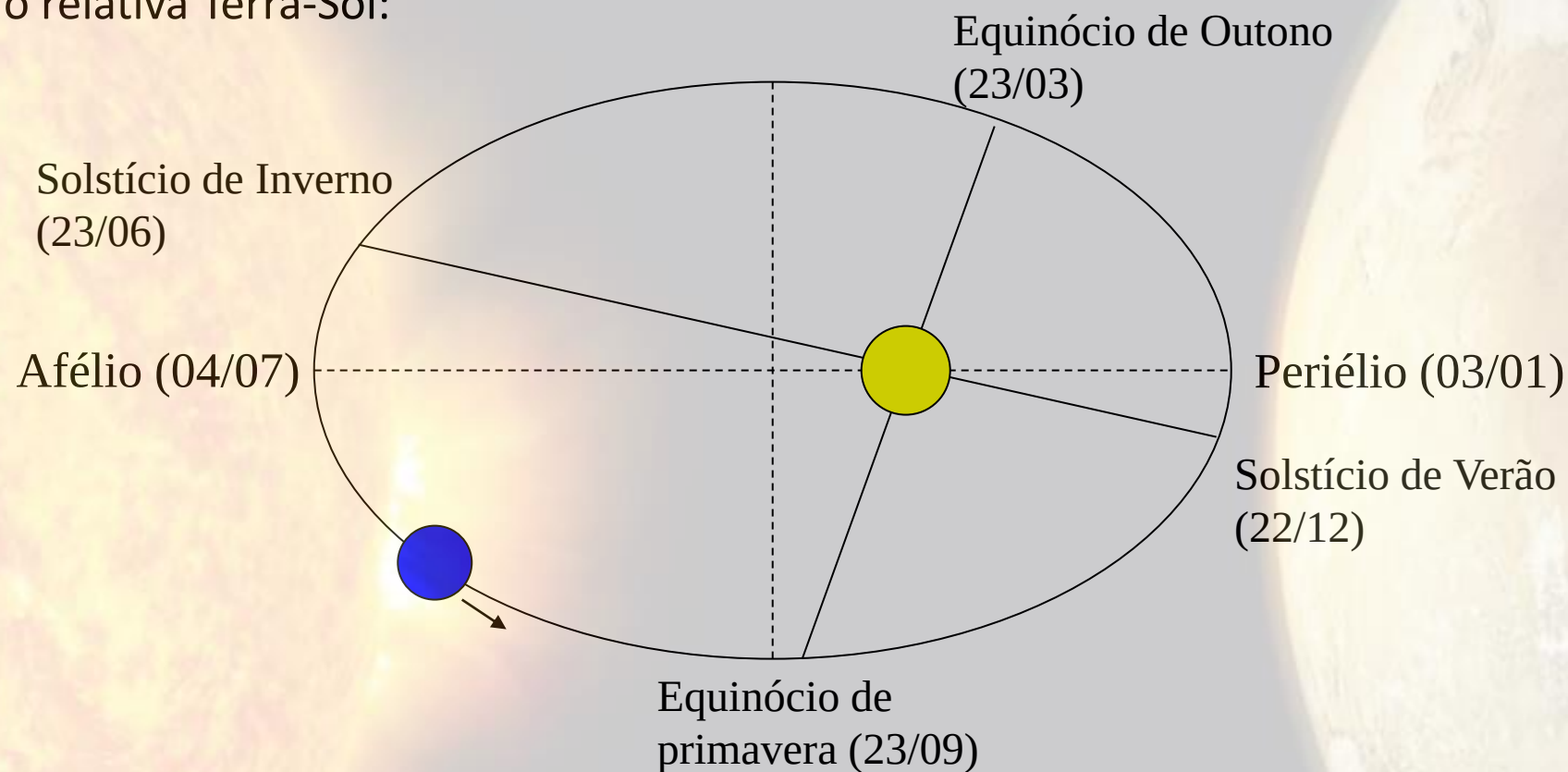
ESALQ

Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
Universidade de São Paulo

De onde vem a radiação solar?

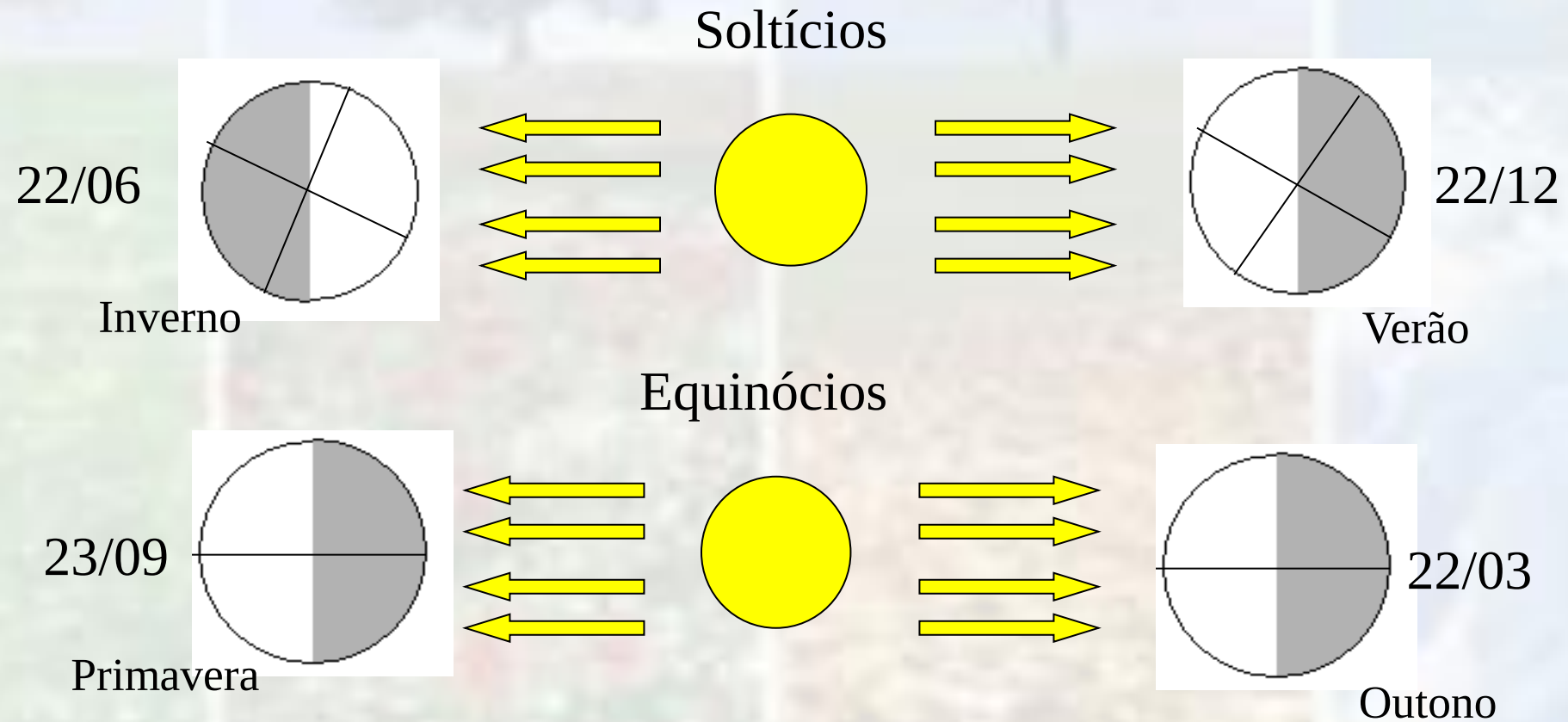
Movimentos de rotação e translação

- Posição relativa Terra-Sol:



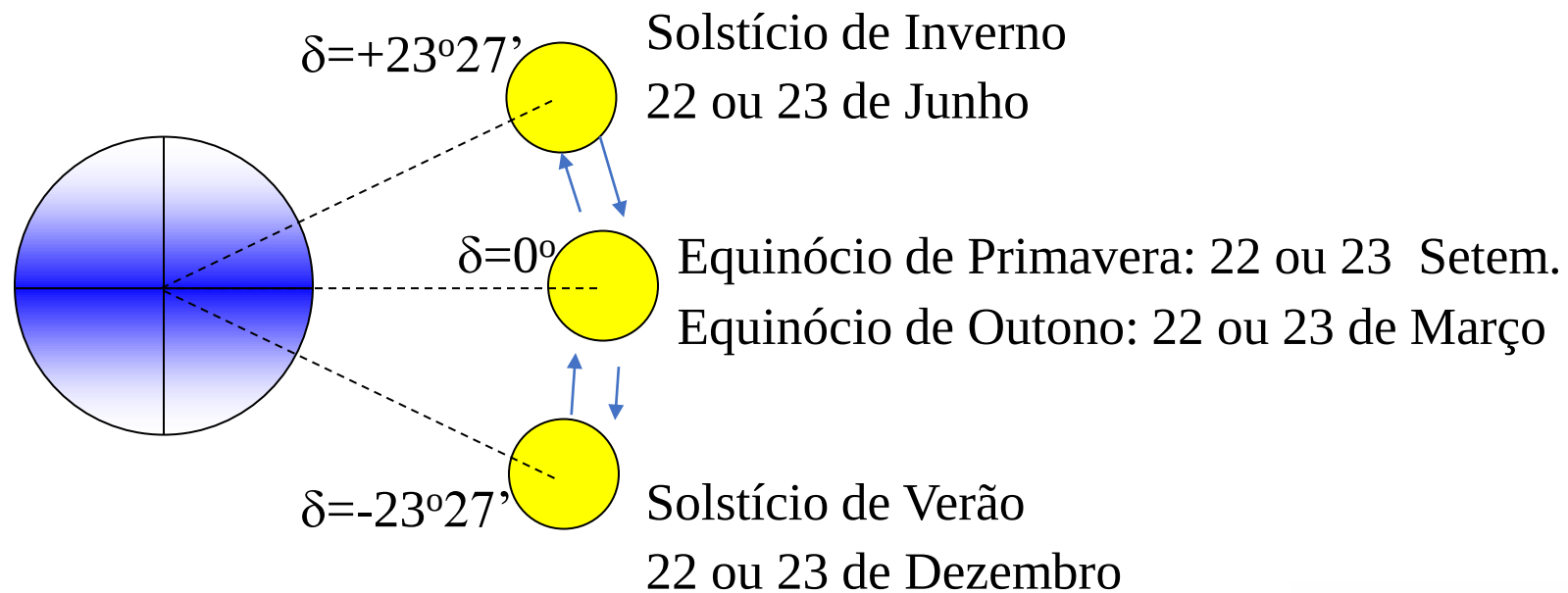
Estimando Qo - Estações do ano

- Posição relativa Terra-Sol:



Estimando Qo - 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*).



