



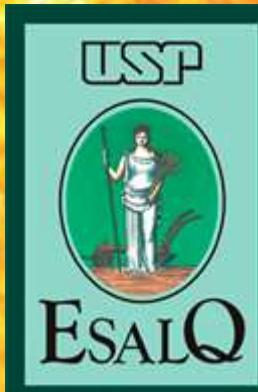
Aula 2- RADIAÇÃO SOLAR

Calculando o valor de Qo, Qg e PAR

Conceituando Prod Potencial

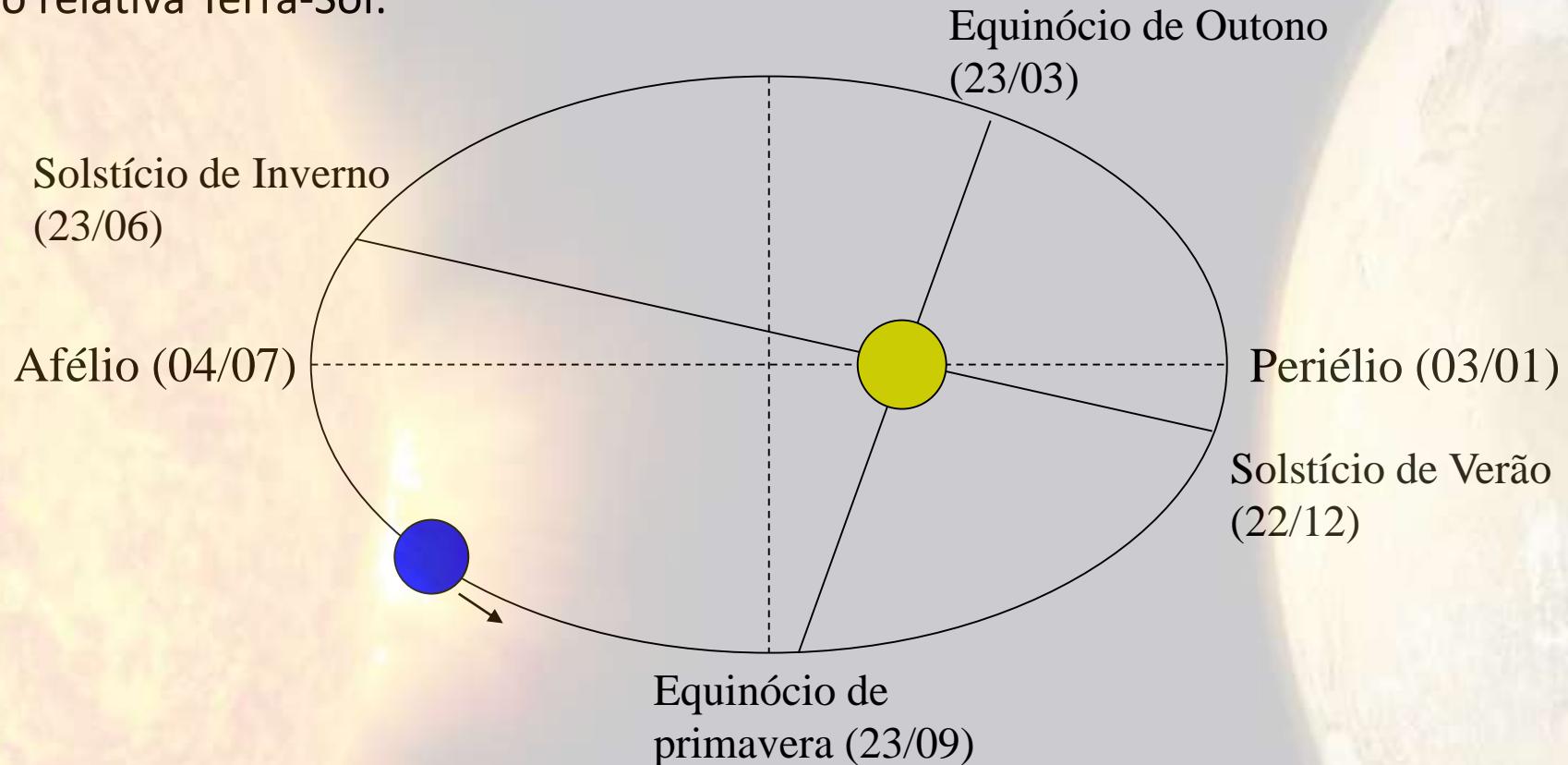
Prof. Fábio Marin

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



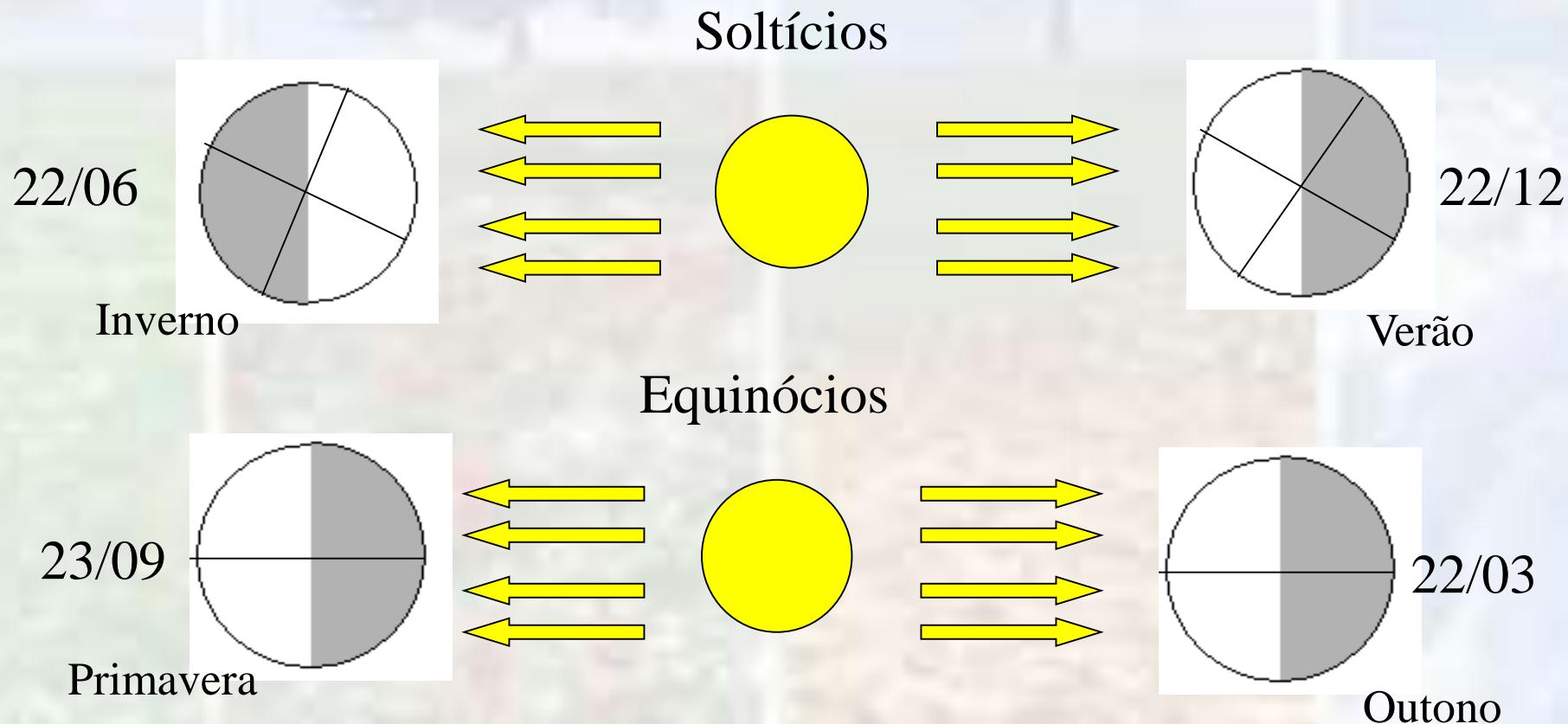
De onde vem a radiação solar? Movimentos de rotação e translação

- Posição relativa Terra-Sol:



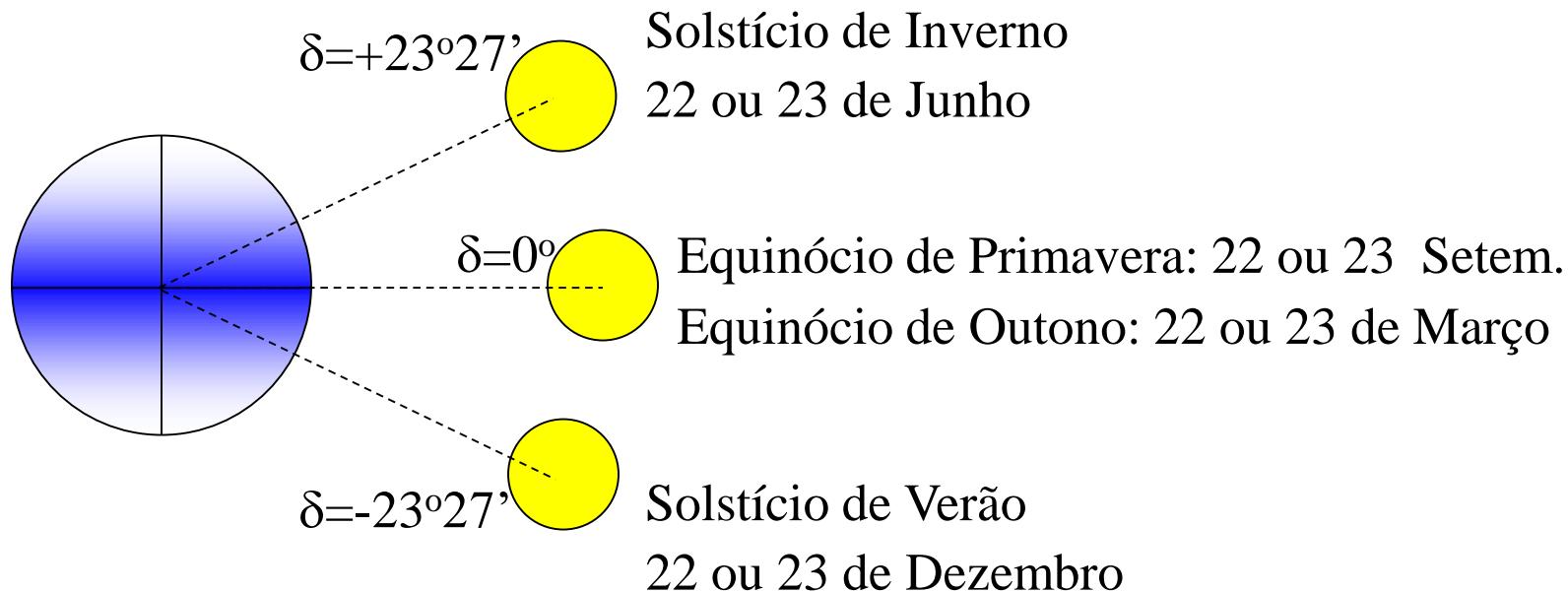
Estimando Qo - Estações do ano

- 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

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

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).

