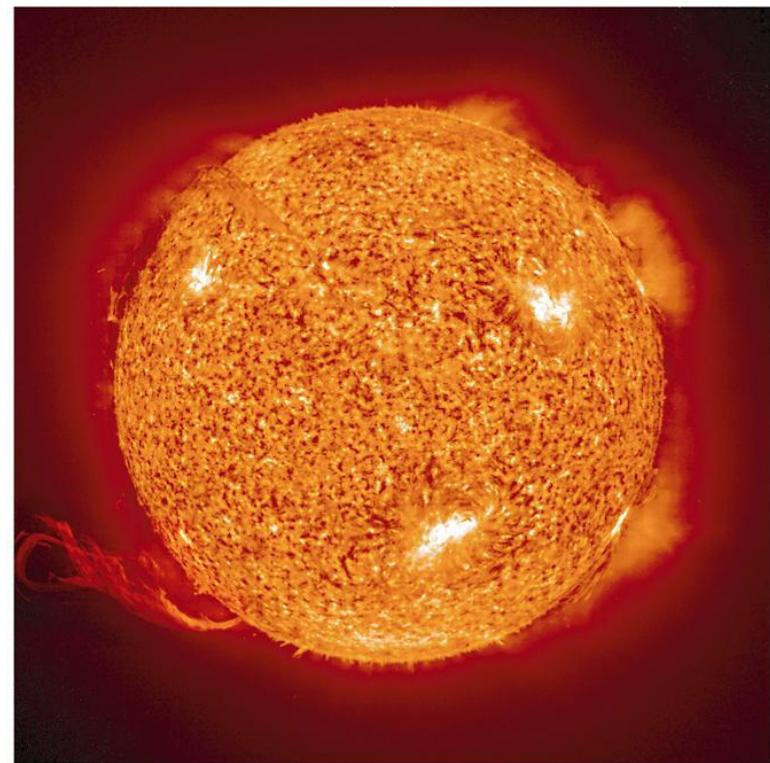




Recurso Solar



- A false color image of the sun enhances the turbulent nature of the sun's photosphere, including a roiling surface, sunspots, and giant flares.



SOHO (ESA & NASA)

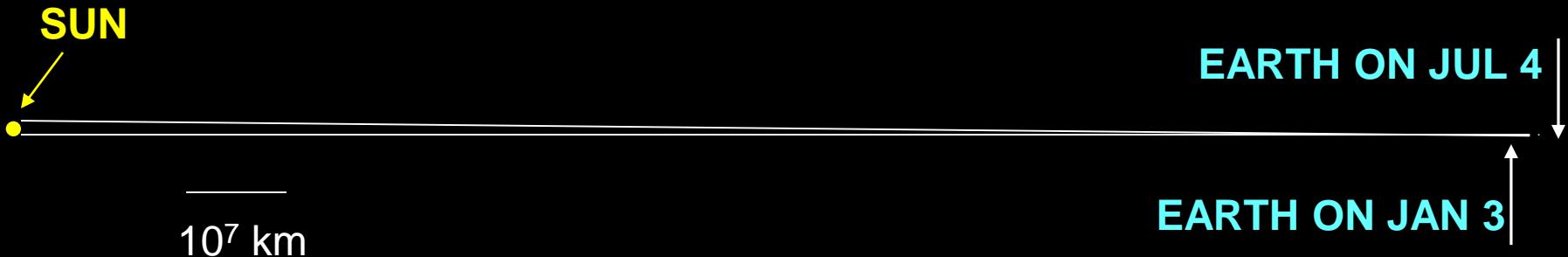
Veja mais em:

<https://super.abril.com.br/ciencia/nasa-libera-video-que-mostra-dez-anos-de-atividade-do-sol/>



Recall the Scale of Earth's Orbit and the Sun

When we zoom out to the scale of Earth's Orbit, the Sun looks like a tiny grain and Earth is 1/5th the size of the blue dot. From Earth, the Sun appears like a pea viewed from arm's length - a circle of blinding light slightly more than $\frac{1}{2}$ degree (0.53°) wide.

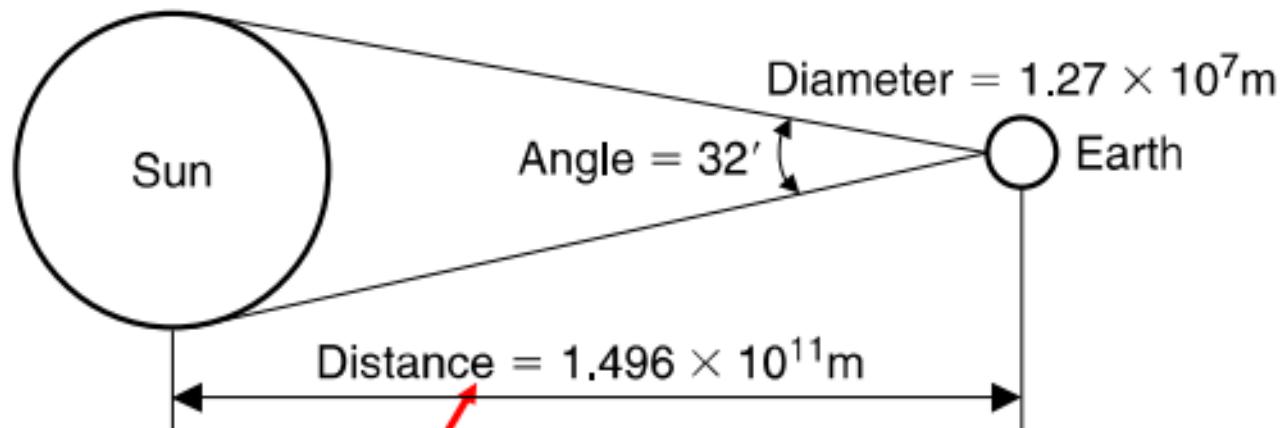


Three observations resulting from this picture have important consequences.

- 1: All points on Earth (Poles and Equator) are almost the same distance from the Sun.
- 2: Earth is closest to the Sun on January 3 and furthest from it on July 4
- 3: All sunbeams striking any part of Earth are essentially parallel.

What are the consequences?

- 1: The height of the Sun in the sky makes the Poles colder than the Equator.
- 2: The height of the Sun in the sky and the length of the day make the seasons.
- 3: This will help us understand rainbows and day and night on Earth.



Constante solar, G_{sc}

1367 W/m²
433 Btu/ft² h
4,92 MJ/m² h

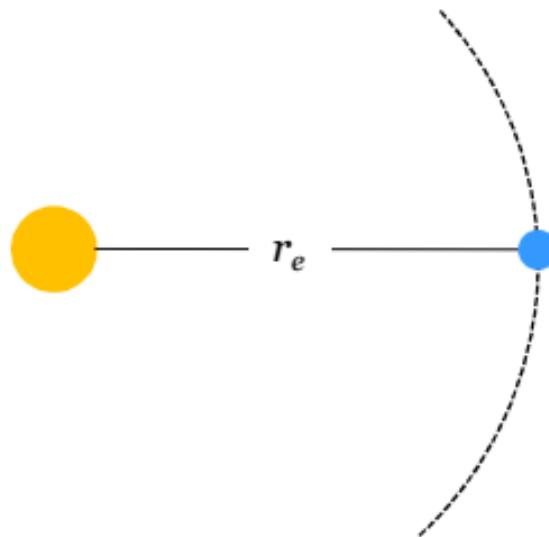
Distância média Sol-Terra = 1 UA (unidade astronômica)

A constante solar

Considerando que o raio do Sol, r_s , seja igual a $6,965 \times 10^8$ m, a potência térmica emitida pelo Sol pode ser calculada.