Como calcular a Declinação Solar

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

A única variável dessa equação é o número do dia do ano (NDA), também conhecido como dia Juliano, e representa a contagem sequencial dos dias do ano desde primeiro de janeiro até 31 de dezembro. Veja no Slide seguinte uma tabela para encontrarmos o valor do NDA a partir de um data (mês e ano).

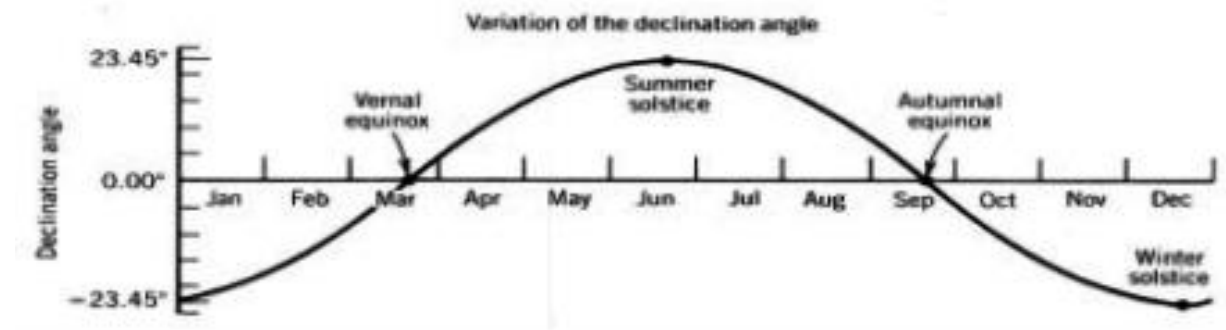
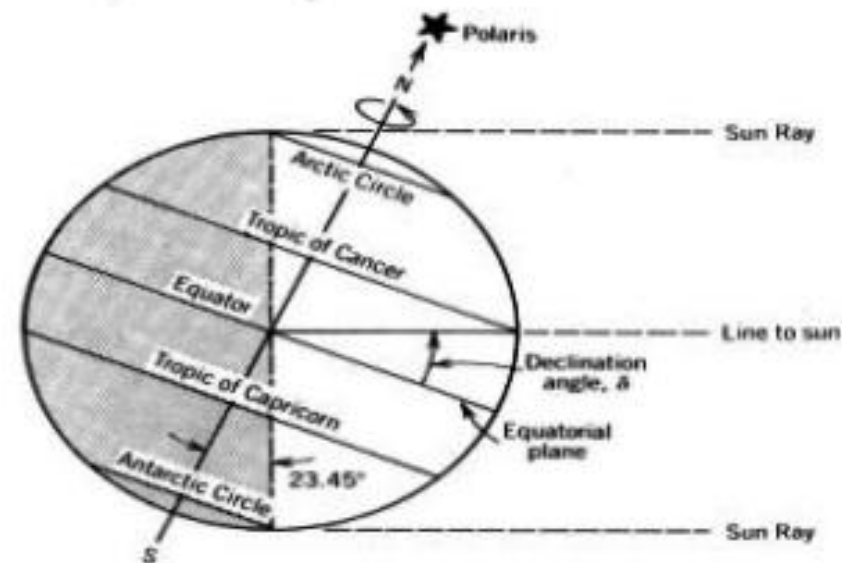
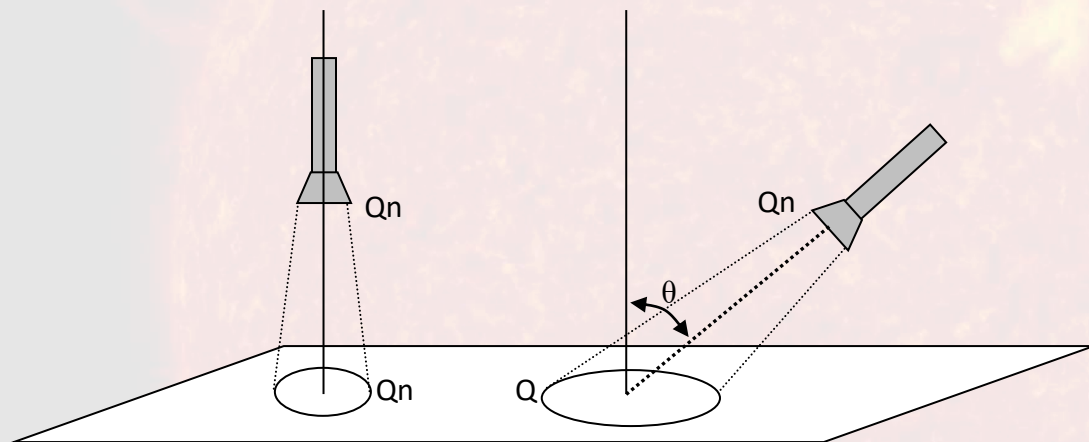


Tabela de NDA

Nas colunas temos os meses e nas linhas temos os dias. Combinando uma linha com uma coluna, encontramos o NDA.

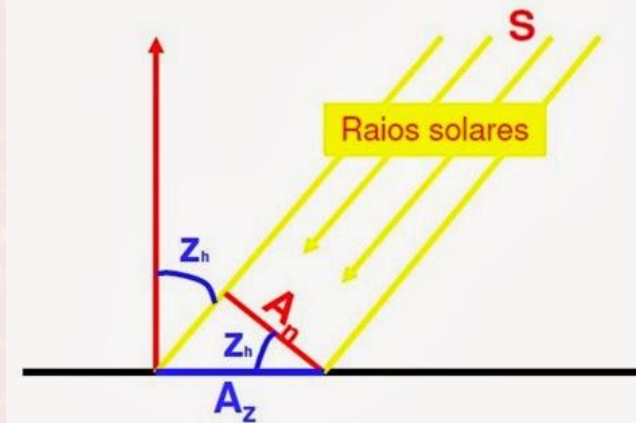
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	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

Lei do Cosseno de Lambert



$$Q < Q_n$$

Lei do Cosseno de Lambert



$$\text{Intensidade} = \text{Energia} / (\text{Area} \cdot \text{Tempo})$$

$$\text{Energia} = S$$

$$\text{Área real} = A_z$$

$$\text{Área normal} = A_n$$

$$\text{Tempo} = \text{unitário}$$

$$I_n = S / A_n$$

$$I_z = S / A_z$$

Igualando-se as as duas equações têm-se:

$$I_n A_n = I_z A_z \text{ ou } I_z / I_n = A_n / A_z$$

Do triângulo formado na Figura ao lado têm-se que:

$$\cos Z_h = A_n / A_z$$

Resultando em:

$$I_z = I_n \cos Z_h$$

Desse modo, se:

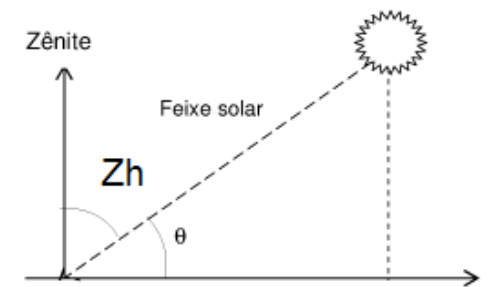
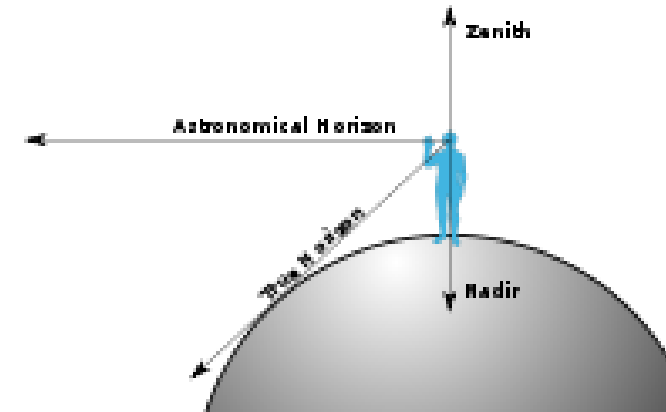
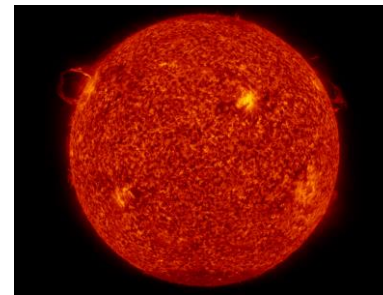
$$Z_h = 0^\circ \rightarrow I_z = I_n$$

$$Z_h = 90^\circ \rightarrow I_z = 0$$

Estimando Q_0 - Ângulo Zenital (Z_h)

- Definição: ângulo formado entre o zênite (linha imaginária que liga um observador localizado sobre a superfície terrestre e o centro da terra e prolonga-se até a esfera celeste) e a direção predominante do feixe (de raios) solar.

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



Ângulo Zenital ao Meio-Dia

Quando o sol passa pelo meridiano no local
(meio-dia): $h = 0$ e $\cos 0 = 1$

Assim,

$$\cos Z_{12} = \sin \phi . \sin \delta + \cos \phi . \cos \delta . 1$$

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

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

Exercício Rápido

a) Calcule a Declinação Solar para hoje em Piracicaba?

b) Calcule a Ângulo Zenital ao meio dia para Hoje em Piracicaba?

Estimando Q_0 - Calculando o Ângulo Horário ao nascer do Sol (hn)

$$0 = \text{sen } \phi . \text{sen } \delta + \cos \phi . \cos \delta . \cos hn$$
$$\cos hn = \frac{(-\text{sen } \phi . \text{sen } \delta)}{(\cos \phi . \cos \delta)} = -\text{tg } \phi . \text{tg } \delta$$
$$hn = \arccos(-\text{tg } \phi . \text{tg } \delta)$$

ϕ é a latitude do local (graus e décimos)

δ é a declinação do sol (graus e décimos)

Zh é o ângulo zenital a cada hora do dia. No nosso caso, vamos calcular Z para o meio dia e extrapolar para o restante do dia.