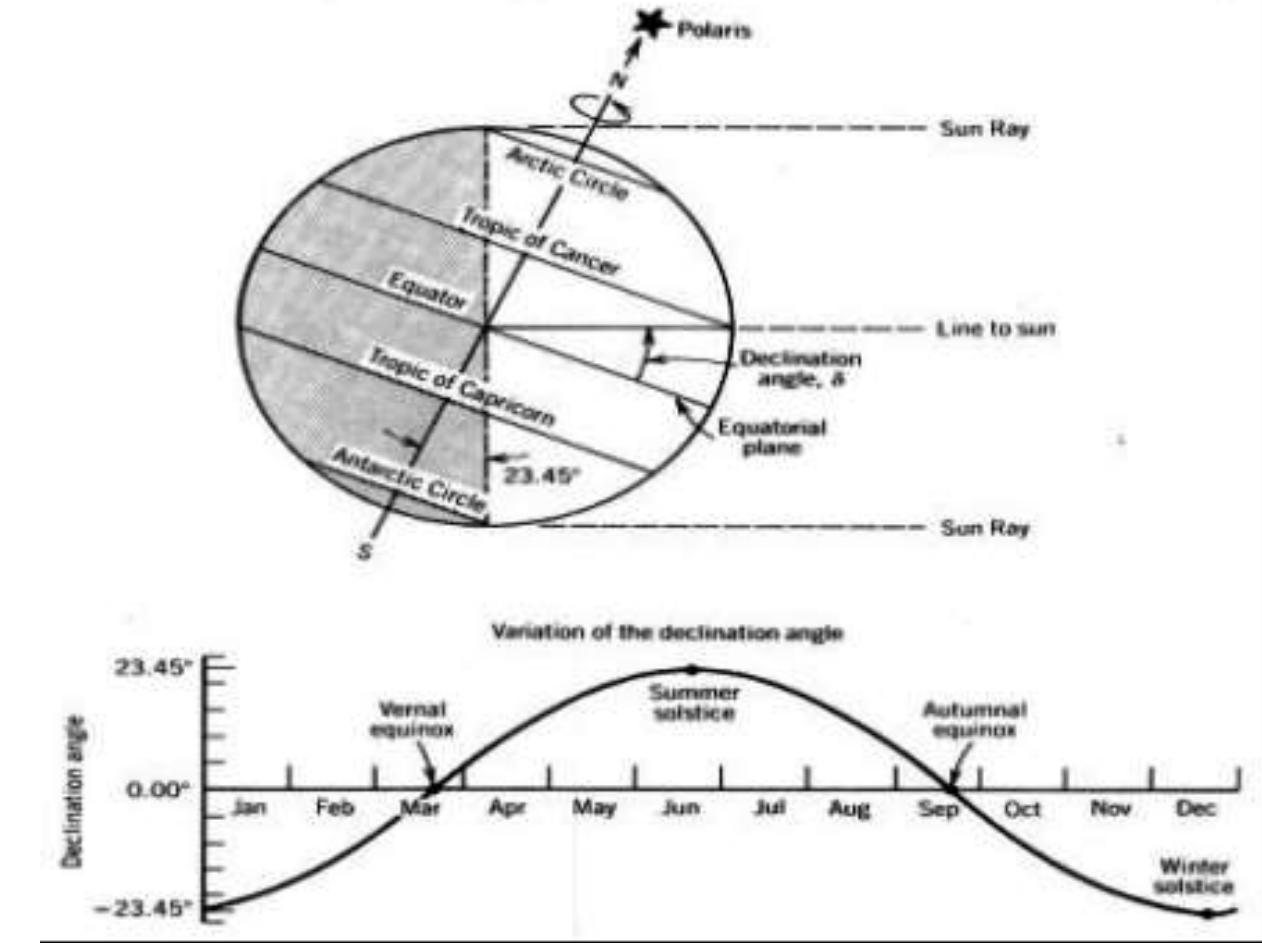
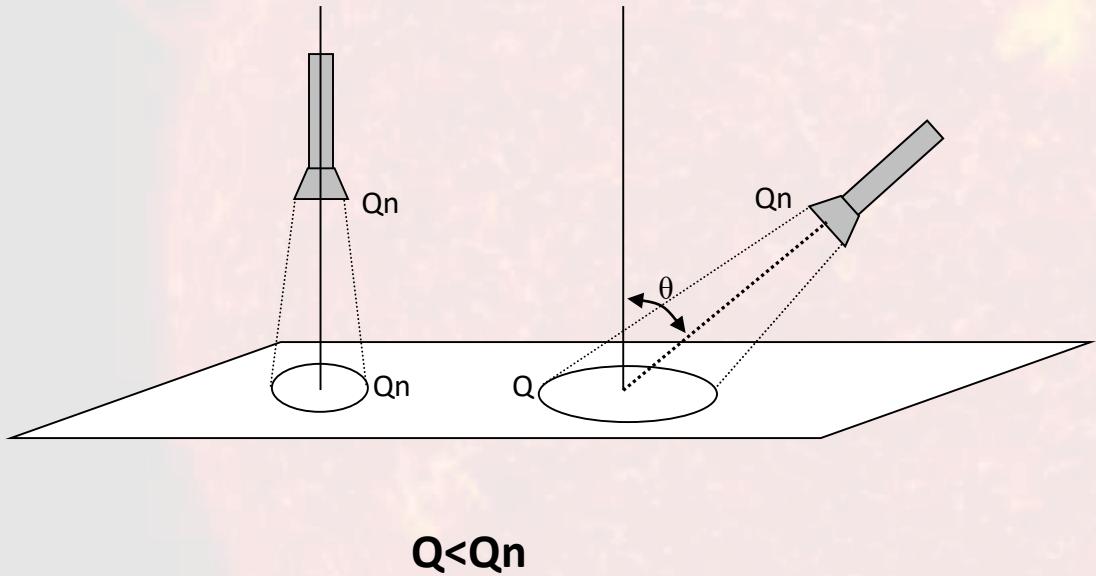


Tabela de NDA

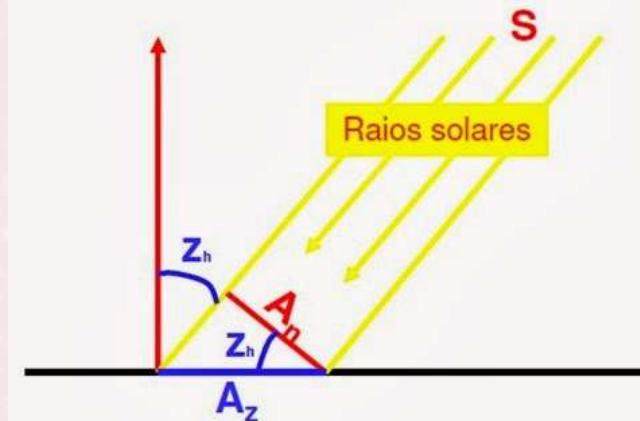
Nas colunas temos os meses e nas linhas temos os dias. Combinando uma linha com uma coluna, encontramos o NDA..

| | 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



Lei do Cosseno de Lambert



Intensidade = Energia/(Área * Tempo)

Energia = S

Área real = A_z

Área normal = A_n

Tempo = unitário

$$I_n = S / A_n$$

$$I_z = S / A_z$$

Igualando-se 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:

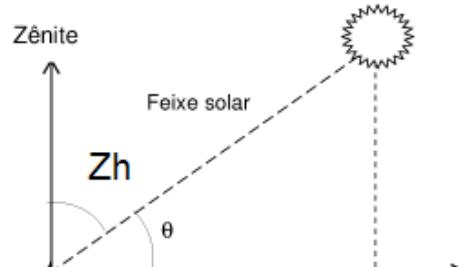
$$Z_h = 0^\circ \rightarrow I_z = I_n$$

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

Estimando Qo - Ângulo Zenital (Zh)

- 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.

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



Estimando Qo - Calculando o Ângulo Zenital

$$\cos Z_h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cosh = -\tan \Phi \tan \delta$$

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.

Ângulo Zenital ao Meio-Dia

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

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

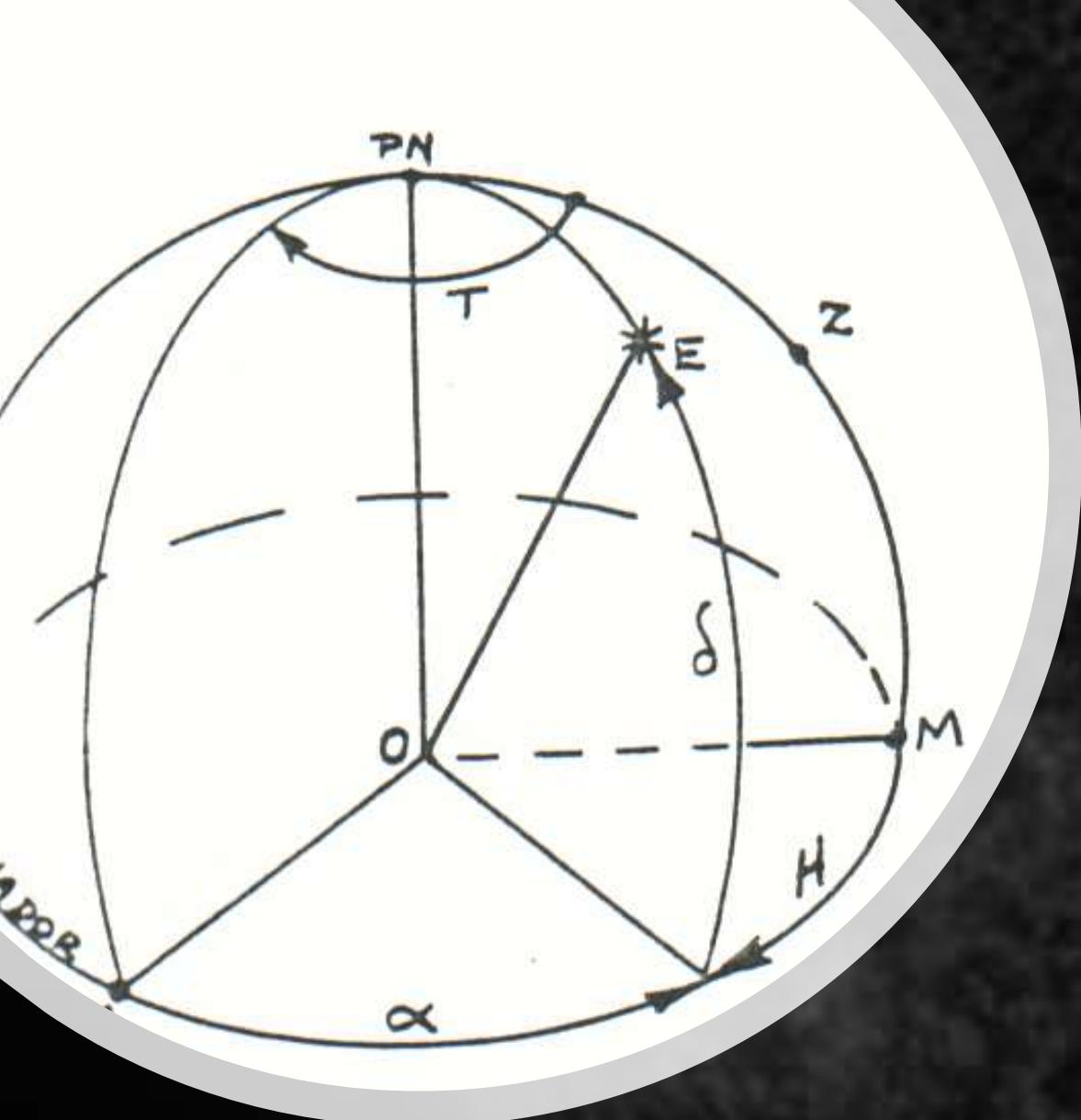
$$\cos Z_{12} = \cos(\delta - \phi)$$

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

Exercício Rápido

a) Calcule a Declinação Solar para hoje em Piracicaba?