Cálculo do Fotoperíodo (N)

$N = \text{hora do pôr-do-sol} - \text{hora do nascer-do-sol}$

Considerando a trajetória simétrica do sol em relação ao meio-dia, podemos admitir que:

$$N = 2 * h_n / 15$$

sendo h_n o ângulo horário no nascer do Sol)

Ao nascer, o ângulo zenital é 90 e $\cos 90 = 0$. Assim, isolando-se h_n da eq. do ângulo zenital (slide 10), tem-se:

Lembrando o que já vimos nos slides anteriores, ao nascer do Sol, o ângulo zenital pode ser dado por:

$$0 = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos h_n$$

$$\cos h_n = \frac{(-\sin \phi \cdot \sin \delta)}{(\cos \phi \cdot \cos \delta)} = -\tan \phi \cdot \tan \delta$$

$$h_n = \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta)$$

Assim, o fotoperíodo (N) é dado por:

$$N = 2 * h_n / 15$$

Horário do nascer e pôr-do-Sol

- Horário do Nascer do Sol (HNS)
- $HNS = 12 - N/2$
- Horário do Pôr do Sol (PS)
- $HPS = 12 + N/2$

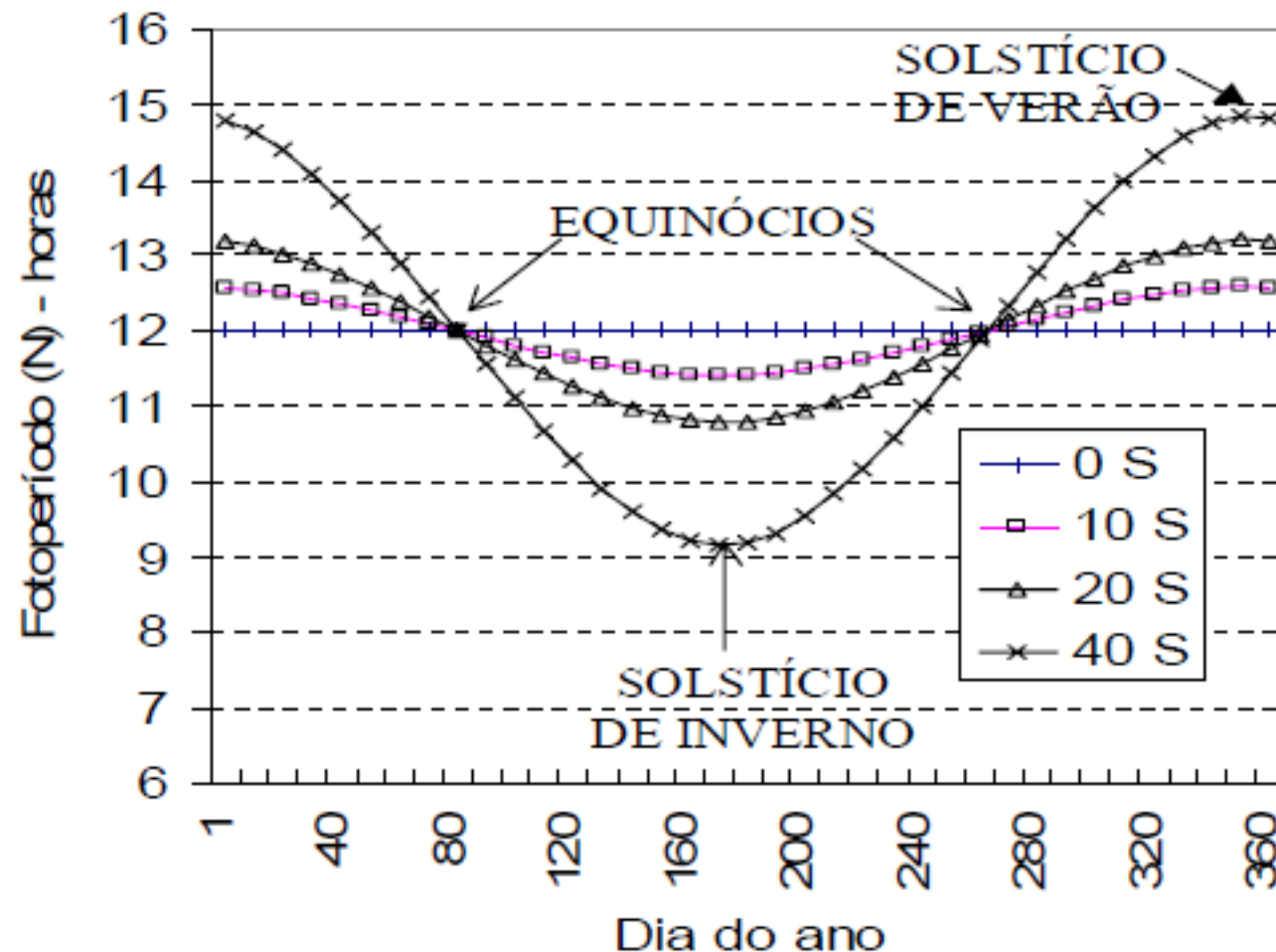
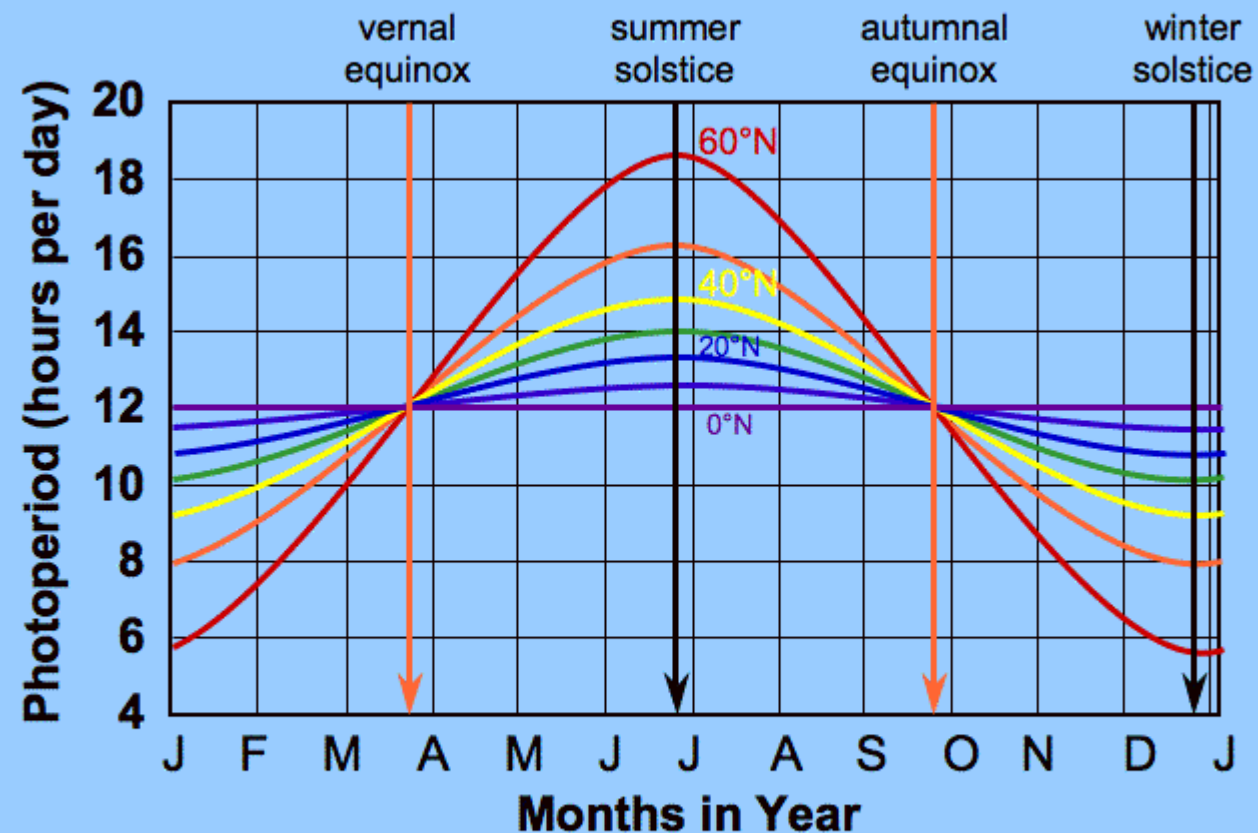


Figura 5.2. Variação anual do fotoperíodo em algumas latitudes do hemisfério sul.

Exemplo de variação do fotoperíodo de locais no hemisfério Sul

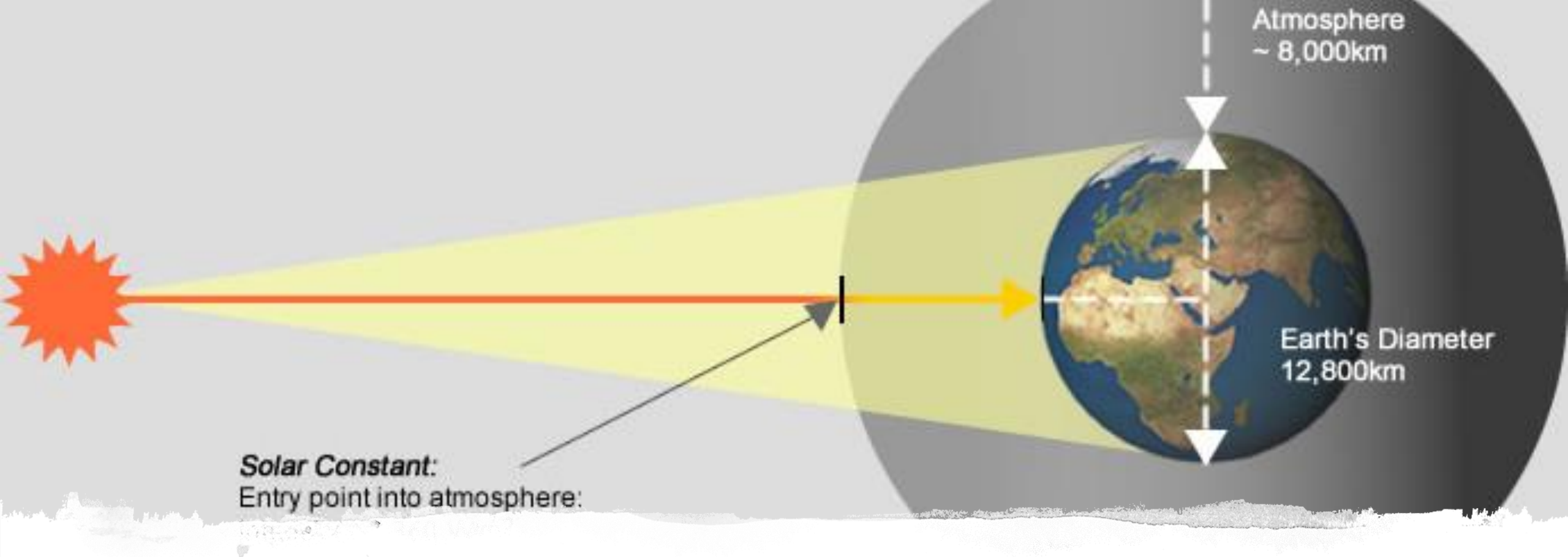
Horário do nascer e pôr-do-Sol

- Horário do Nascer do Sol (HNS)
- $HNS = 12 - N/2$
- Horário do Pôr do Sol (HPS)
- $HPS = 12 + N/2$



Willimantic, CT: 41.7° N 72.2° W

Exemplo de variação do fotoperíodo de locais no hemisfério Norte



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.