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



Ângulo Horário

- h é ângulo horário do sol – ângulo formado pelo plano meridiano do sol e o plano meridiano do ponto onde está o observador
- $h = (\text{hora local} - 12)/15^\circ$

Estimando Qo - Calculando o Ângulo Zenital do Sol ano nascer do Sol

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

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

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

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:

$$N = 2 * hn/15$$

sendo hn o ângulo horário no nascer do Sol)

Ao nascer, o ângulo zenital é 90 e $\cos 90 = 0$. Assim, isolando-se hn 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:

$$\begin{aligned} 0 &= \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos hn \\ \cos hn &= \frac{(-\sin \phi \cdot \sin \delta)}{(\cos \phi \cdot \cos \delta)} = -\tan \phi \cdot \tan \delta \\ hn &= \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \end{aligned}$$

Assim, o fotoperíodo (N) é dado por:

$$N = 2 * hn/15$$

Horário do nascer e pôr-do-Sol

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

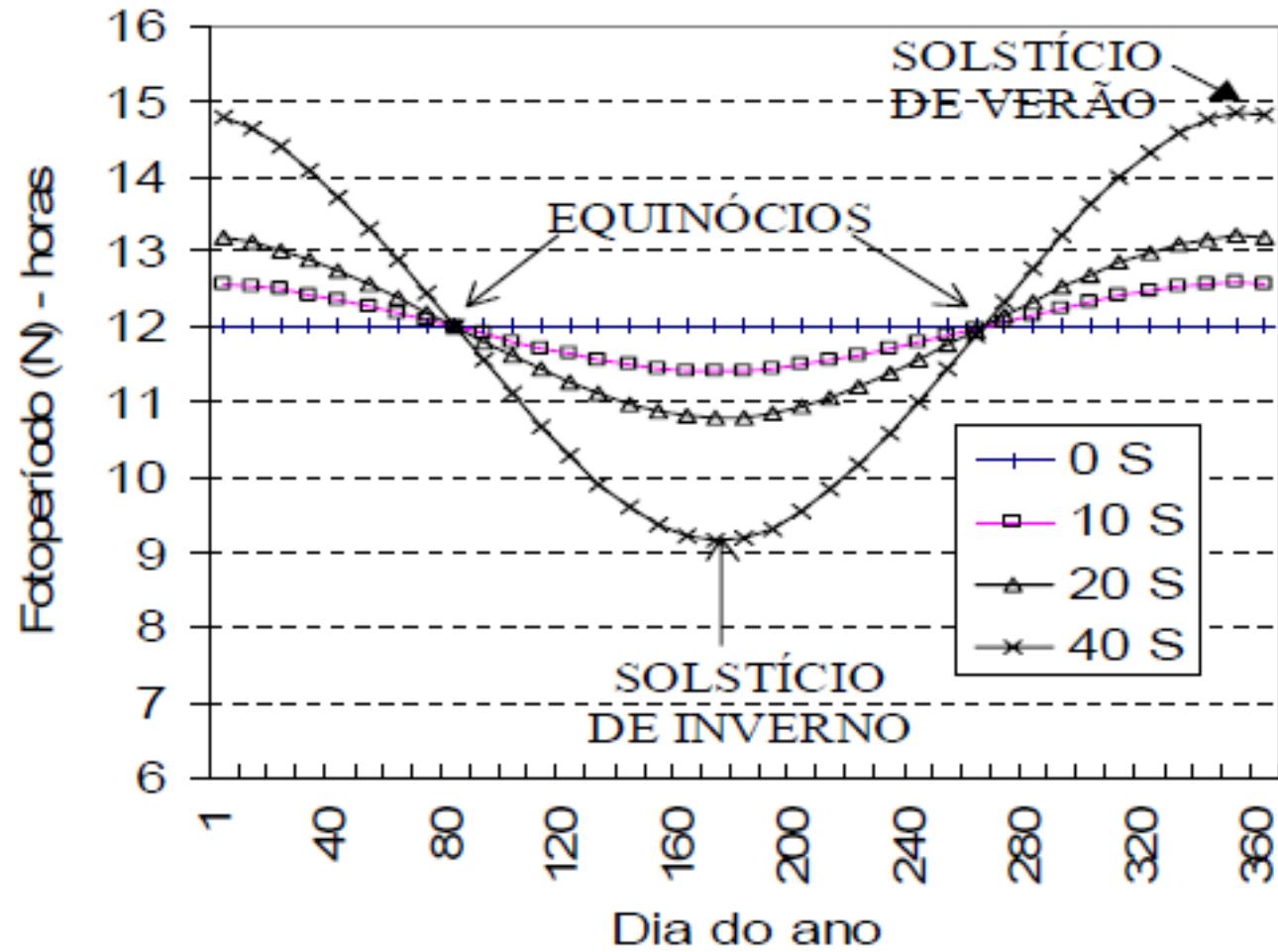
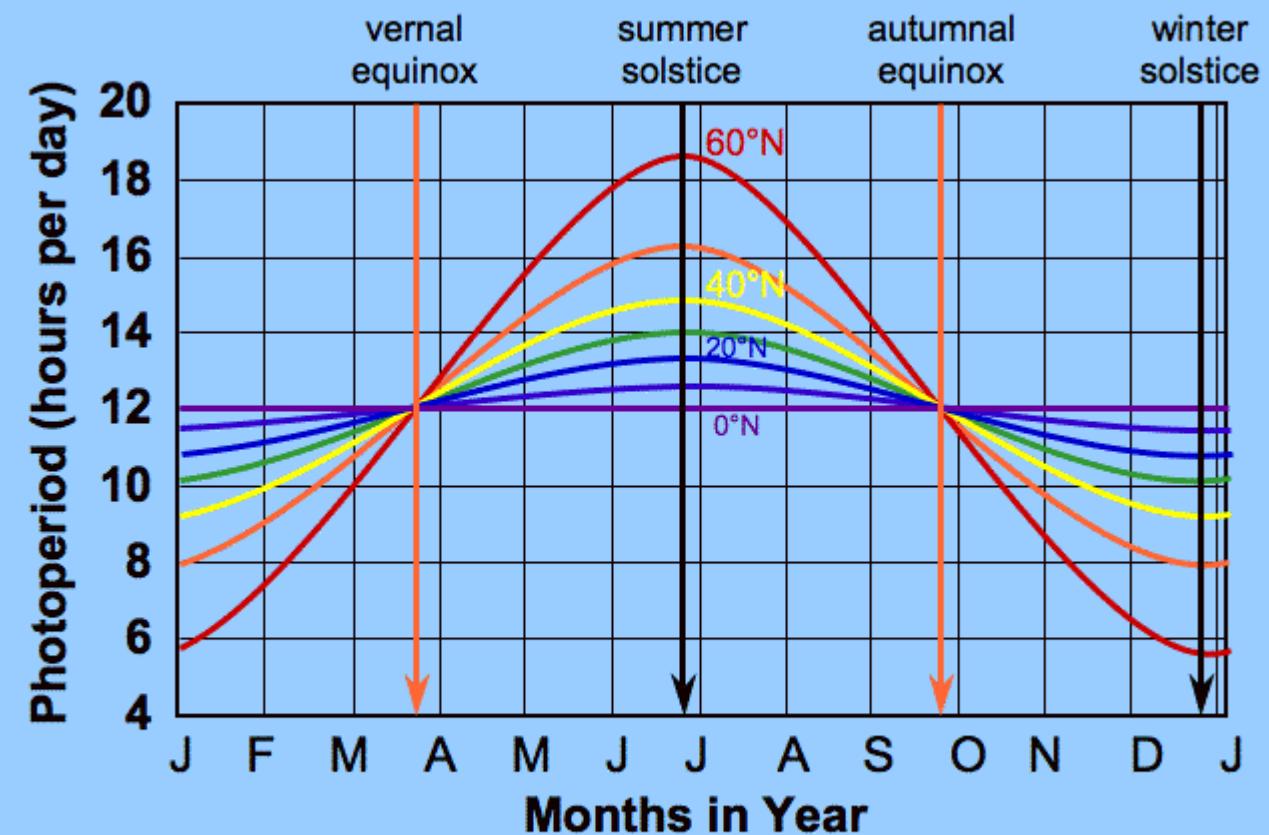


Figura 5.2. Variação anual do fotoperíodo em algumas latitudes do hemisfério sul.