Deduzindo o valor da Constante Solar

Distância
Terra-Sol:
 $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$

Área da
esfera: $4 \cdot \pi \cdot r^2 =$
 $2,83 \cdot 10^{23} \text{ m}^2$

Potência
do Sol:
 $3,87 \cdot 10^{26} \text{ W}$

$J_o = 3,87 \cdot 10^{26} \text{ W} / 2,83 \cdot 10^{23} \text{ m}^2$

$J_o = 1370 \text{ W/m}^2$
ou **$118,11 \text{ MJ/m}^2.\text{d}$**

Corrigindo a Constante Solar em função da distância Terra-Sol

É necessário corrigir J_0 pois a Terra não tem uma órbita perfeitamente circular em torno do Sol. O valor médio, como já mencionamos, é de $J_0 = 1370 \text{ W/m}^2$ ou $118,11 \text{ MJ/m}^2.\text{d}$, e para corrigir usamos a seguinte equação:

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

sendo que J_0' o valor de J_0 corrigido pela distância, $(d/D)^2$ representar a razão entre a distância real (r) e a distância média (D) entre a terra e o Sol e pode ser calculado por

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

Lembrando que NDA é o número do dia do ano e pode ser obtido a partir da Tabela disponível no slide 6

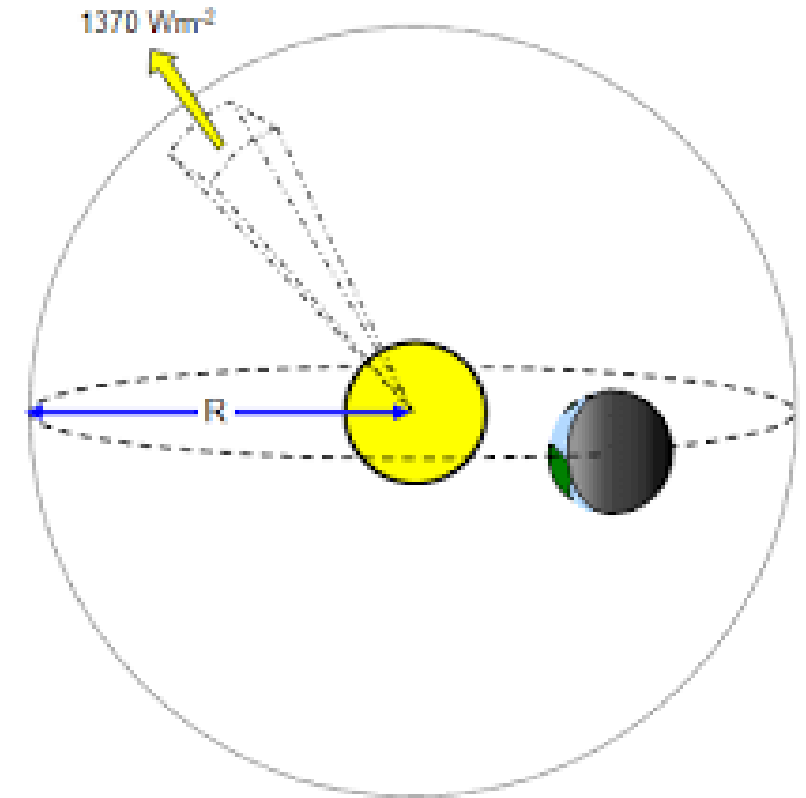


Diagram not to scale

Exercício Rápido

Calcule o valor de J_o'
para hoje?

Calcule o fotoperíodo,
o horário do nascer e o
horário do pôr-do-sol
para Piracicaba, no dia
de hoje.

Equação Final

$$Q_o = \frac{J_o'}{\pi} \cdot \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) h_n \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen } h_n \right]$$

Finalmente, agora
podemos calcular o
valor da Radiação
Extra-Terrestre
(Q_o)

- Lembrando que: J_o' é a constante solar corrigida pela distância Terra-Sol, h_n é o ângulo horário do nascer do Sol, e ϕ é a latitude, δ é a declinação solar

Revisando e resumindo - Qo

Constante Solar – máxima densidade de fluxo de radiação em uma superfície perpendicular aos raios solares, fora da atmosfera.

Tem valor constante de 1370

W/m² ou **118,11** MJ/m².d

Lat = -22,87°

Declinação = 6,18

Hn = 87.3809

Jo = 118,11

Ângulo horário do nascer do Sol

$$hn = \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta)$$

Ângulo horário do nascer do Sol

$$Q_o = \frac{J_o}{\pi} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{\pi}{180}\right) hn \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin hn \right]$$

Razão entre a distância Terra-Sol num determinado dia e a distância média Terra-Sol