Exemplo de variação do fotoperíodo de locais no hemisfério Sul

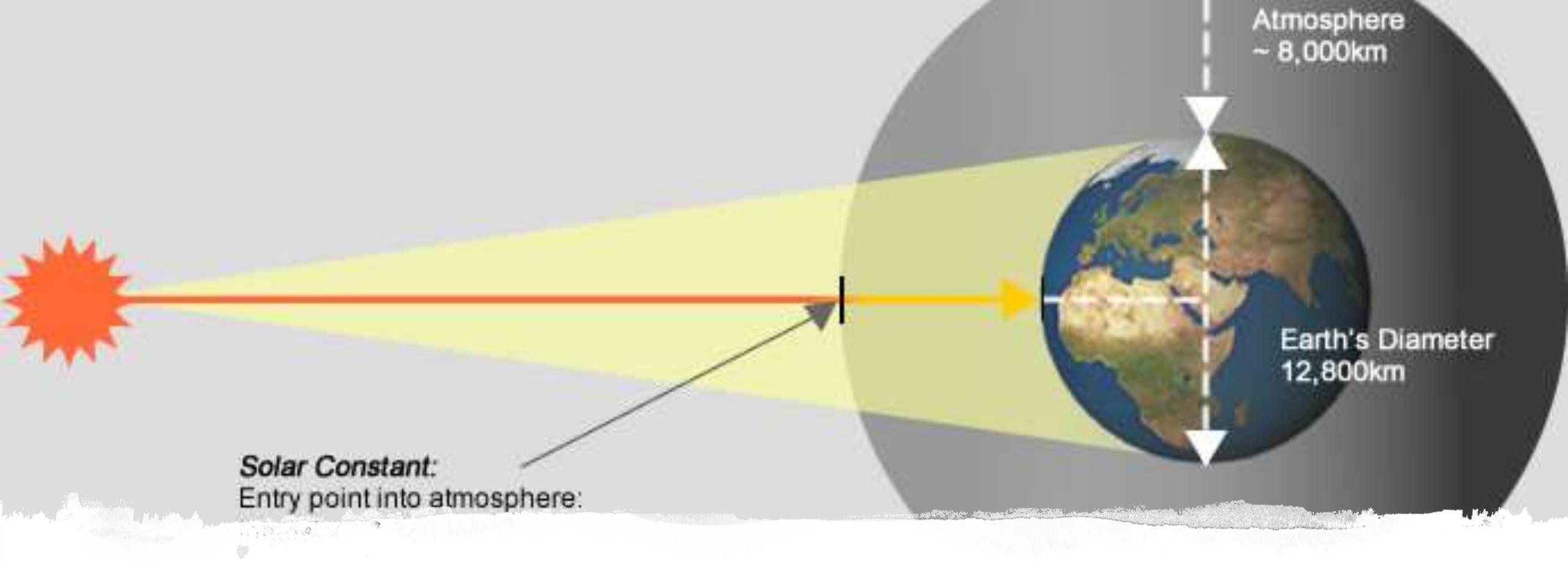
Horário do nascer e pôr-do-Sol

- 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:
 $1,5 \cdot 10^8$ km

Área da esfera: $4 * \pi * r^2 =$
 $2,83 \cdot 10^{23}$ m²

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

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

$J_o = 1367 \text{ W/m}^2$
ou **$118,11 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$**

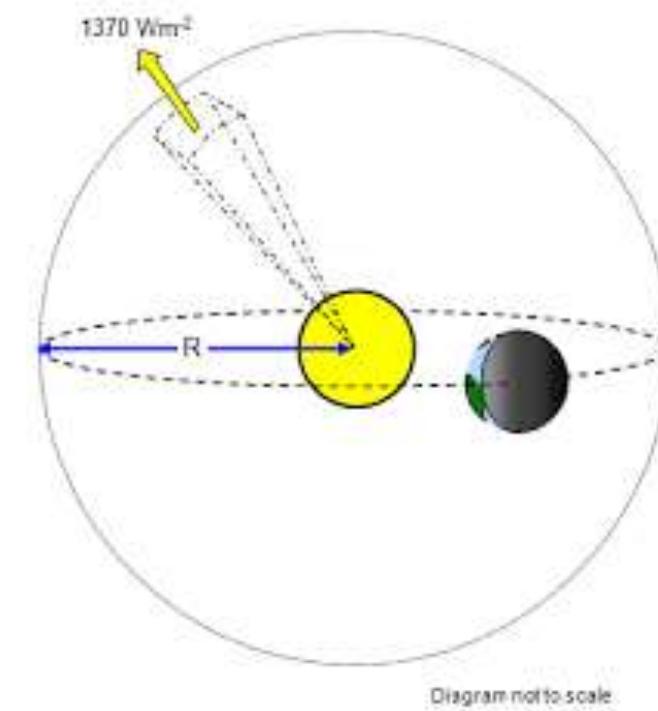
Corrigindo a Constante Solar em função da distância Terra-Sol

É necessário corrigir J_o pois a Terra não tem uma órbita perfeitamente circular em torno do Sol. O valor médio, como já mencionamos, é de $J_o = 1367 \text{ W/m}^2$ ou $118,11 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$, e para corrigir usamos a seguinte equação:

$$J_o' = J_o (d/D)^2$$

sendo que J_o' o valor de J_o 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

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



Exercício Rápido

Calcule o valor de Jo' para hoje?

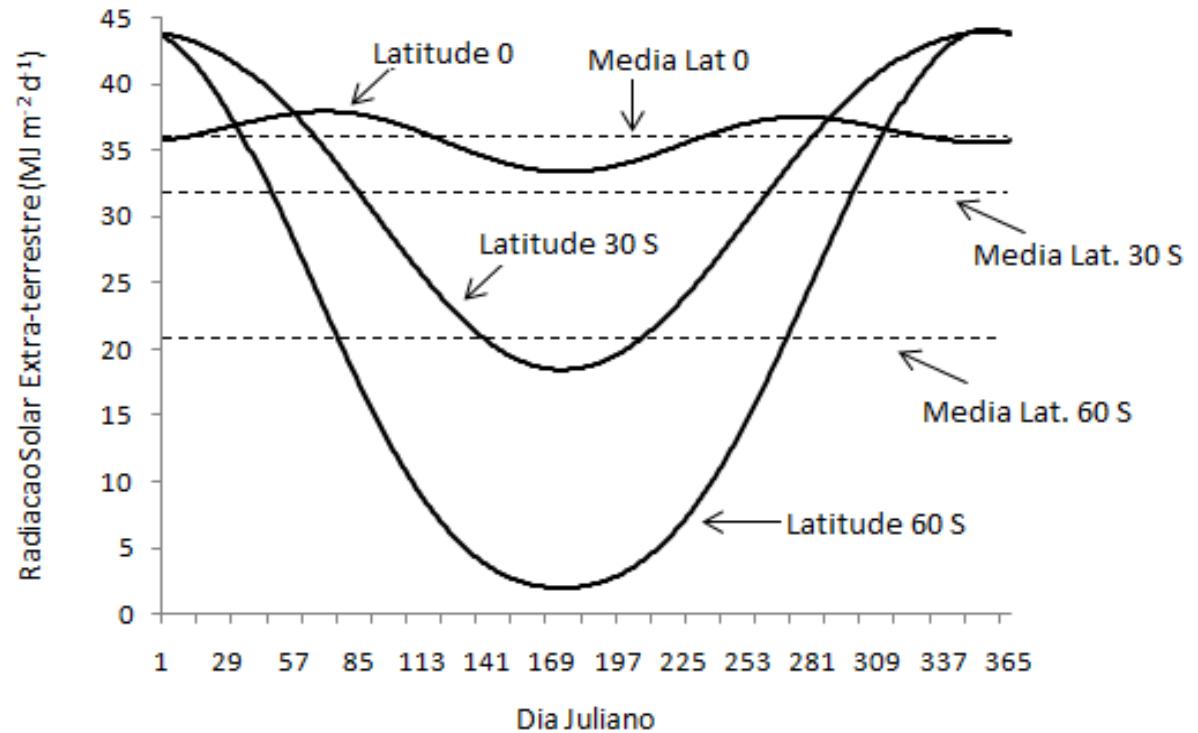
Calcule o fotoperíodo, o horário do nascer e o horário do pôr-do-sol para Piracicaba, no dia de hoje.

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

$$Qo = \frac{Jo'}{\pi} \cdot \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) hn \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin hn \right]$$

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

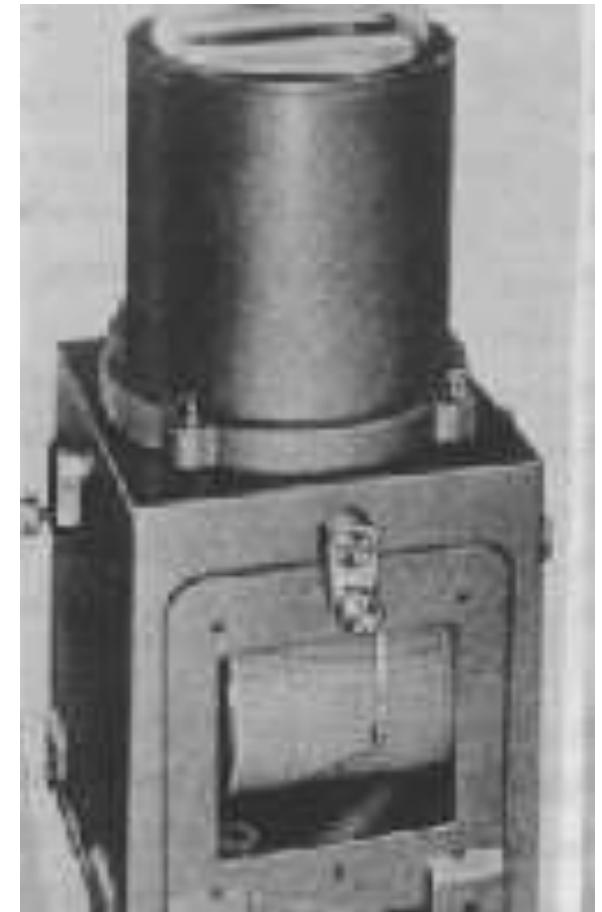
Observe a variação da radiação solar extra-terrestre (Q_o) para diferentes latitudes (linha cheia) e o valor médio anual (linhas pontilhadas)



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

Medida da Radiação Solar Global

- Actinógrafo de Robitzch
- 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.