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

Latitude

Latitude

Declinação Solar

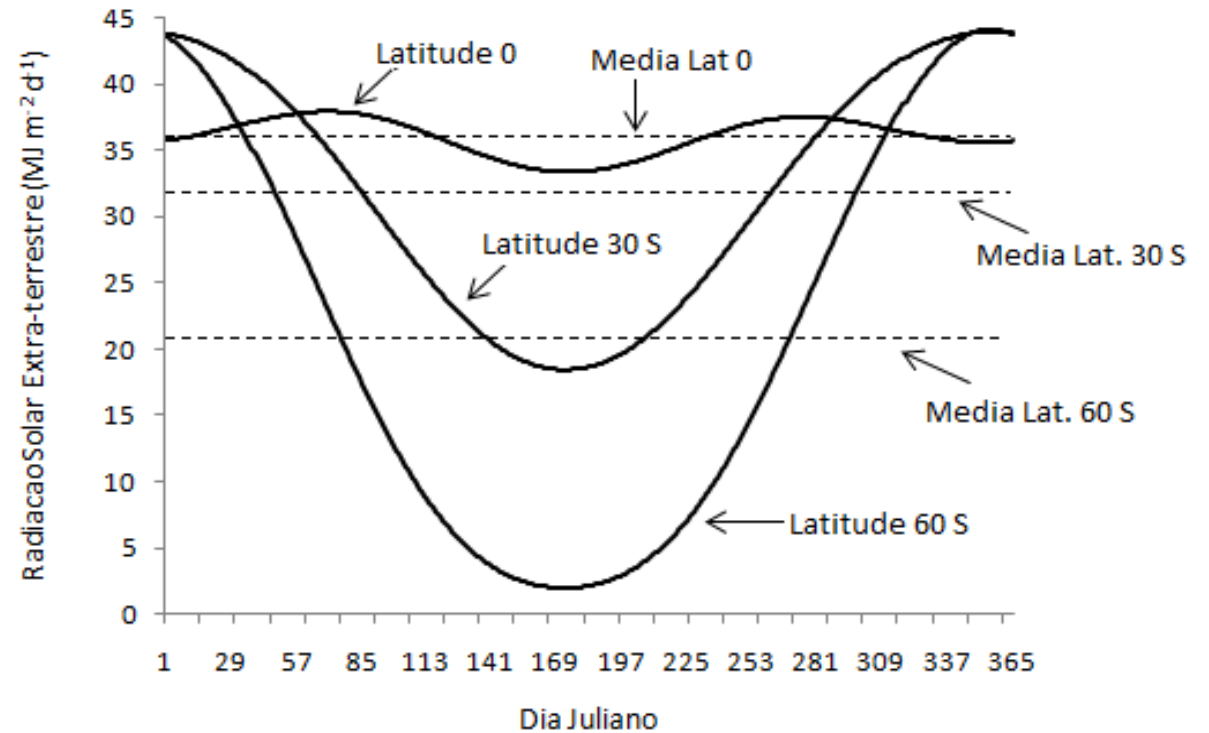
Declinação Solar

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

Número do Dia do Ano

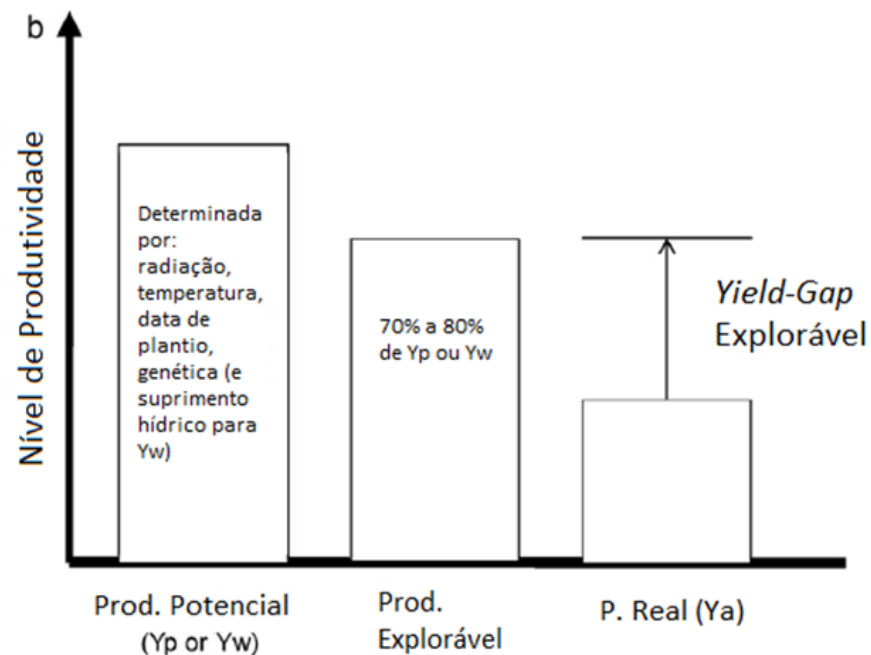
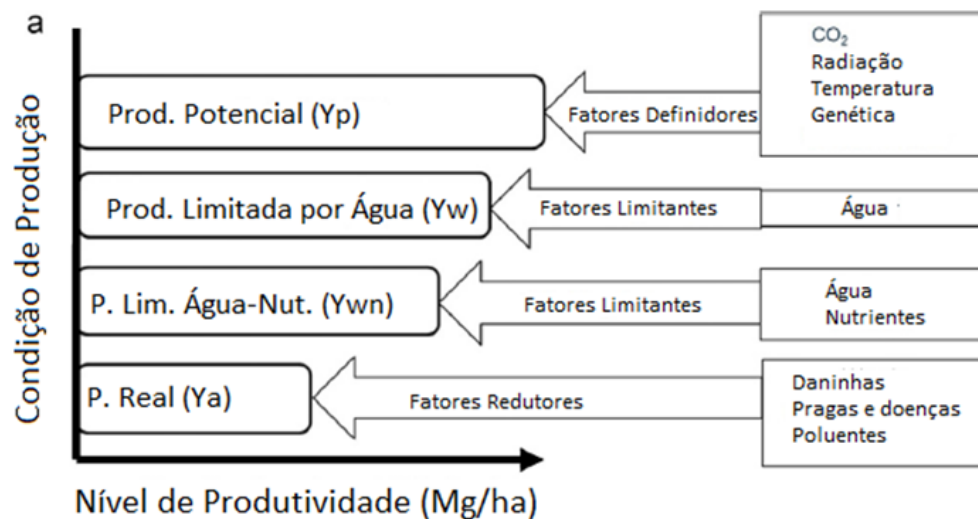


Observe a variação da radiação solar extra-terrestre (Q_0) para diferentes latitudes (linha cheia) e o valor médio anual (linhas pontilhadas)



Responda: em qual dos locais a produção de espécies perenes é mais indicada? E das culturas anuais?

Níveis de produção e seus respectivos fatores determinantes/limitantes



Interação Radiação - Vegetação

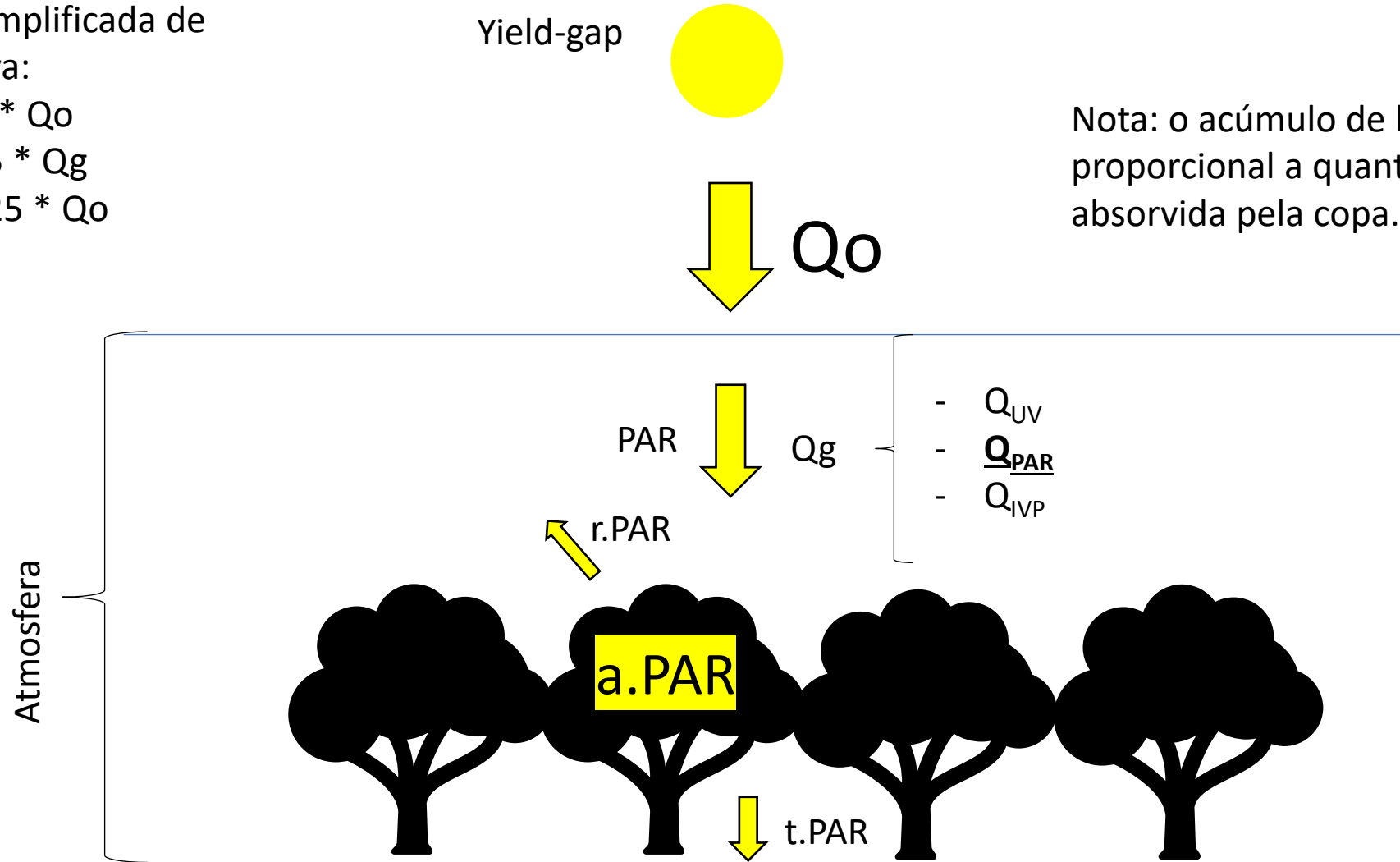
Forma simplificada de
estimativa:

$$Q_g = 0,5 * Q_o$$

$$PAR = 0,5 * Q_g$$

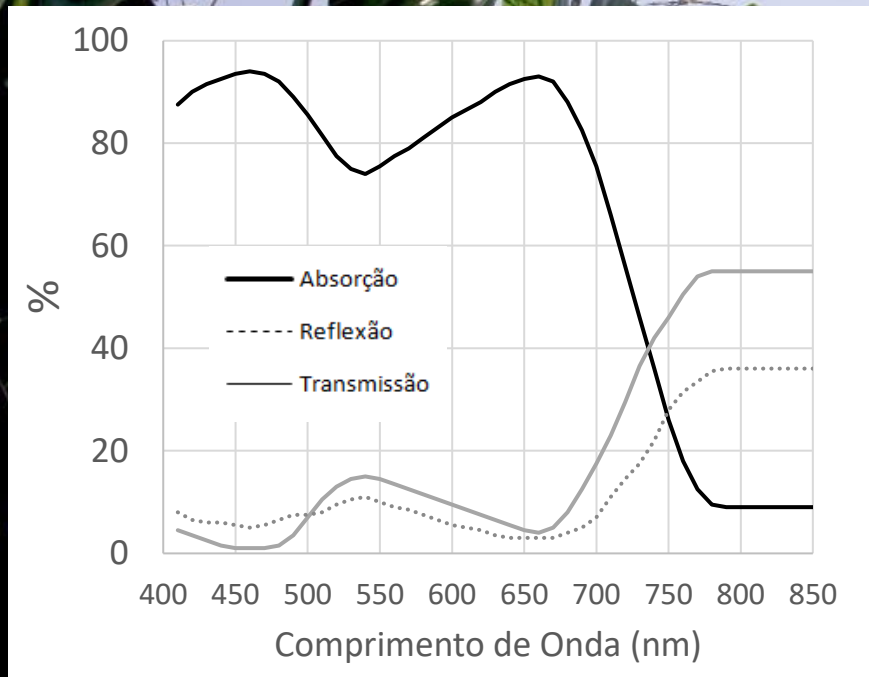
$$PAR = 0,25 * Q_o$$

Nota: o acúmulo de biomassa é
proporcional a quantidade de PAR
absorvida pela copa.



Radiação Absorvida pelo Dossel Vegetativo

Observe a variação espectral da refletância, transmitância e absorbância para uma vegetação hipotética