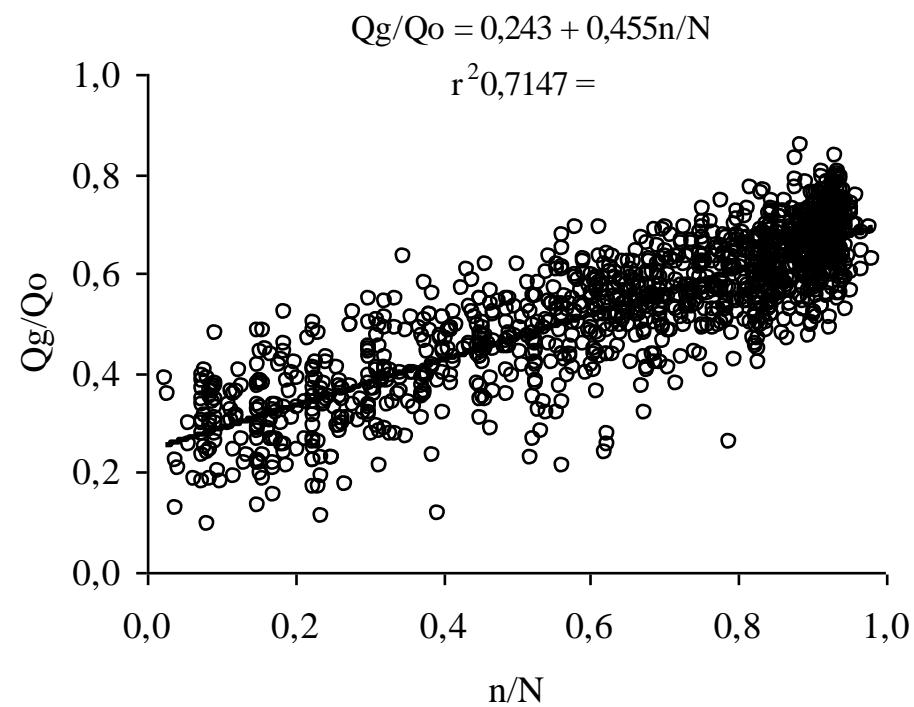
Medida da Radiação Solar Global

- 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

$$Q_g/Q_o = (\mathbf{a} + \mathbf{b} * n/N)$$

$$Q_g = Q_o * (\mathbf{a} + \mathbf{b} * n/N)$$

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 = 27º21'25"Sul

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

$N = 12\text{h}$

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

$Q_g = ?$

Medida do número de horas de brilho solar (n)

Heliógrafo - “Registro gráfico”

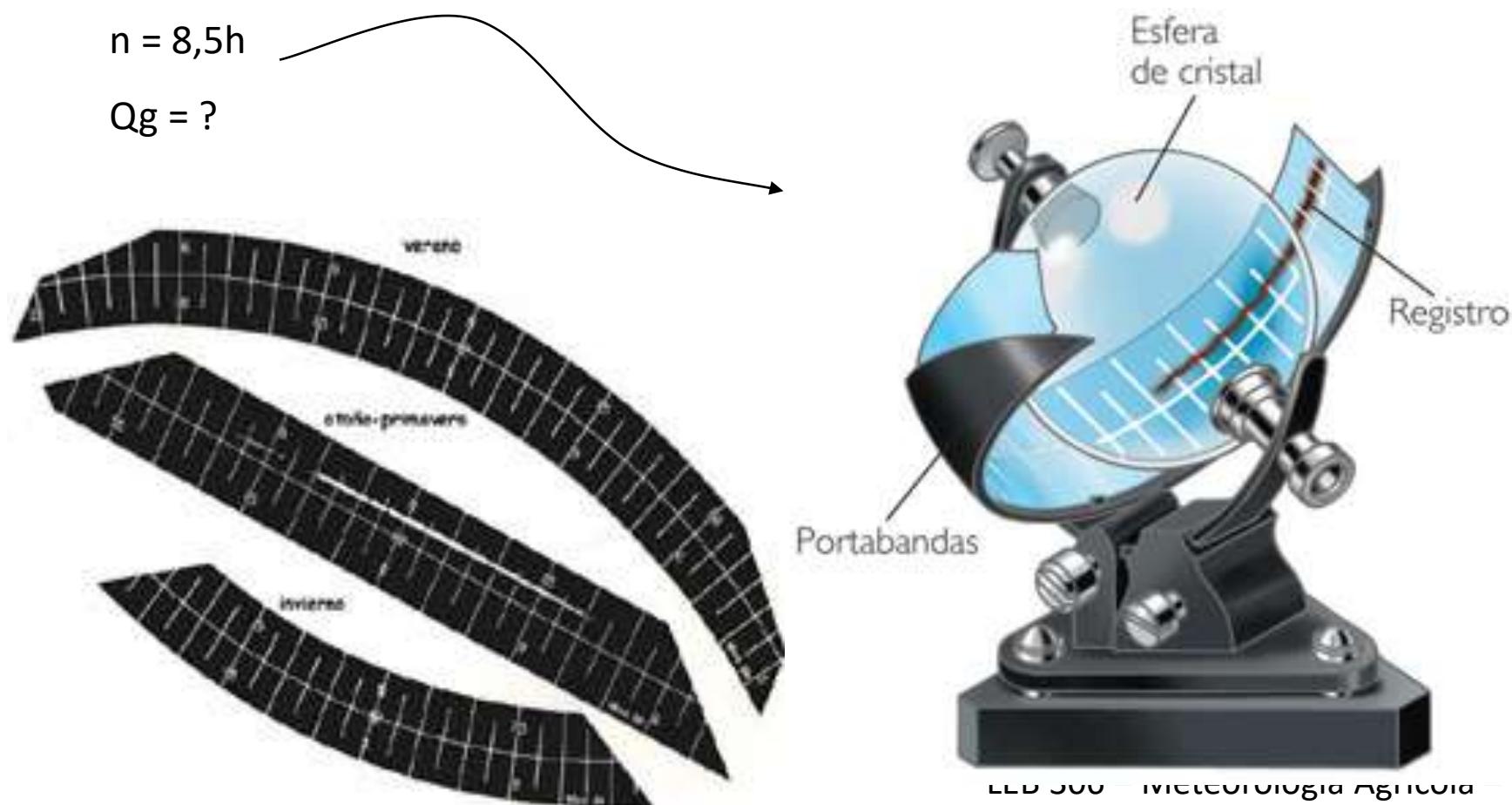


TABELA 5.4 Coeficientes a e b da Equação de Angström-Prescott, para algumas localidades brasileiras.

| 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 |
| Vिजोसा - 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:

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

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

Exercício Rápido

- Com base nos exercícios anteriores, calcule Q_g para o dia de hoje, pelos dois métodos, admitindo $n=7,1\text{ h}$, $T_{\max} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{\min} = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Leitura

Obrigatoria:

Pereira, Angelocci, Sentelhas. Meteorologia Agrícola. Apostila. ESALQ. 2007.
Caps 5.

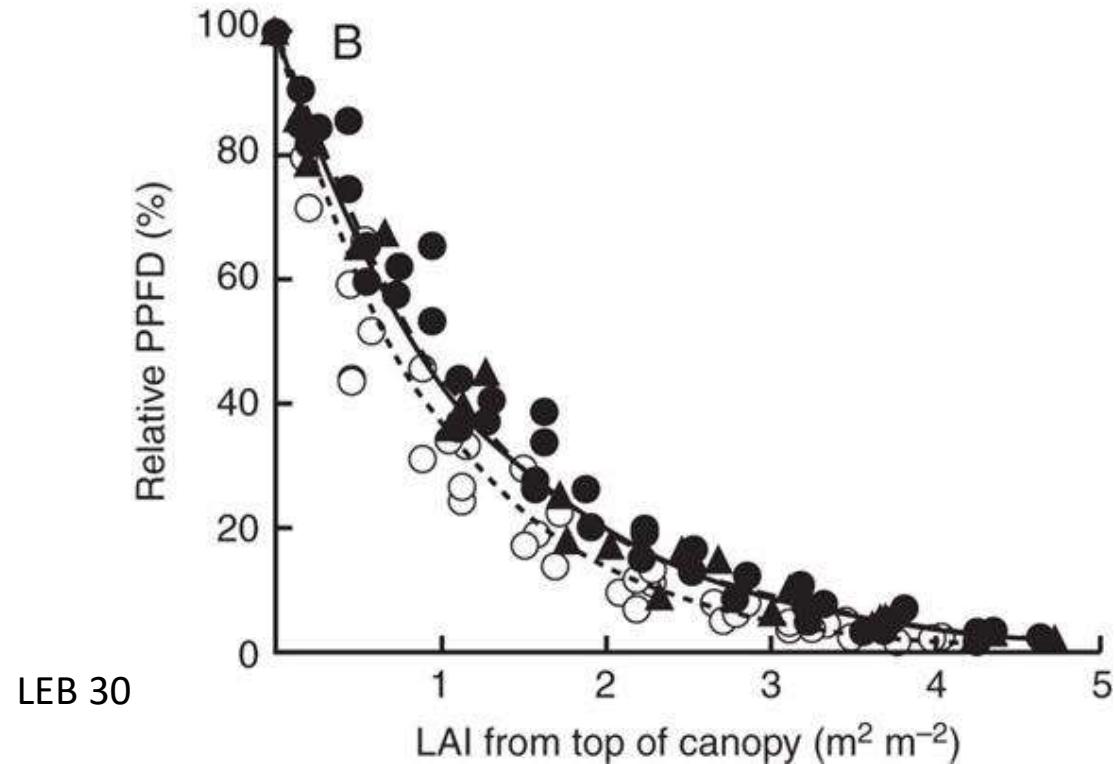
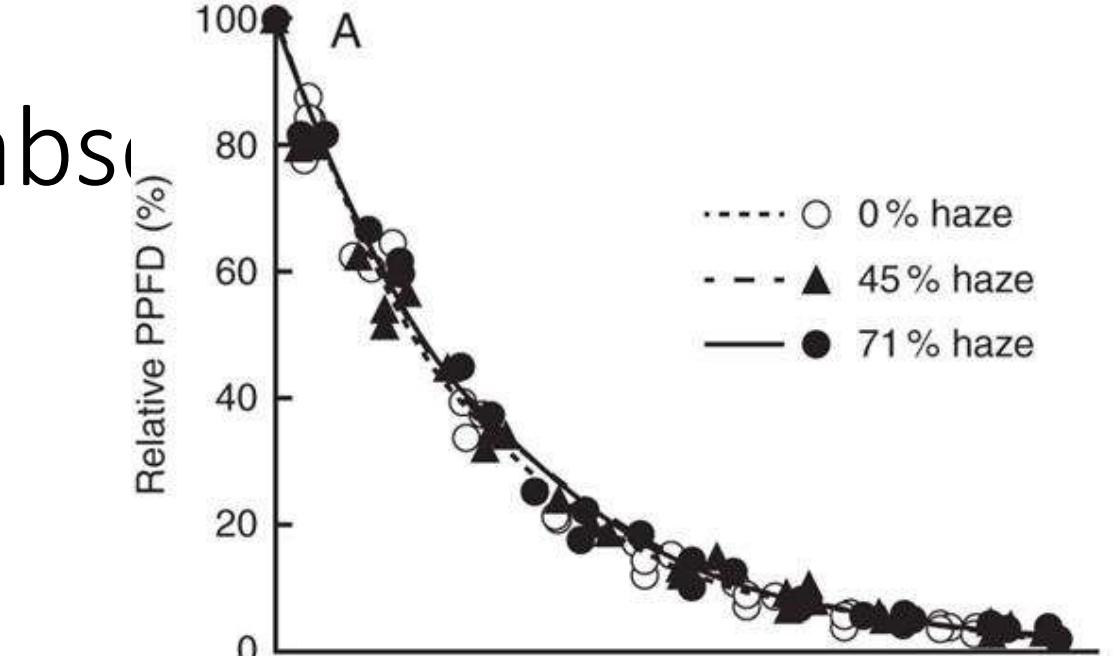
Disponível em http://www.ler.esalq.usp.br/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf

Como calcular a radiação absorvida pelo dossel vegetativo?

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

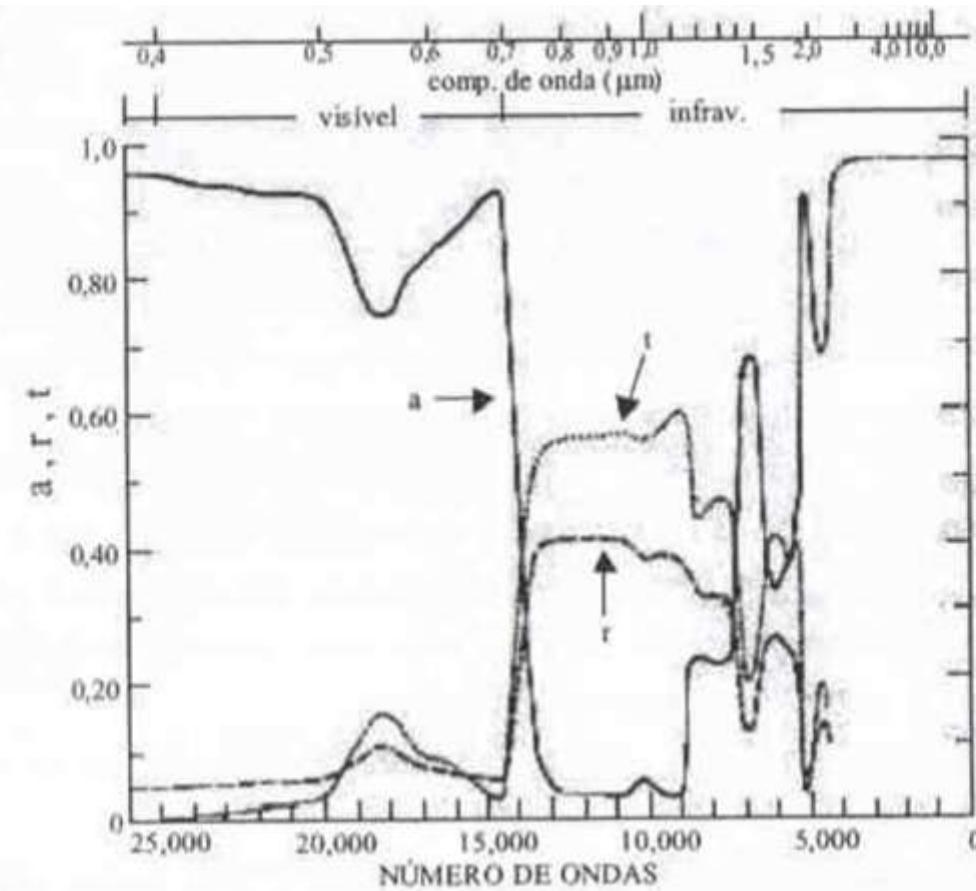
$$I = I_o e^{-k IAF}$$

sendo que k é o coeficiente de extinção, que é função do tipo de folha, da arquitetura da copa ou 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_o é a radiação solar acima do dossel.



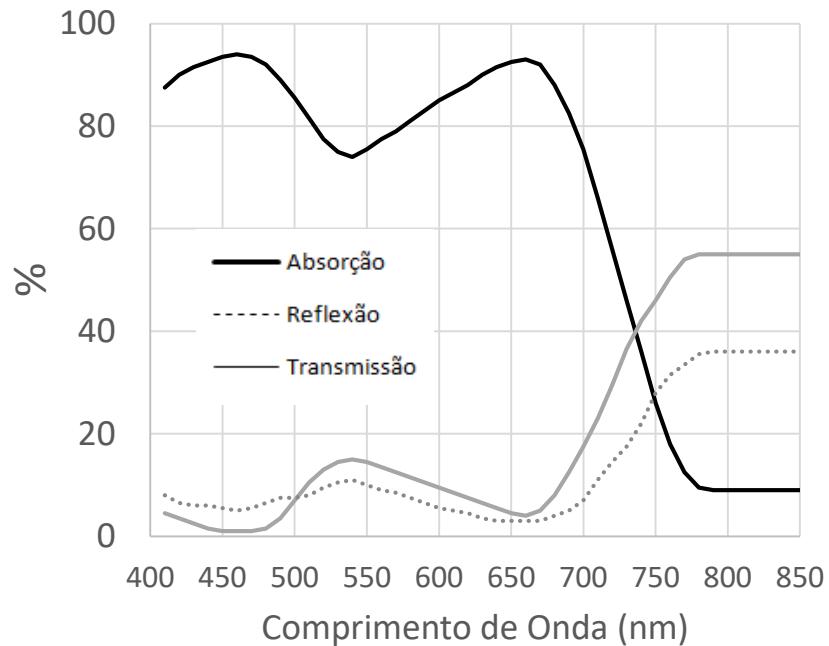
Observe aqui as três linhas representando os comprimentos de onda mais absorvidos, refletidos e transmitidos pelas folhas largas e verdes. As curvas espectrais mostram a variação espectral da absorância (a), reflectância (r) e transmittância (t)

- Tente identificar no gráfico e entender os seguintes conceitos:
 - Absorção
 - Reflexão
 - Emissão
 - Transmissão