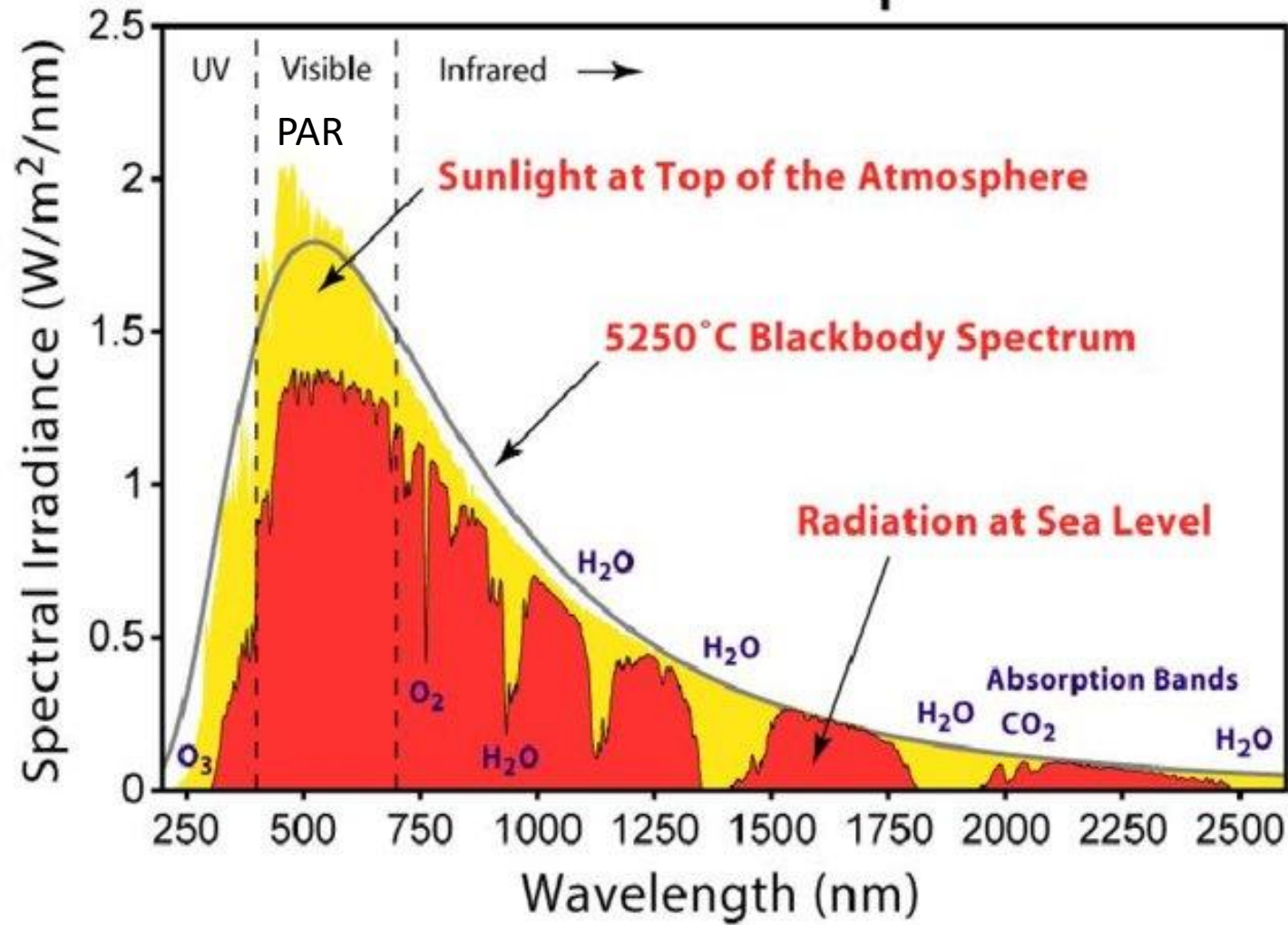
$$\text{Absorção (A)} = (I_0 - I) / I_0$$

$$\text{Transmissão (T)} = I / I_0$$

$$\text{Reflexão (r)} = I_0 (1 - r)$$

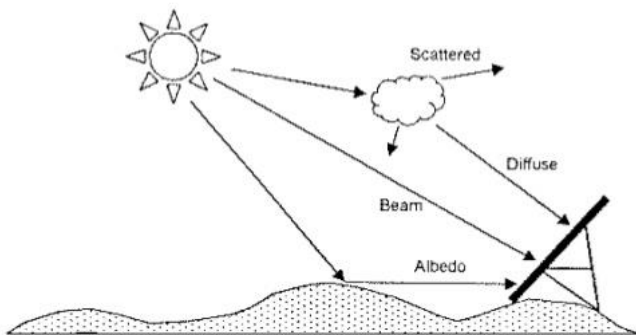
Sendo que I_0 é a radiação que incide sobre as folhas e I é a radiação abaixo da folhagem

Espectro da Radiação Solar - PAR



Radiação direta e difusa

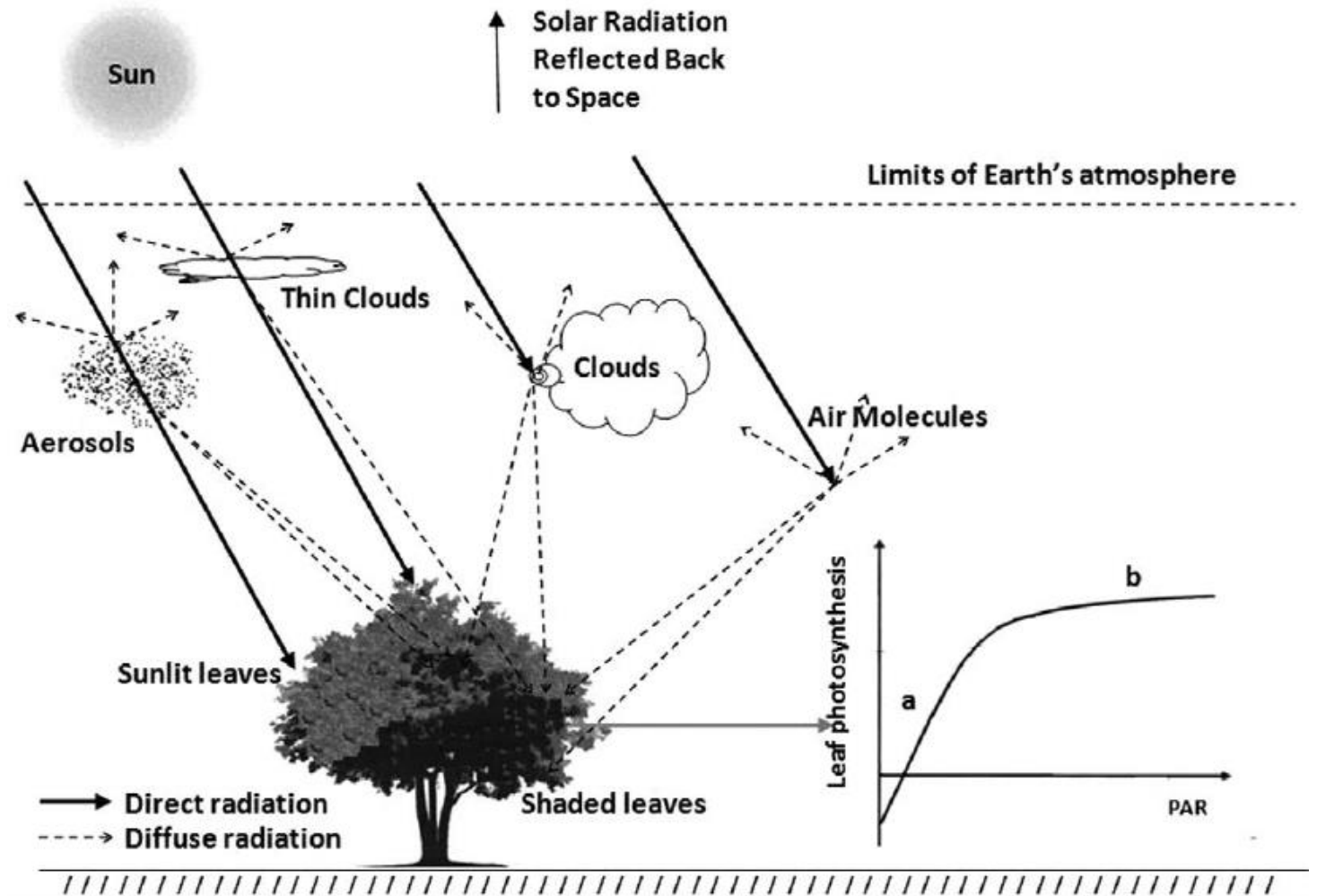
Difference between Beam Radiation and diffuse Radiation



- Quanto ao *processo de difusão* da radiação solar, o efeito dos constituintes atmosféricos apenas muda a direção dos raios solares. Esse processo ocorre nos dias de céu nublado, por exemplo. Nessas situações, que os raios solares vêm de todas as direções possíveis. Evidentemente, esse processo também afeta a quantidade e a qualidade da radiação solar que atinge a superfície da Terra, pois parte desta radiação é difundida de volta para o espaço sideral.
- Quanto mais limpa estiver a atmosfera, menor será a proporção da radiação solar que sofrerá o processo de difusão. Isso significa que maior proporção dos raios solares atingem *diretamente* a superfície. Essa radiação *direta* é que projeta sombra dos objetos e tem uma direção bem definida (unidirecional) e determinada pelo *ângulo zenital (Z)*.

Observe agora um esquema um pouco mais detalhado...

- Representação esquemática da interação entre a radiação solar com a atmosfera, descrevendo a radiação solar direta (linha cheia) e difusa (linha pontilhada), bem como sua interação com a vegetação



A proporção de Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) muda conforme a nebulosidade: dias nebulosos têm proporcionalmente mais radiação PAR.