Radiação Absorvida pelo Dossel Vegetativo

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



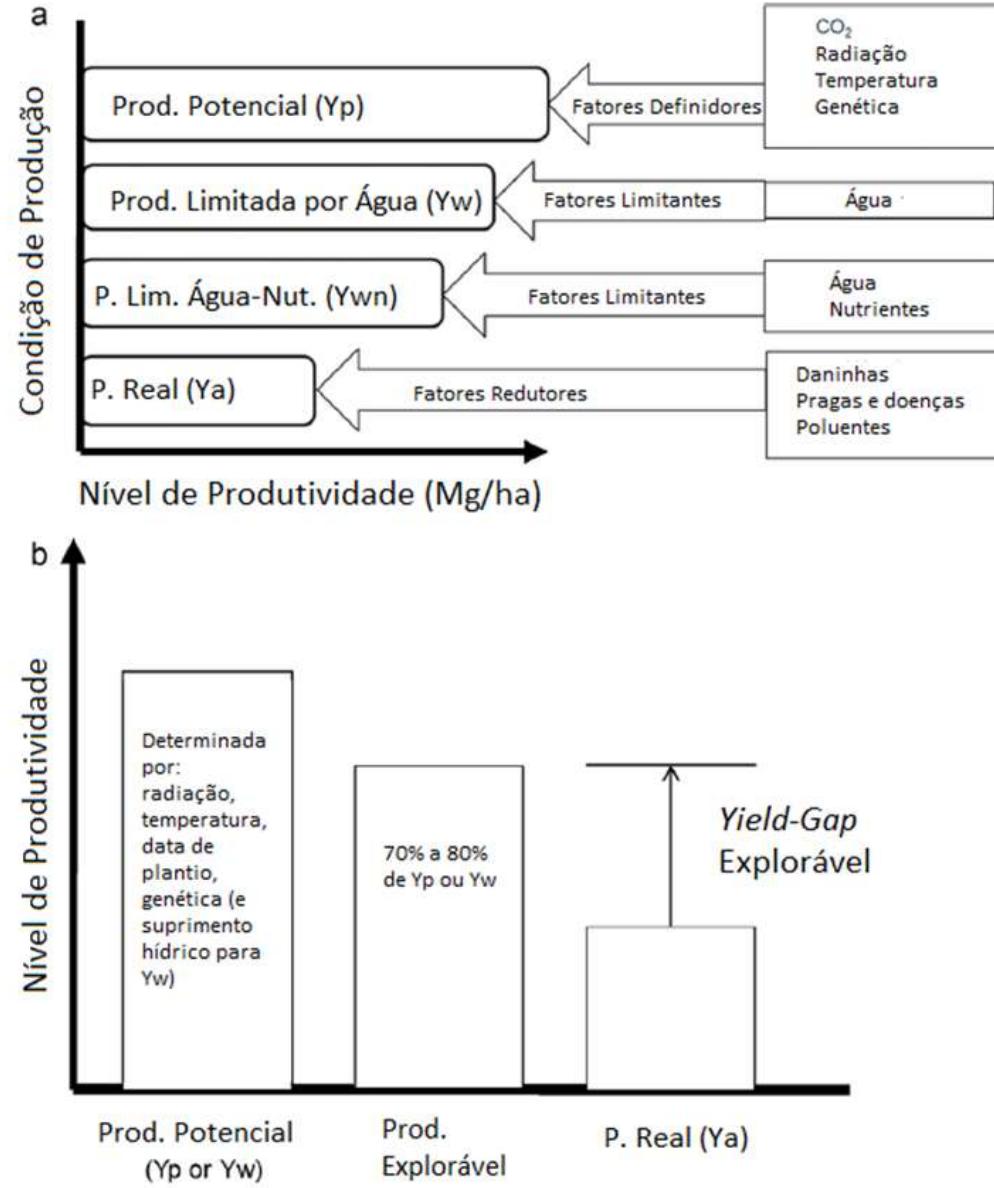
$$\text{Absorção (A)} = (I_0 - I)/I_0$$

$$\text{Transmissão (T)} = I/I_0$$

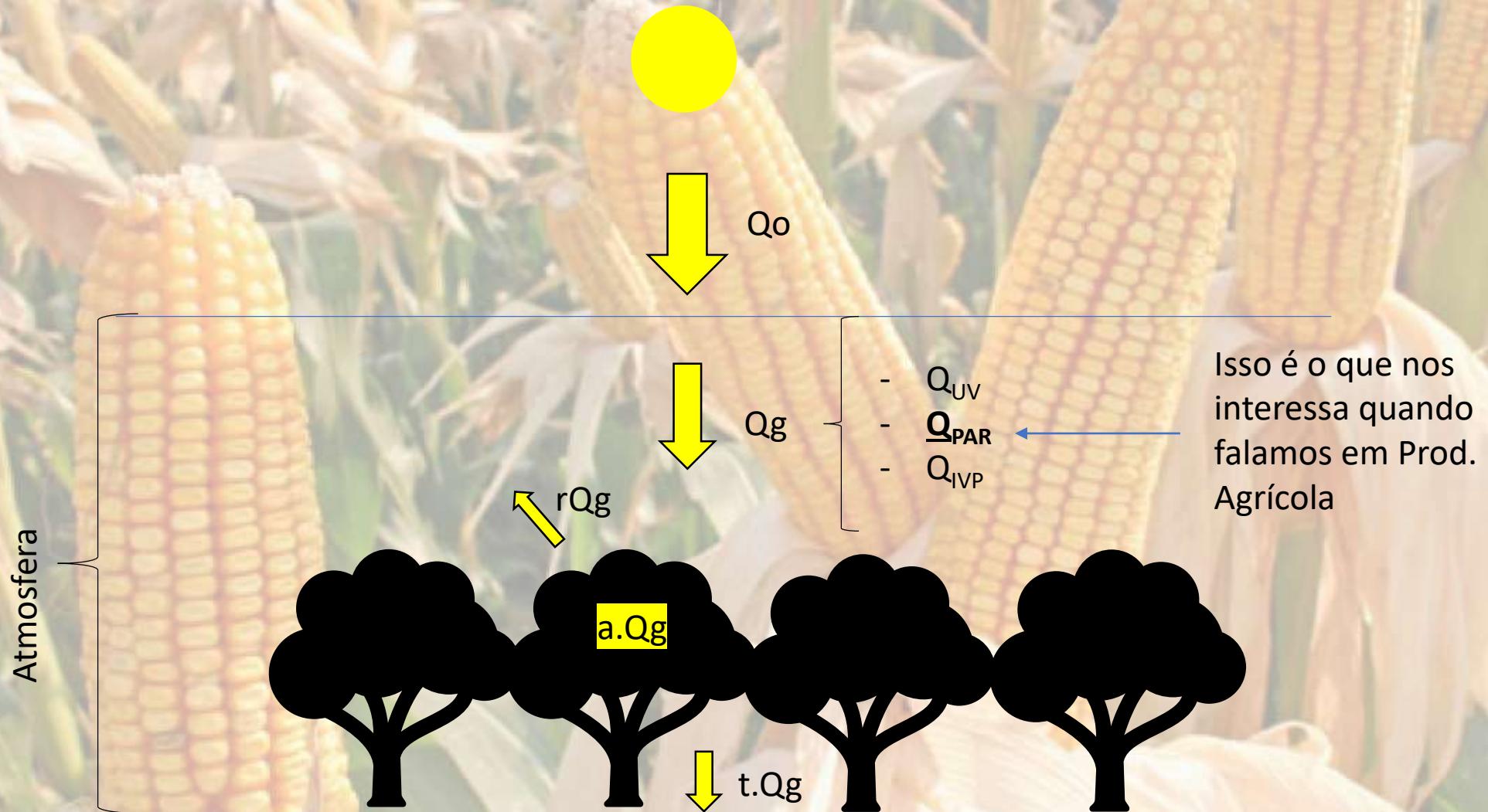
$$\text{Reflexão (r)} = I_0 (1-r)$$

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

Níveis de produção e seus respectivos fatores determinantes/limitantes

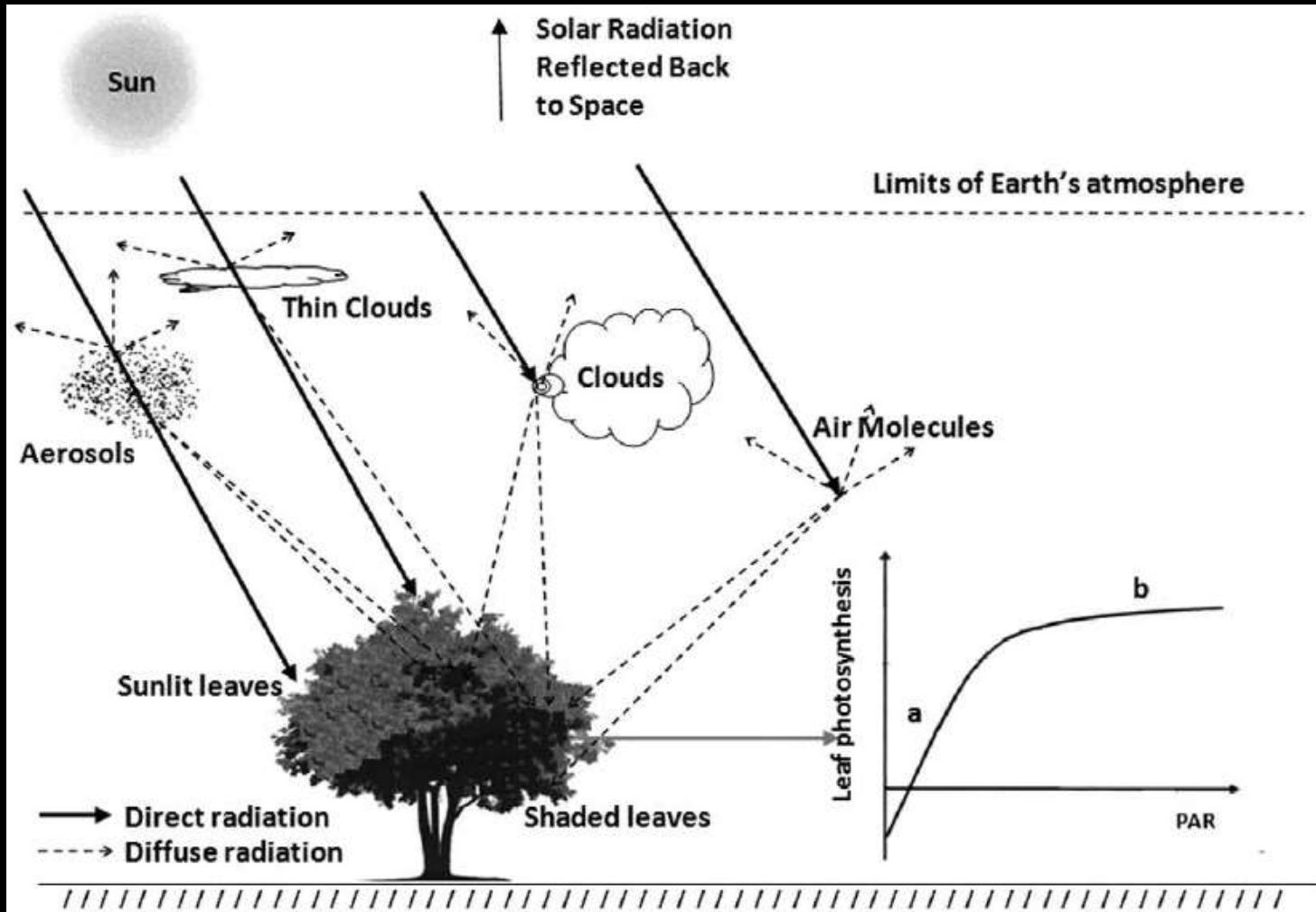


Interação Radiação - Vegetação



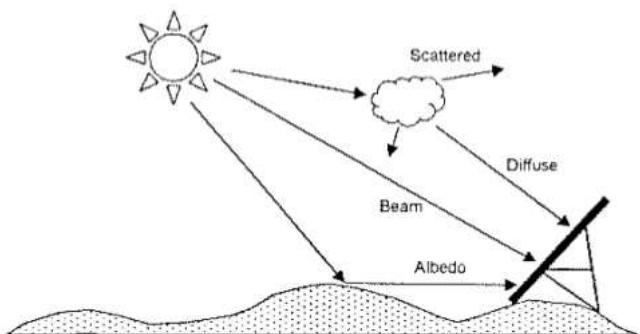
Observe agora um esquema um pouco mais detalhado...

- 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



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).

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

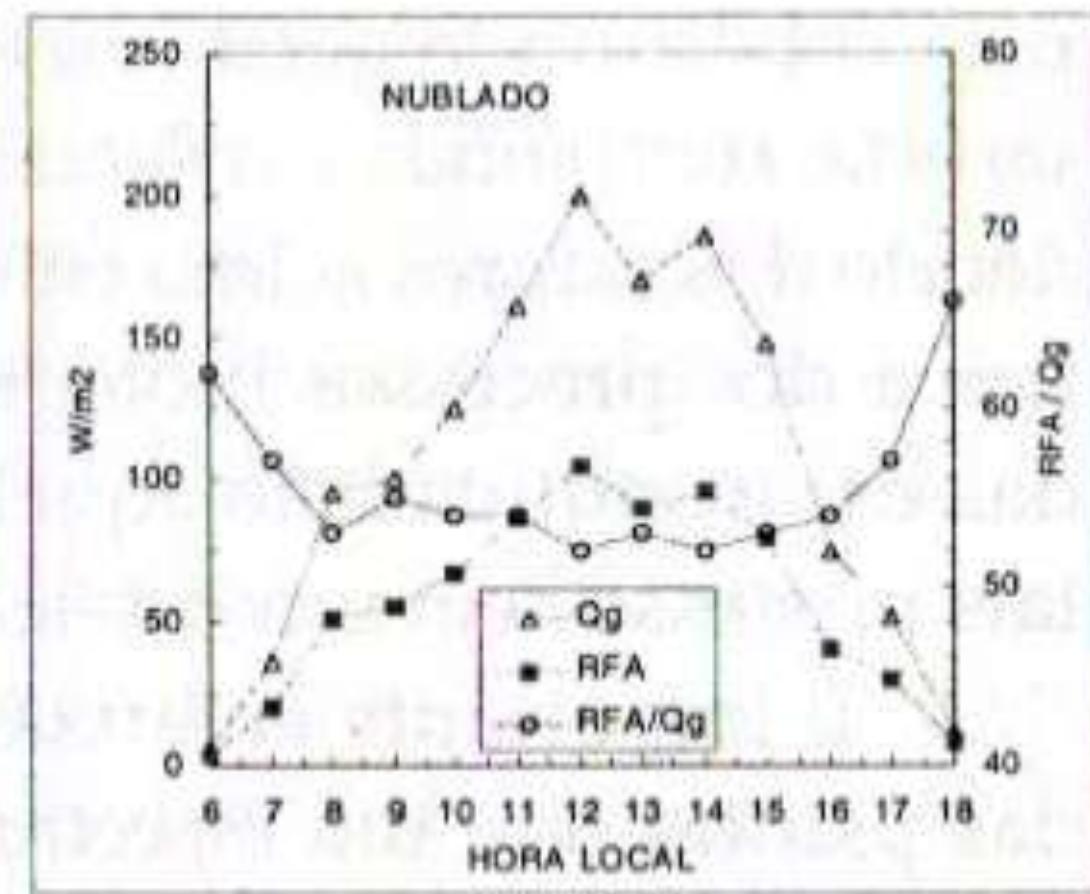
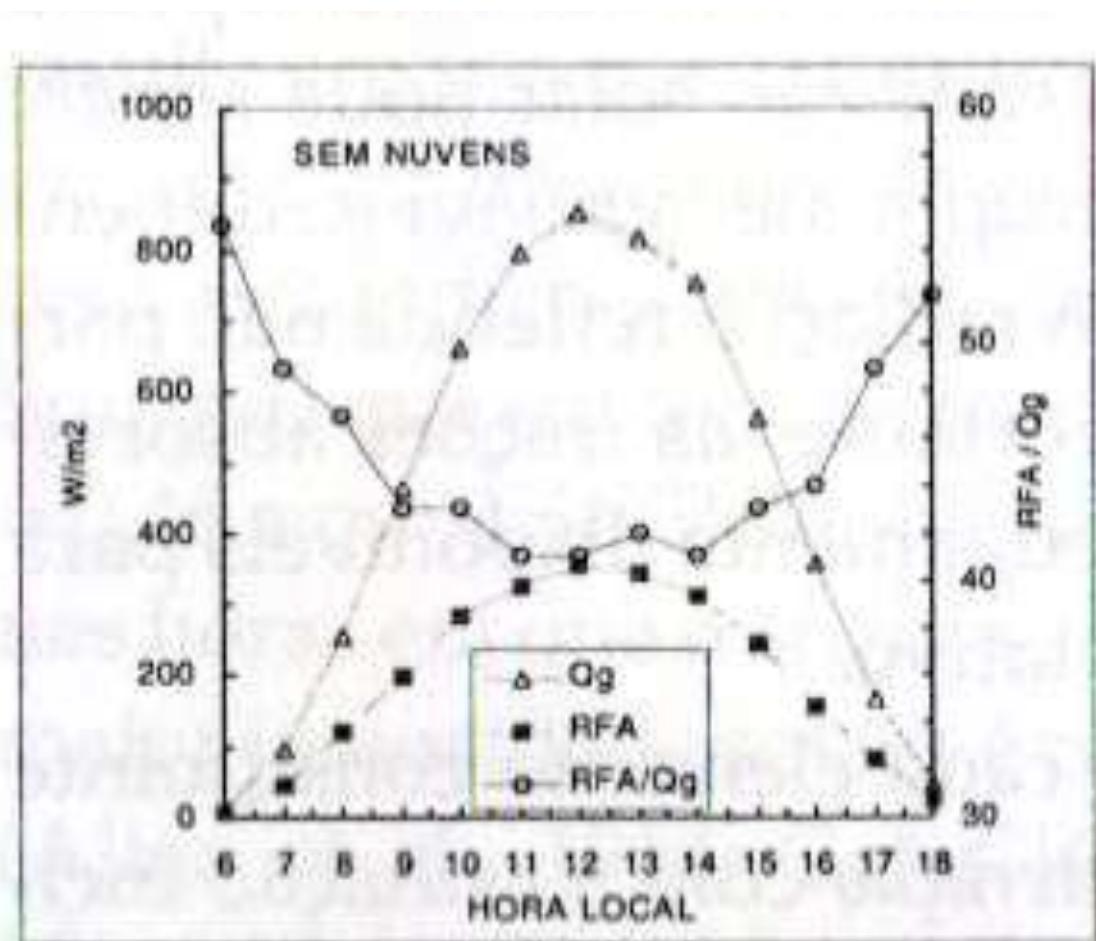
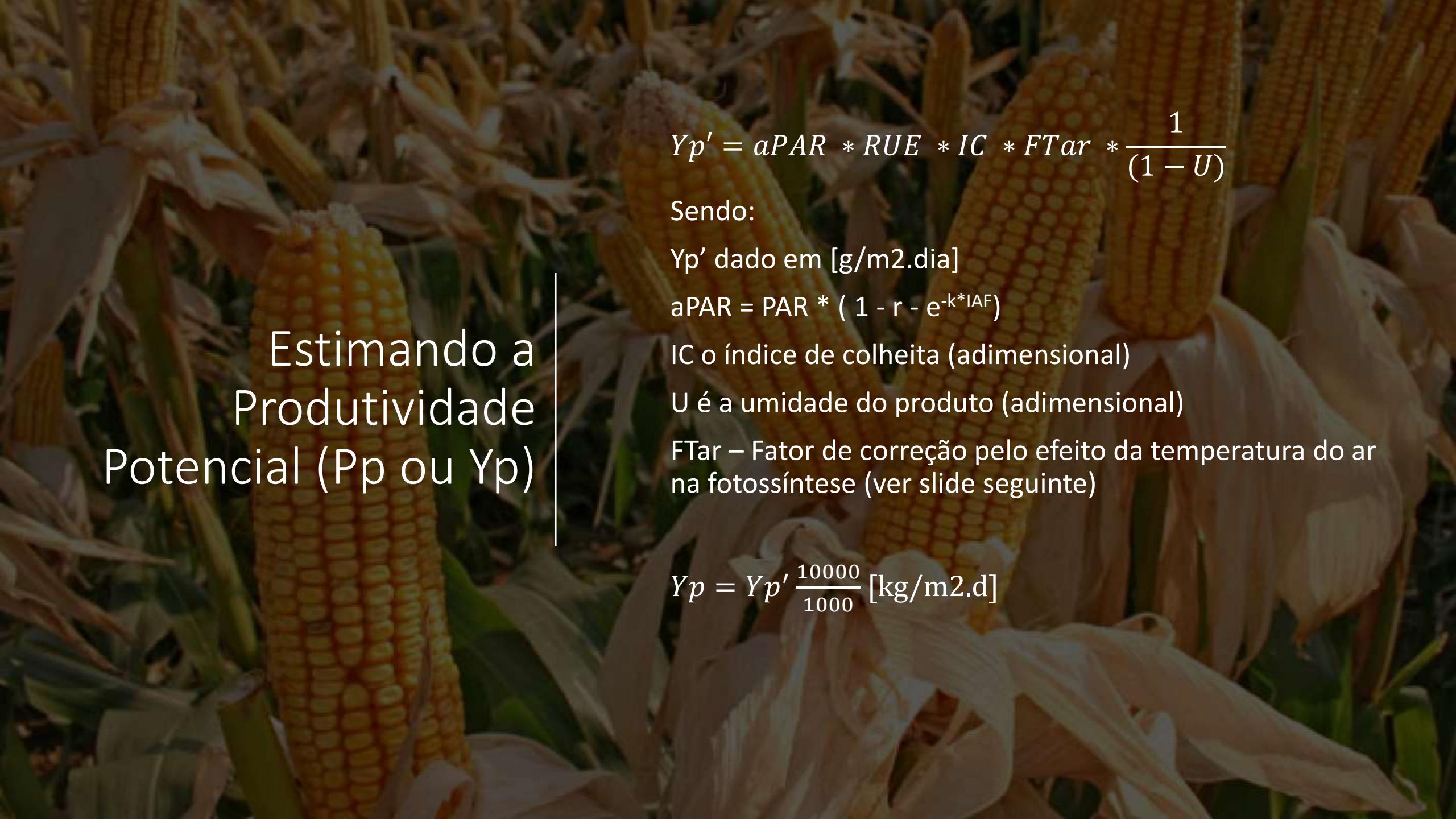


FIGURA 11.1 Variação horária da radiação solar incidente (Q_g), da RFA, e da fração RFA / Q_g , em Piracicaba, SP, para um dia sem nuvens e um nublado. Adaptado de Assunção (1994).

Dia de céu claro: PAR = 45% de Q_g (41% a 55%)

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



Estimando a Produtividade Potencial (P_p ou Y_p)

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

Sendo:

Yp' dado em [g/m².dia]

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

IC o índice de colheita (adimensional)

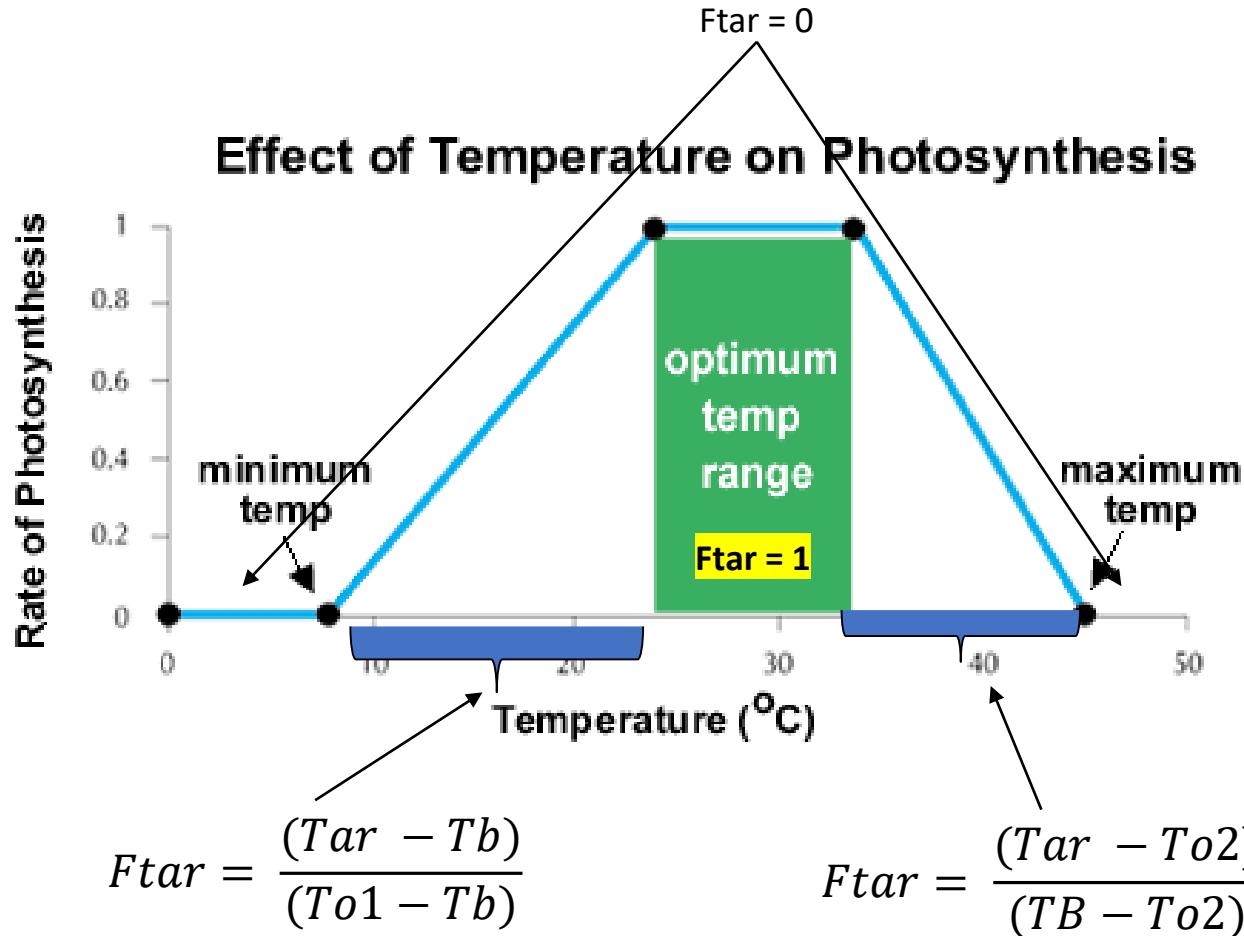
U é a umidade do produto (adimensional)

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

$$Yp = Yp' \frac{10000}{1000} [\text{kg/m}^2.\text{d}]$$

Efeito da temperatura na produção vegetal

Como representar matematicamente?



Este tema será estudado com profundidade na aula 4 e, aqui, estamos apenas introduzindo para explicar o significado de F_{tar} .