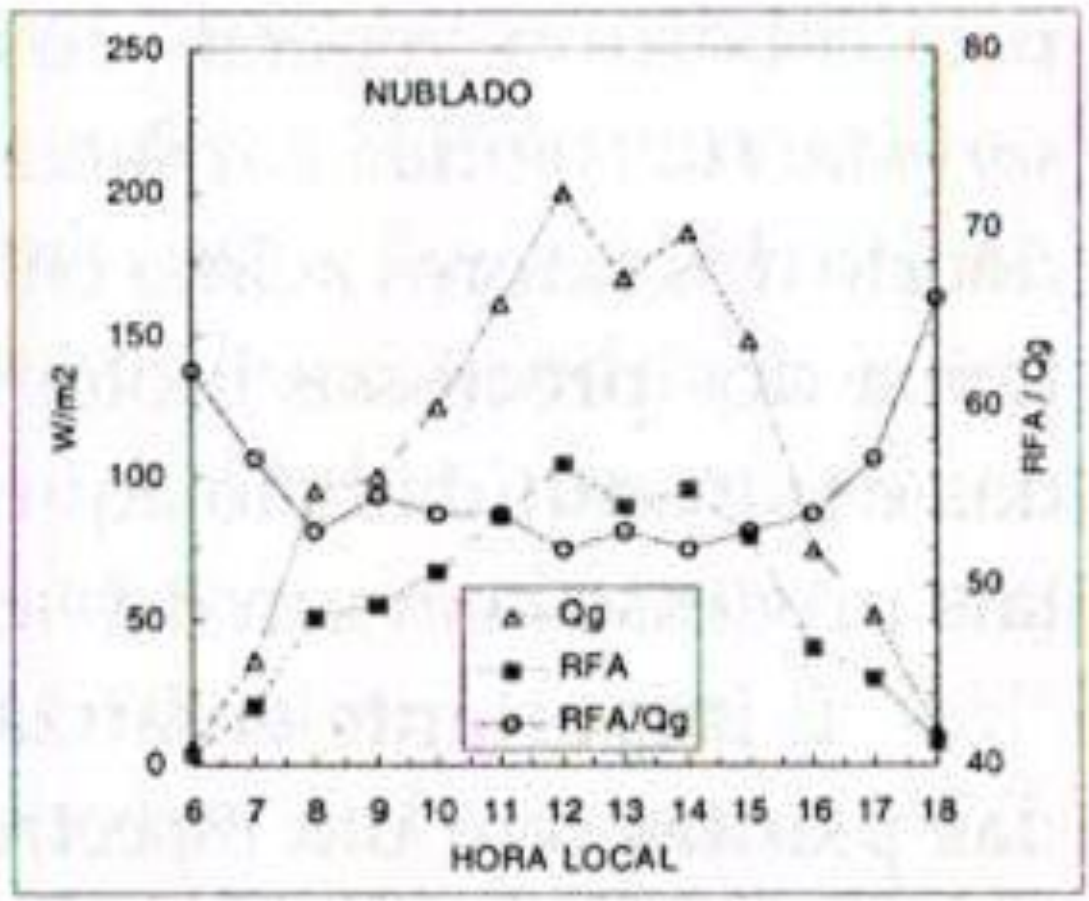
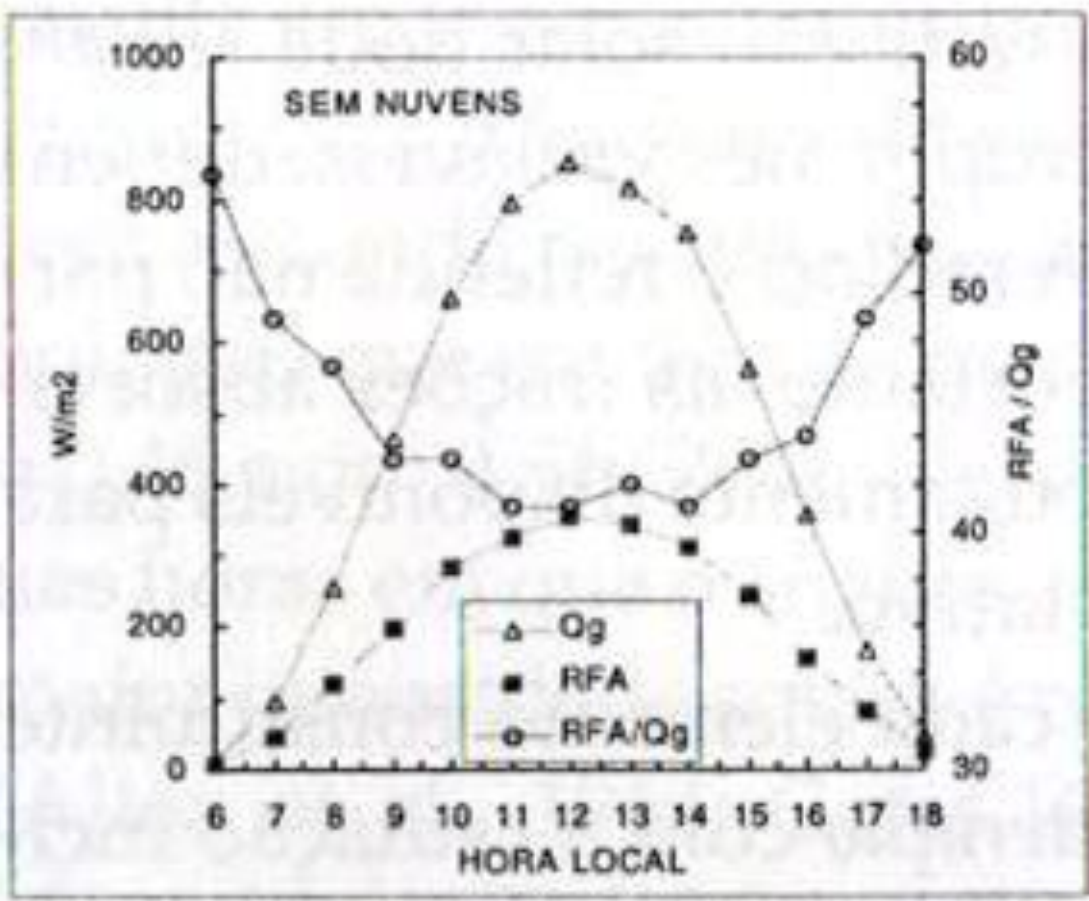


FIGURA 11.1 Variação horária da radiação solar incidente (Q_g), da RFA, e da fração RFA / Q_g , em Piracicaba, SP, para um dia sem nuvens e um nublado. Adaptado de Assunção (1994).

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

Como calcular a radiação absorvida por um dossel vegetativo?

- É possível calcular a quantidade de energia absorvida pelas folhas de uma plantação através da Lei de Beer (adaptada por Monsi & Saeki, 1972)

Radiação
abaixo da
copa

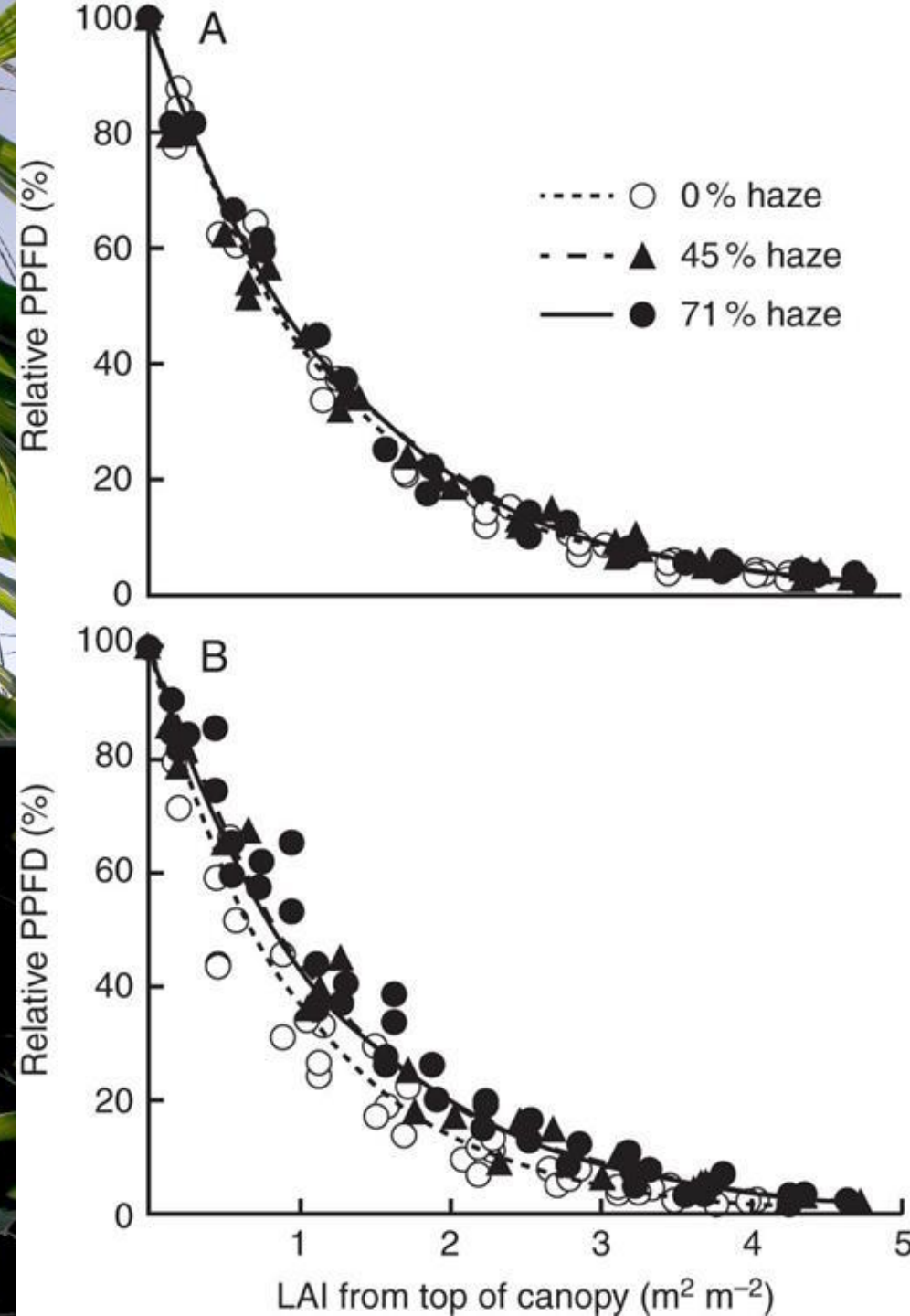
$$I = I_0 e^{-k IAF}$$

Radiação
acima da
copa

sendo que k é o coeficiente de extinção, que é função do tipo de folha, da arquitetura da copa o do ângulo de incidência dos raios solares, IAF é o índice de área foliar (m^2/m^2), I é a radiação abaixo do dossel vegetativo e I_0 é a radiação solar acima do dossel.

$$tPAR = PAR * e^{-k IAF}$$

$$aPAR = PAR * (1 - e^{-k * IAF})$$



Estimando a Produtividade Potencial (Pp ou Yp)

$$Yp' = aPAR * RUE * IC * FTar * \frac{1}{(1-U)} * ND$$

Sendo:

Yp' dado em [g/m²]

$$aPAR = PAR * (1 - r - e^{-k * IAF})$$

IC o índice de colheita (adimensional)

RUE – eficiência de uso da radiação PAR (g/MJ)

U é a umidade do produto (adimensional)

FTar – Fator de correção pelo efeito da temperatura do ar na fotossíntese (ver aula sobre temperatura)

ND – é o número de dias do ciclo ou fase fenológica considerada

$$Yp = Yp' \frac{10000}{1000} \text{ [kg/ha]}$$

- Calcule a produtividade potencial da cultura da soja para Piracicaba, usando os dados de PAR do NDA = 117, que teve $Q_o = 27,87 \text{ MJ/m}^2\text{.d}$, com os seguintes coeficientes:
- $FTar = 1$
- $IC = 0,4$ (feijão)
- $U = 0,13$ (feijão)
- $RUE = 1,76 \text{ g/MJ}$ (feijão)
- ciclo = 90 dias (feijão)
- **$k = 0,5$**
- **$r = 0$**
- **$IAF = 4,3 \text{ m}^2/\text{m}^2$**

$$PAR = Q_o / 4 = 6,9675 \text{ MJ/m}^2\text{.d}$$

$$aPAR = 6,1566 \text{ MJ/m}^2\text{.d}$$

$$Y_p = 4480 \text{ kg/ha ou } 4,48 \text{ t/ha}$$

$$Yp' = aPAR * RUE * IC * FTar * \frac{1}{(1-U)} * \text{Ciclo}$$

Sendo:

Yp' dado em $[\text{g/m}^2\text{.ciclo}]$

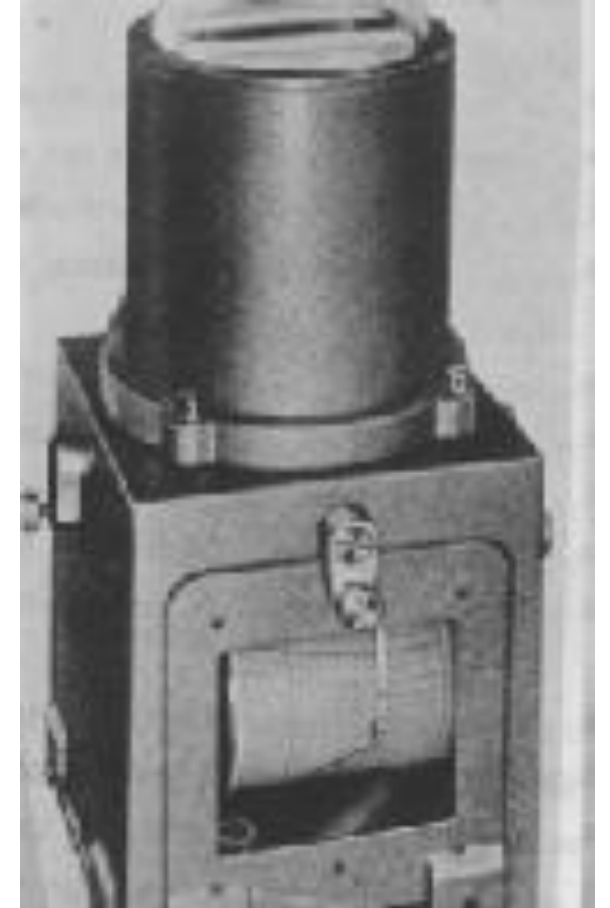
$$aPAR = PAR * (1 - r - e^{-k*IAF})$$

$$Yp = Yp' \frac{10000}{1000} [\text{kg/ha.ciclo}]$$



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 promove uma dilatação diferenciada para transferida por um sistema de alavancas para uma pena.



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

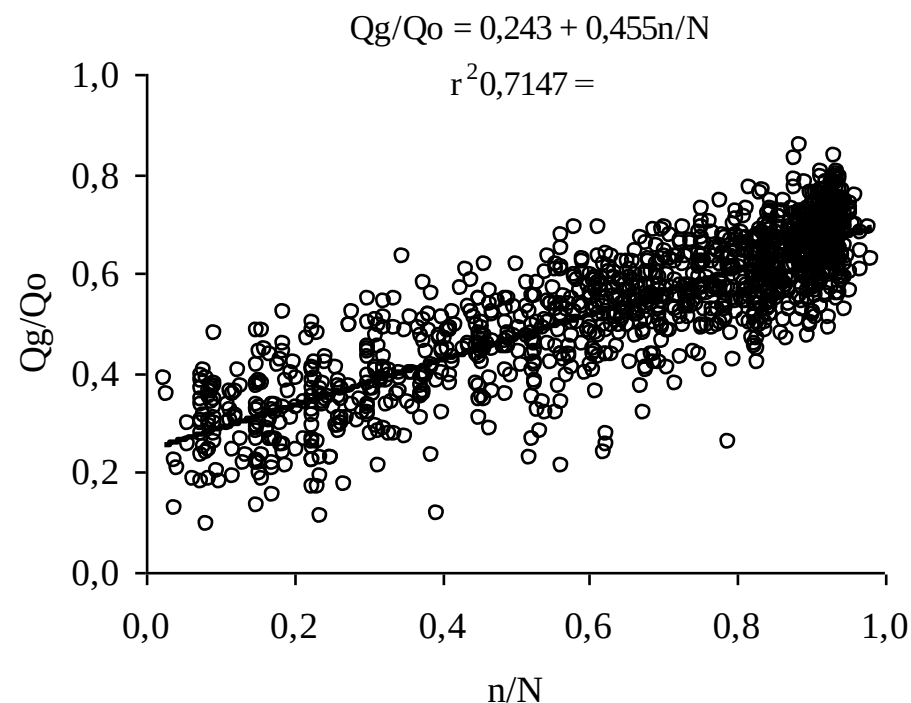
$$Q_g/Q_o = (a + b * n/N)$$

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

n é a insolação (horas) – valores medidos;

N é o fotoperíodo (horas) – valores estimados;

a e b são coeficientes dependentes da latitude e das condições atmosféricas do local.



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"

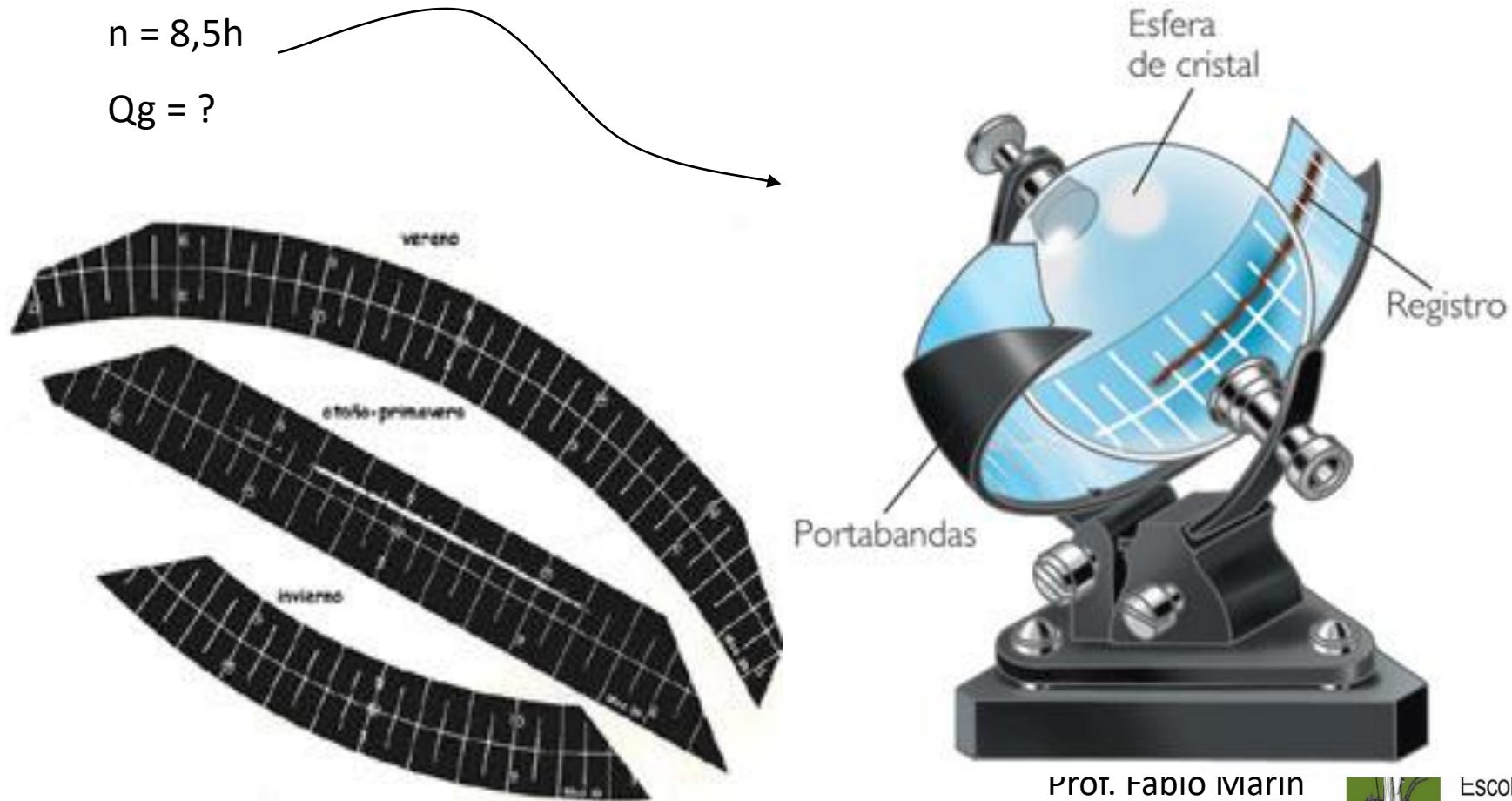


TABELA 5.4 Coeficientes a e b da Equação de Angström-Prescott, para algumas localidades brasileiras.

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).

a e b

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

- $a = 0,29 * \cos \phi$
- $b = 0,52$



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** °C^{-0,5}, para localidades situadas no interior, distantes do oceano; e 0,19 °C^{-0,5} e para localidades litorâneas ou próximas a grandes corpos de água.

Estimativa da Radiação Solar Global

Método de Bristol & Campbell (1982):

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

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

Exercício



Com base nos equações anteriores, calcule Q_g pelos três métodos, admitindo $n=8,5$ h, $T_{\max} = 34$ °C e $T_{\min} = 17$ °C.

NDA = 96
LAT = $-22,8667^\circ$ (Pira)
Declin = $6,3774^\circ$
 $\cdot H_n = 87,2983^\circ$
 $(d/D)^2 = 0,9973$
 $Q_o = 31,8298 \text{ MJ/m}^2.\text{d}$

Angstron
 $N = 11,6398\text{h}$
 $a = 0,28$
 $b = 0,51$
 $Q_g = 20,7667 \text{ MJ/m}^2.\text{d}$

Bristol & Campbel

$T_{\max} = 34^\circ\text{C}$
 $T_{\min} = 17^\circ\text{C}$
 $A = 0,7812$
 $B = 0,00515$
 $C = 2,2$
 $Q_g = 23,0606 \text{ MJ/m}^2.\text{d}$

Hargreaves

$T_{\max} = 34^\circ\text{C}$
 $T_{\min} = 17^\circ\text{C}$
 $K = 0,16$
 $Q_g = 20,9981 \text{ MJ/m}^2.\text{d}$

Leitura

Obrigatória:

Apostila de Meteorologia Agrícola. ESALQ. 2007. Caps 5.

Disponível em http://www.ler.esalq.usp.br/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf