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda b} d\lambda = \sigma T^4 (4\pi r_s^2) = (5,6697 \times 10^{-8}) (5.777^4) \left[4\pi \cdot (6.965 \times 10^8)^2 \right] = 3,8496 \times 10^{26} W$$

A fração dessa potência recebida na superfície externa da Terra pode ser calculada em função da distância média Terra-Sol, r_e , que é igual a $1,496 \times 10^{11}$ m.



$$G_{sc} = \frac{E_b}{4\pi r_e^2} = \sigma T^4 \frac{(4\pi r_s^2)}{(4\pi r_e^2)} = \sigma T^4 \frac{r_s^2}{r_e^2} \approx 1.368 \text{ W/m}^2$$

ou seja, a energia/potência recebida em uma superfície é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a fonte emissora e a superfície receptora.

Inverse Square Law of Irradiance

Sunshine and Temperature on Earth: Distance to Sun

$$I = I_0 \left(\frac{d_0}{d} \right)^2$$

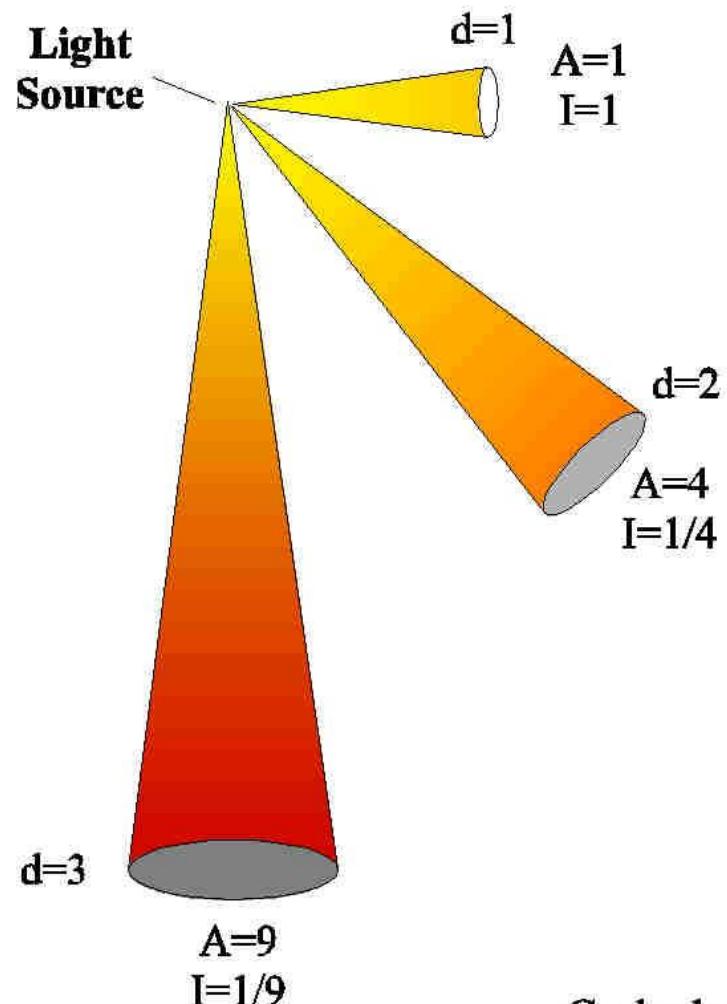
For Earth - Sun

$$d_0 = 149.5(10)^6 \text{ km} \quad I_0 = 1368 \text{ W m}^{-2}$$

Because Earth's orbit is an ellipse distance to sun varies over the year

$$d = 149.5 + 2.5 \cos(dd^\circ)$$

dd = # of days from July 4



Gedzelman
Figure 4-5

Variação da radiação extraterrestre:

Em função da variação da distância Terra-Sol, a radiação extra-terrestre incidente em um plano normal à radiação varia $\pm 3,3\%$.

Pode ser calculada como:

$$\dot{I}_{on} = \dot{I}_{sc} E_o$$

onde \dot{I}_{sc} é a constante solar (1367 W/m^2) e E_o é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, calculado como:

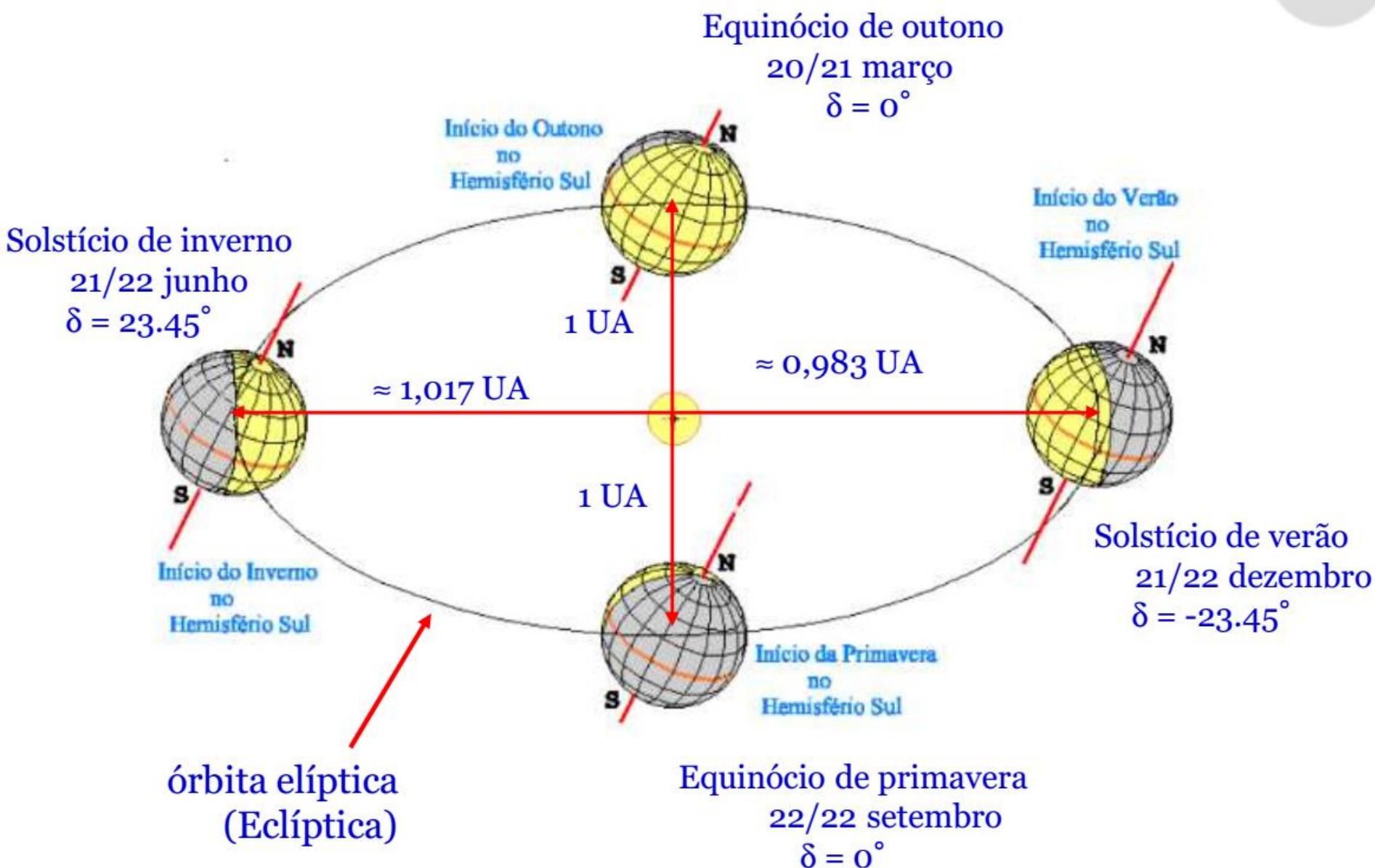
$$E_o = 1,00011 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \operatorname{sen} \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma \\ + 0,000077 \operatorname{sen} 2\Gamma$$

Nessa equação, Γ , em radianos, é calculado como:

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1)/365$$

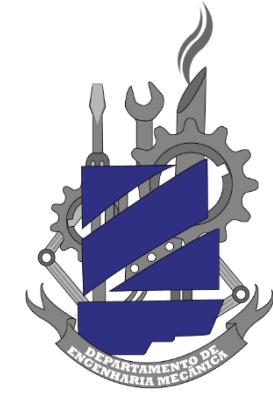
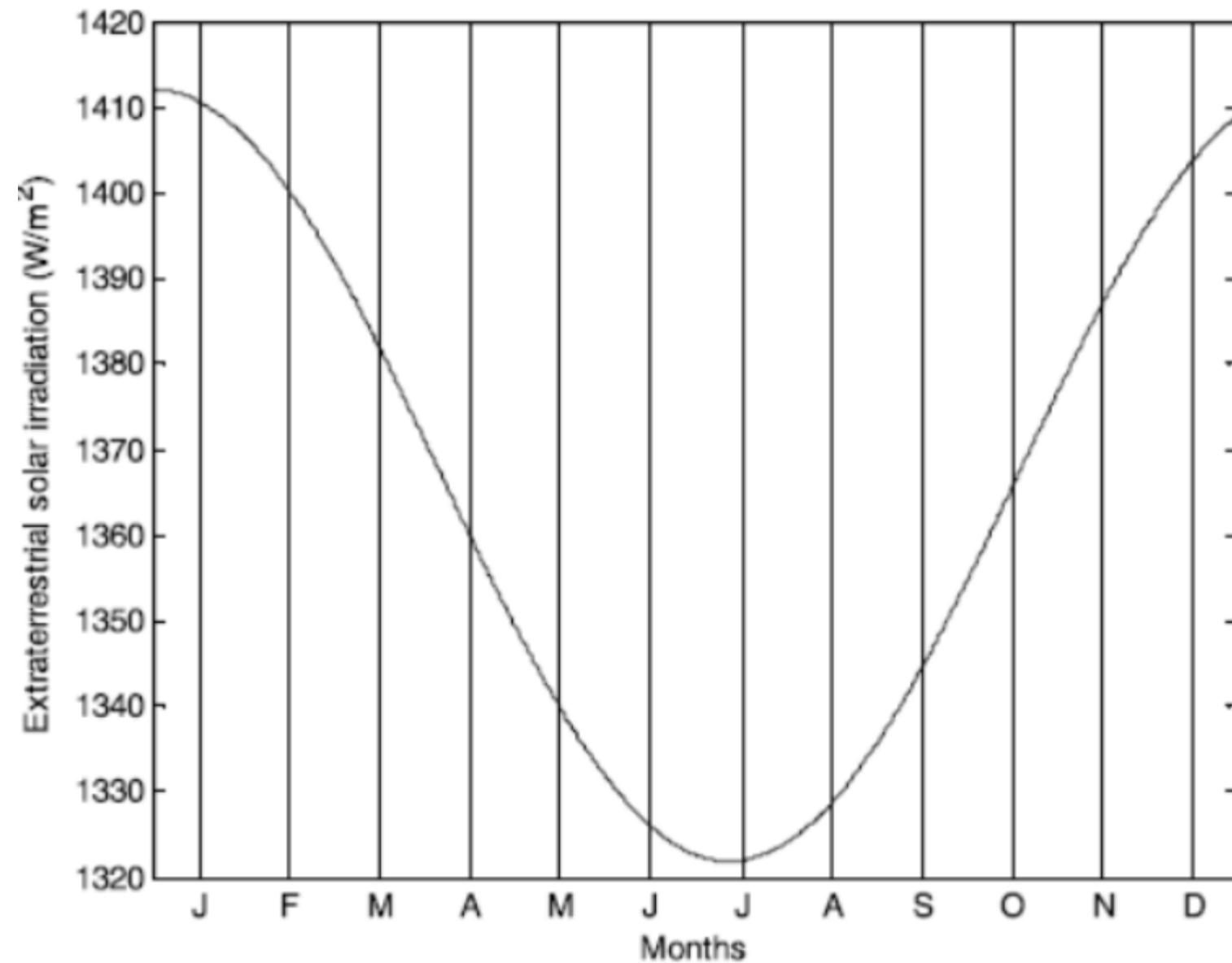
onde d_n é o dia no ano (1 em 1º de janeiro e 365 em 31 de dezembro)

A órbita terrestre:





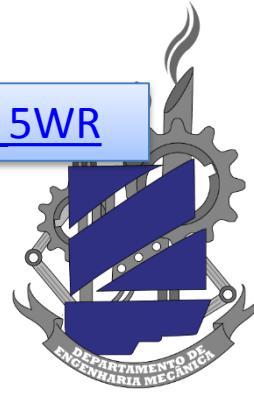
Variação do fluxo solar $f(\text{excentricidade orbital})$





- Google **Colaboratory** é um serviço de **nuvem** gratuito hospedado pelo Google que usa o **Jupyter Notebook**
- É possível instalar kernels capazes de fazer rodar no Notebook a sua linguagem linguagem de programação preferida. Eu mesmo tenho mais familiaridade com Matlab/Octave, por isso já coloquei no código como usá-lo, mas outras linguagens são possíveis.
- Link da Primeira Aula de M&S:

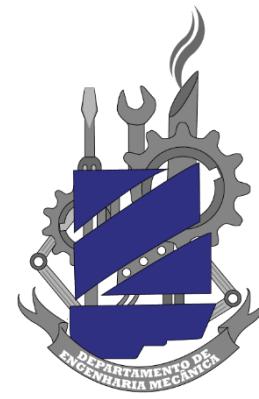
https://colab.research.google.com/drive/184cPrwo_OvFtdVZVyXtQRKfansm3_5WR





- Aprendendo mais:

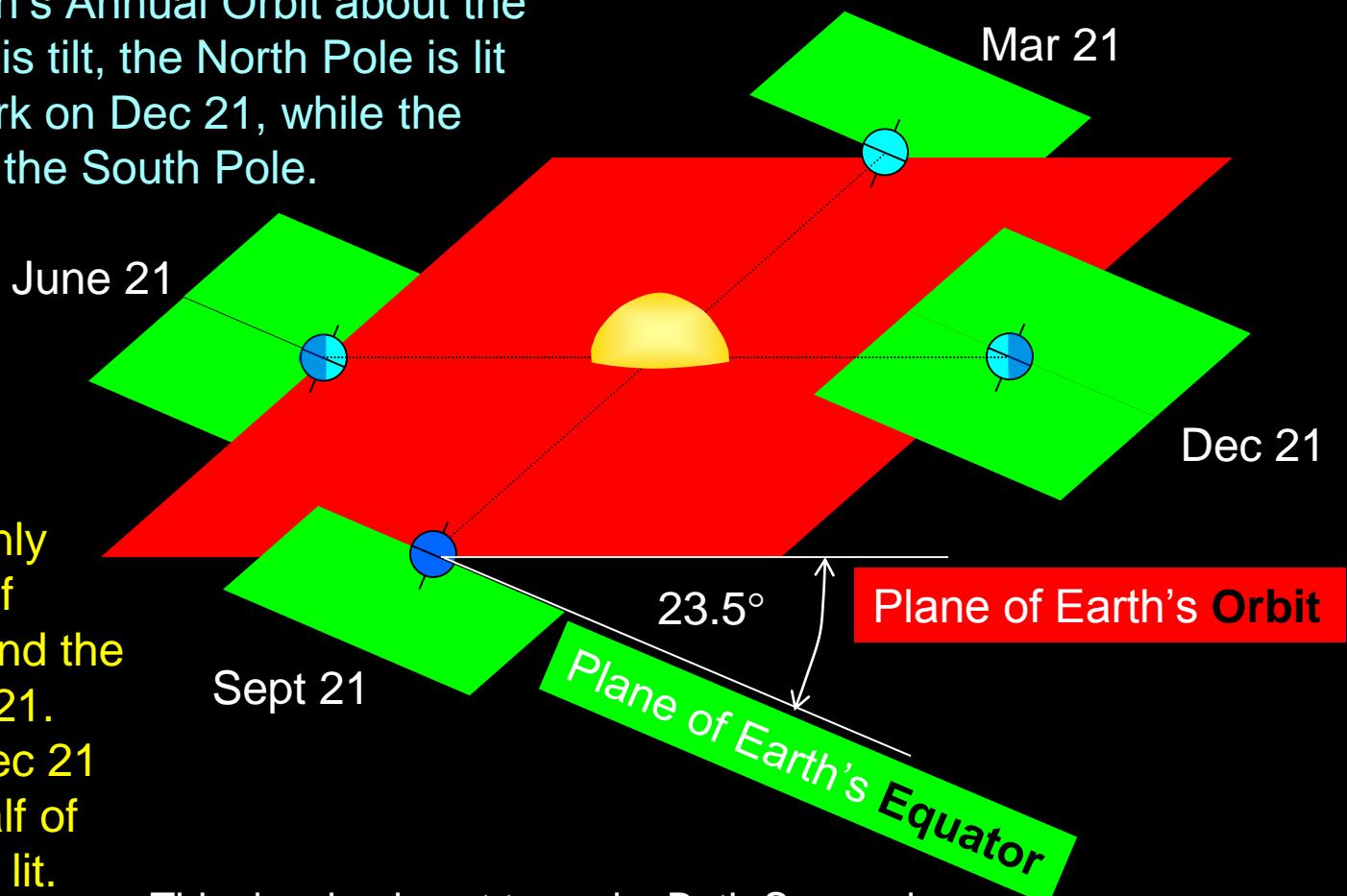
- <https://colab.research.google.com/github/fschuch/Python-Transferencia-de-Calor/blob/master/aula.ipynb>
- https://github.com/fschuch/aprenda.py/tree/master/_notebooks



Tilt of Earth's Orbit with Respect to Earth's Equator: Obliquity of the Ecliptic

The plane that slices through Earth's Equator is tilted at a 23.5° angle from the plane that slices through Earth's Annual Orbit about the Sun. Because of this tilt, the North Pole is lit on June 21 and dark on Dec 21, while the opposite is true for the South Pole.

This tilt is responsible for the seasons and possibly for life on Earth as well.



This drawing is not to scale: Both Sun and Earth are too large compared to the orbit.

Sunshine and Temperature on Earth: Zenith Angle

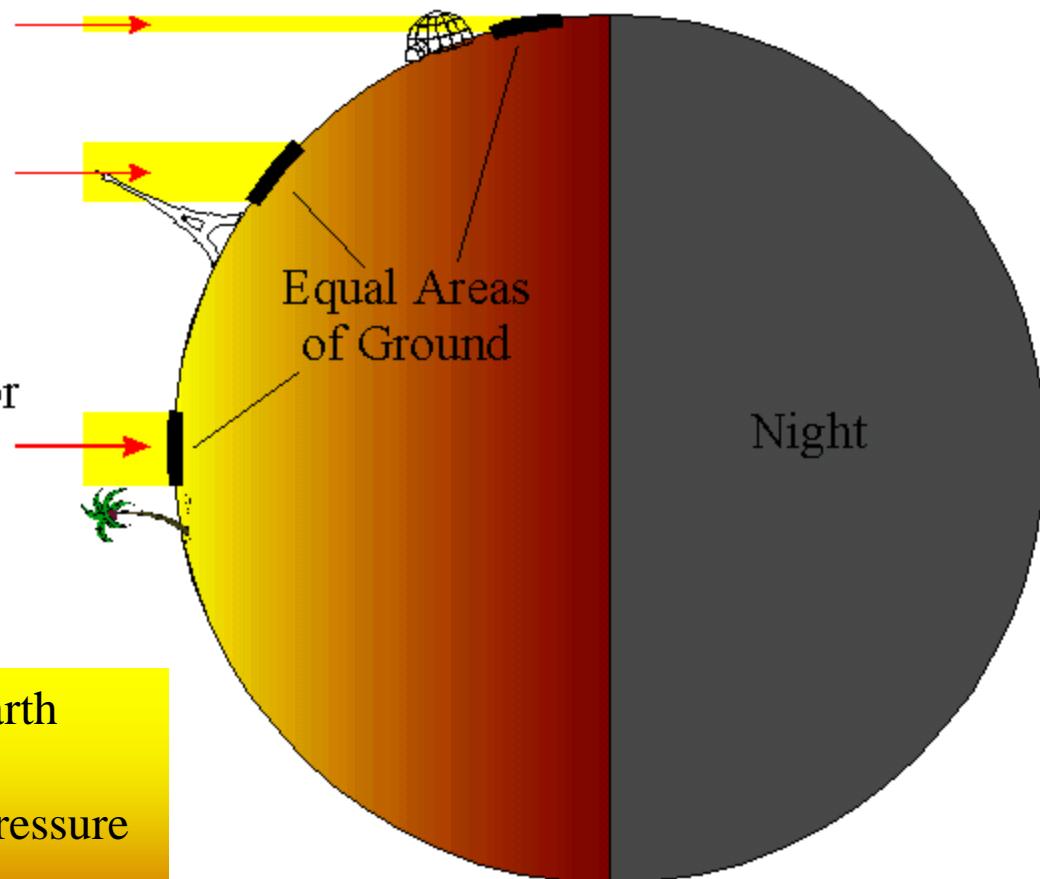
Sun Low Near Poles

Narrow Beam
Little Heating

Sun High Near Equator

Wide Beam
Intense Heating

Width of Sunbeam striking a
specified area of ground



Sunlight varies over the Earth
producing variations of
temperature, density and pressure

Cosine Law of Sunshine Intensity

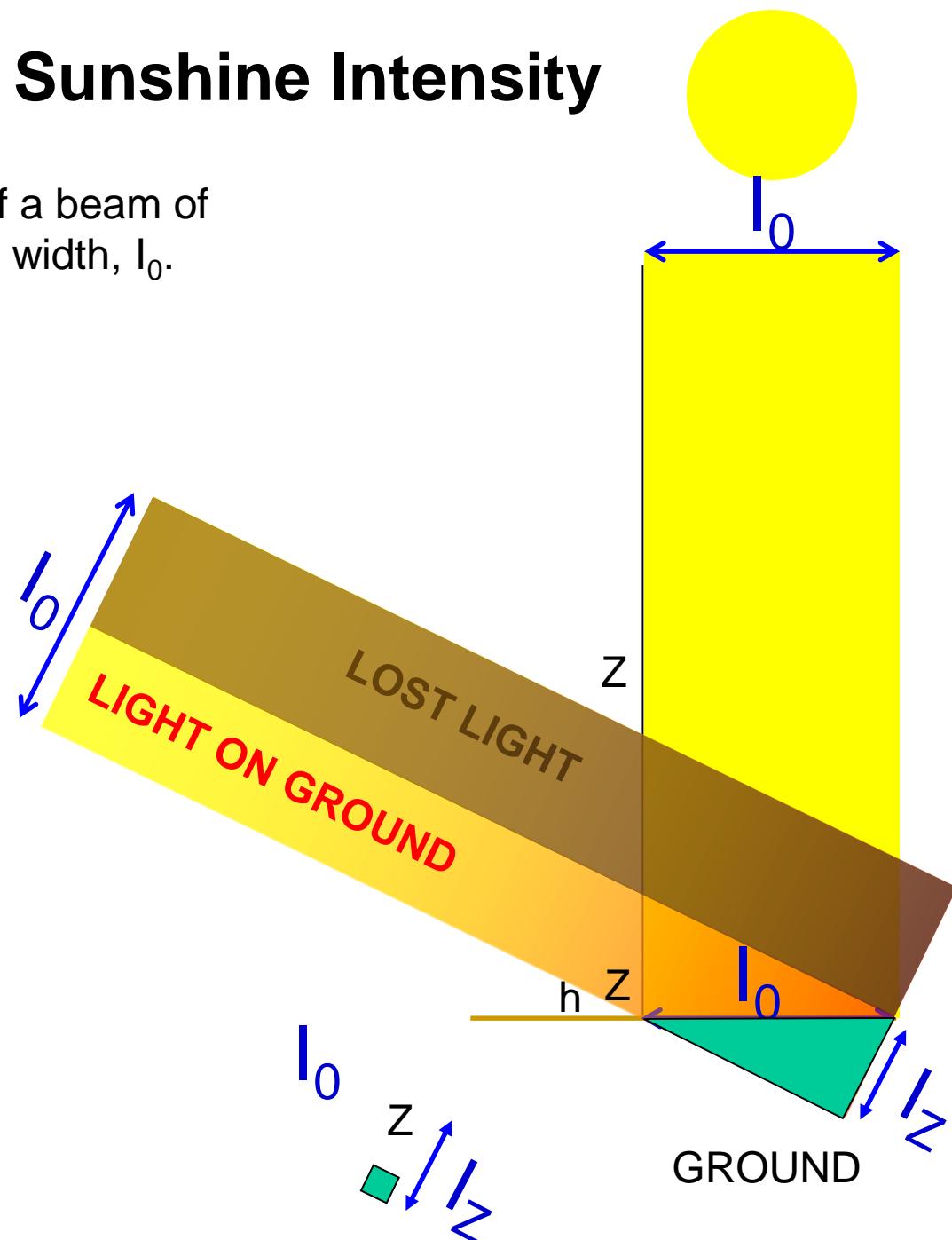
When the Sun is overhead, 100% of a beam of width, I_0 strikes a piece of ground of width, I_0 .

As the Sun goes down and Zenith Angle, Z increases, progressively less of the sunbeam of width I_0 , strikes the piece of ground. More of the sunbeam misses that piece of ground and is lost.

The fraction of the sunbeam that strikes the ground = I_Z/I_0 , which trigonometry shows is equal to $\cos(Z)$. Hence the Cosine Law

$$I_Z = I_0 \times \cos(Z)$$

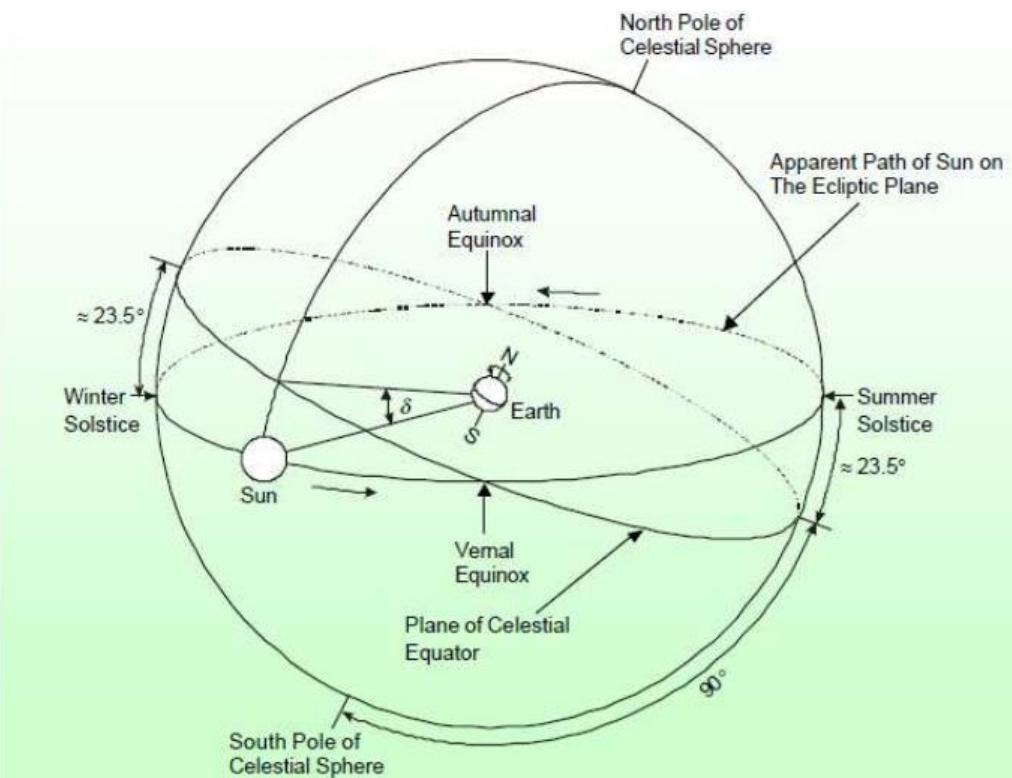
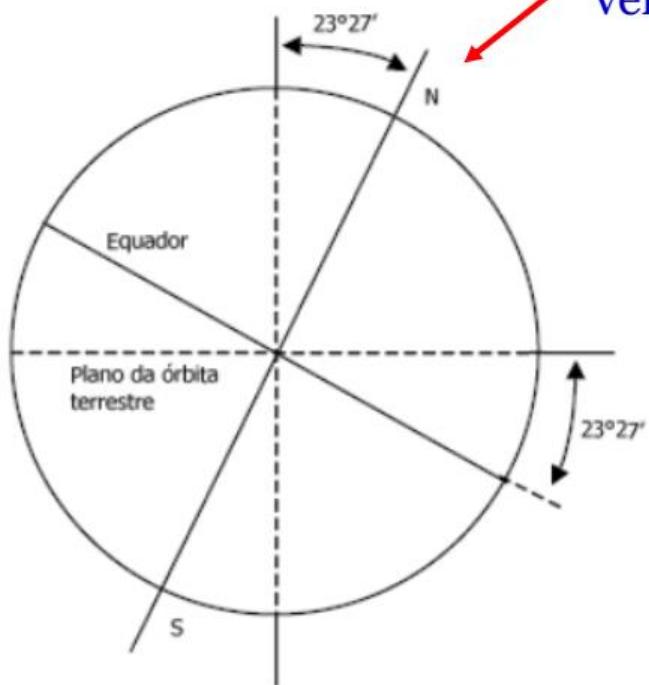
COSINE LAW



A declinação terrestre:

Ângulo formado entre o plano equatorial e a linha que une os centros da Terra e do Sol, ao meio dia.

Norte celeste ou
polo norte
verdadeiro



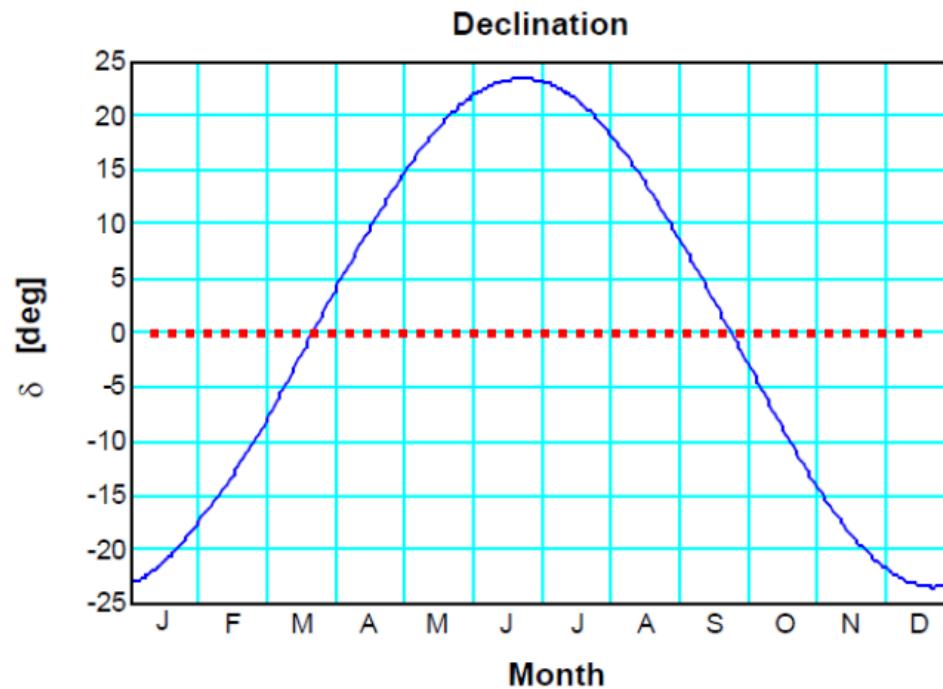
A declinação terrestre:



Esse ângulo pode ser calculado pela equação:

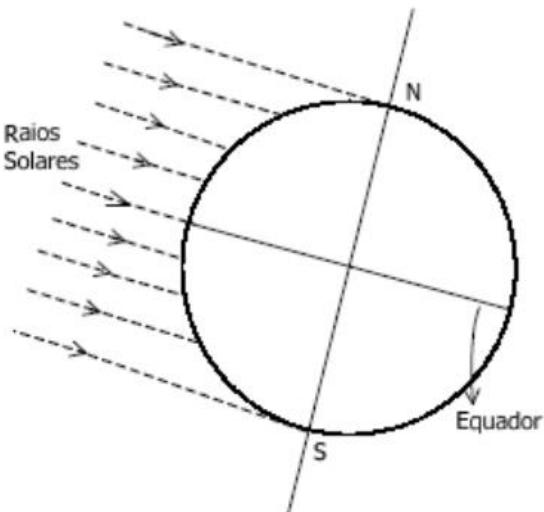
$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \operatorname{sen} \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma \\ + 0,000907 \operatorname{sen} 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \operatorname{sen} 3\Gamma$$

A variação máxima da declinação durante um dia (24 h) acontece nos equinócios e é menor que $0,5^\circ$ → considerando-se constante, nesse caso.



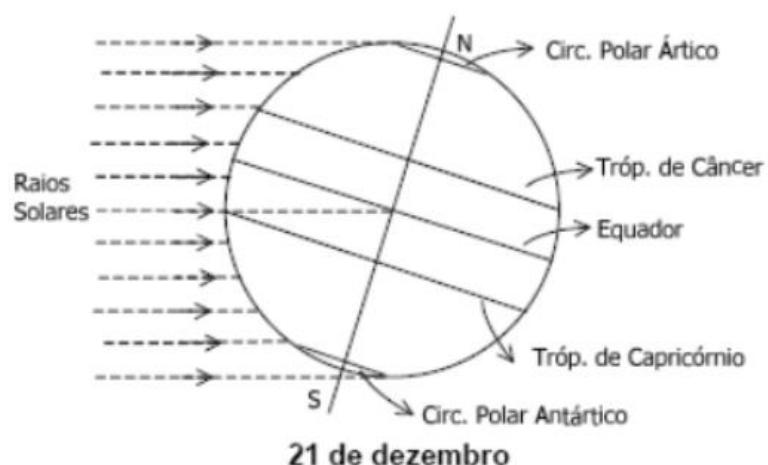
A declinação terrestre:

Nos equinócios:

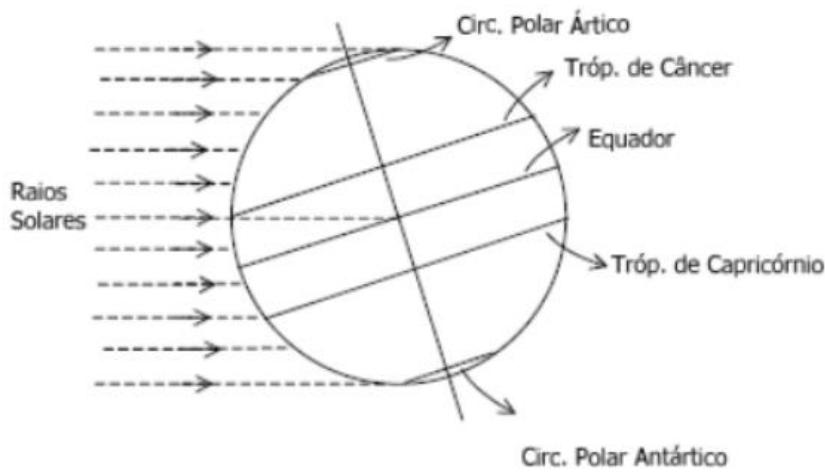


21 de março e 23 de setembro

Nos solstícios:



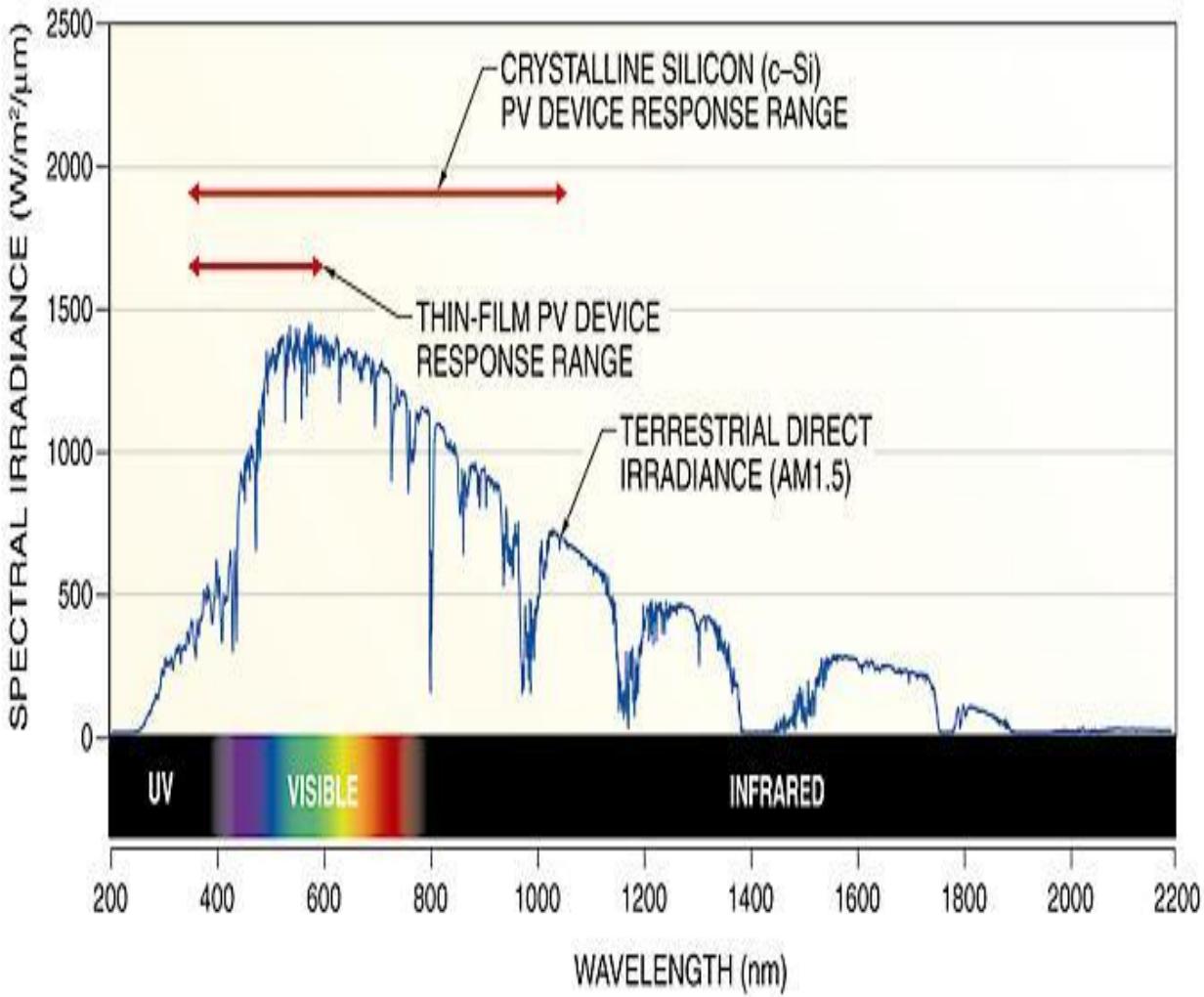
21 de dezembro



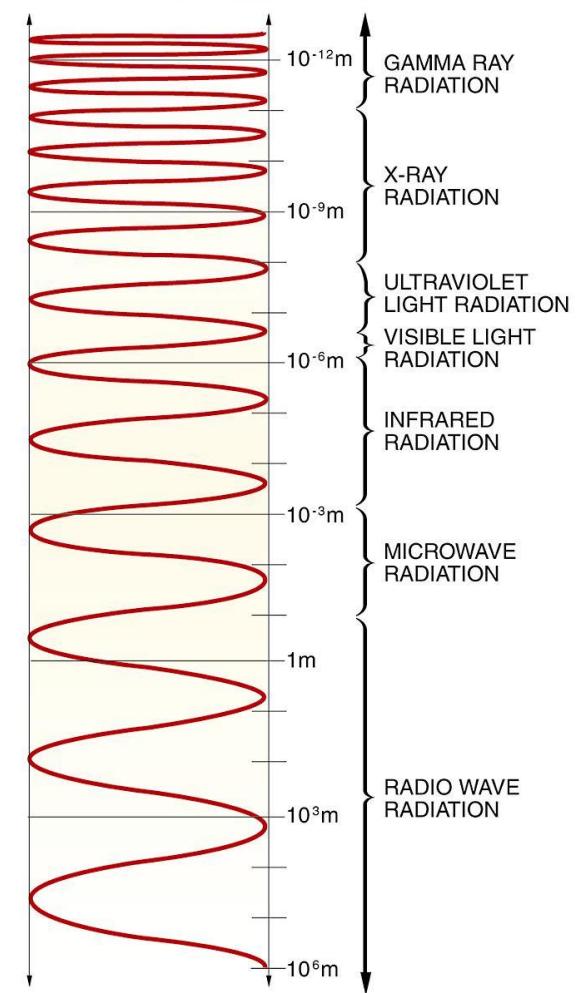
21 de junho



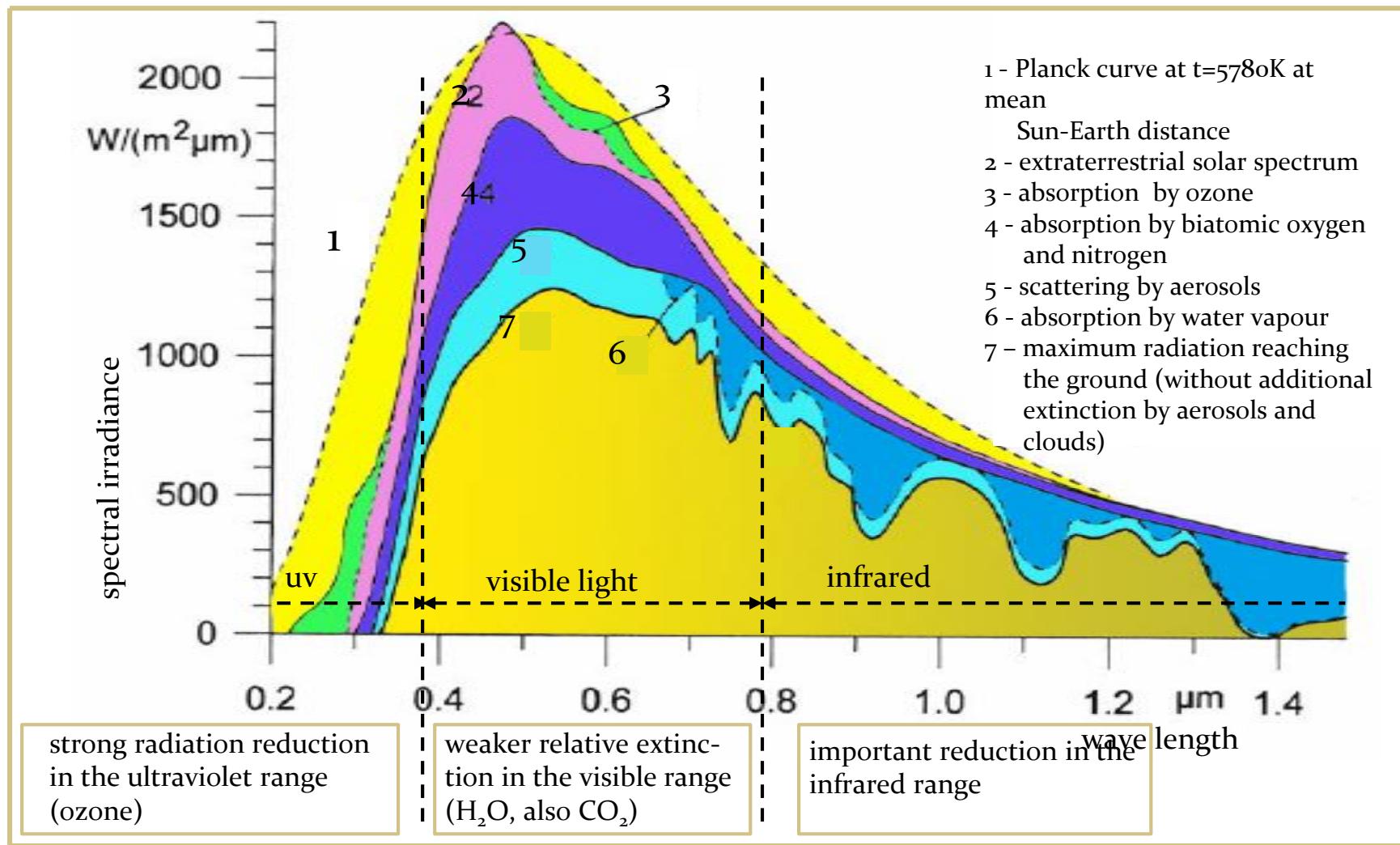
Spectral PV Device Response



Electromagnetic Spectrum



Spectrum of the solar radiation reaching the ground



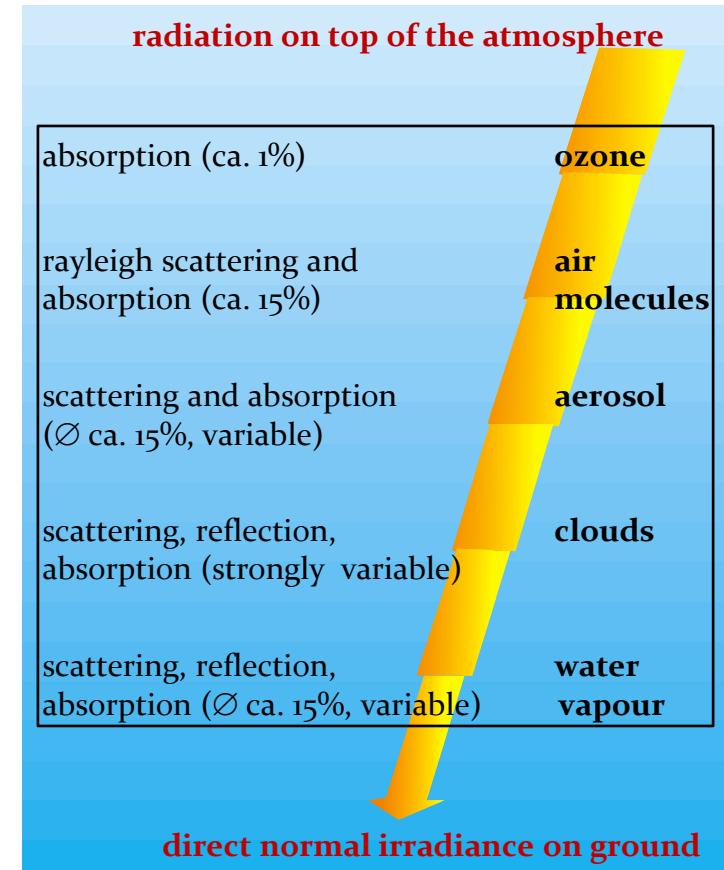
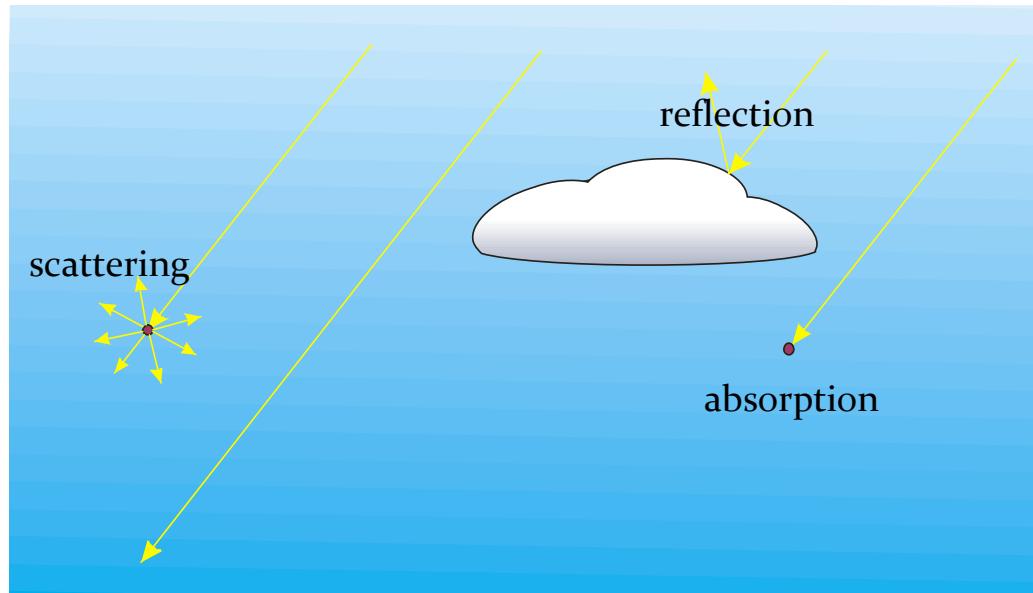
A extinção da radiação solar

Na absorção a energia de um fóton é retida pela matéria enquanto que na dispersão a radiação é desviada do processo de propagação em linha reta.

Assim, absorção atmosférica é um processo de extinção da radiação que reduz a disponibilidade da energia solar na superfície da Terra de maneira considerável. Exemplo:

- ❖ Ozônio (O_3) presente na alta atmosfera absorve quase que completamente a radiação de onda curta em comprimentos de onda menores que 290 nm.
- ❖ Vapor de água absorve fortemente a parte da radiação no espectro do infravermelho, com bandas de absorção em 1, 1,4 e 1,8 μm .
- ❖ Dióxido de carbono (CO_2) também absorve fortemente a radiação no infravermelho. Devido a esses dois gases, a transmissão de radiação acima de 2,5 μm é muito baixa.
- ❖ Também são absorvedores da radiação o oxigênio e o nitrogênio, em uma grande faxia de comprimentos de onda.

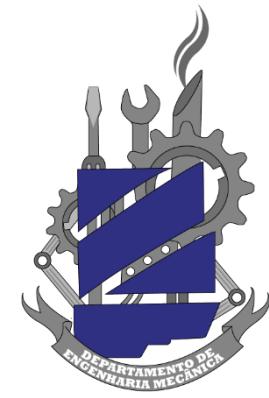
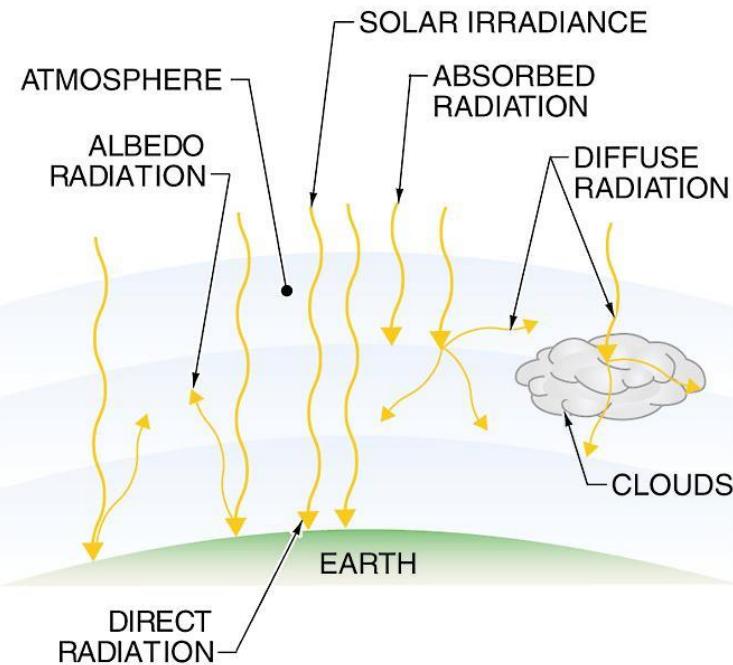
Radiation extinction processes in the atmosphere





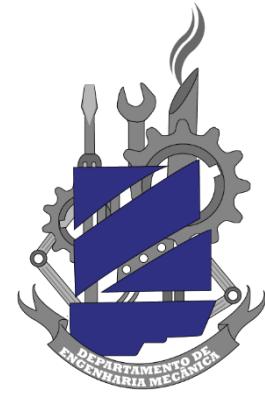
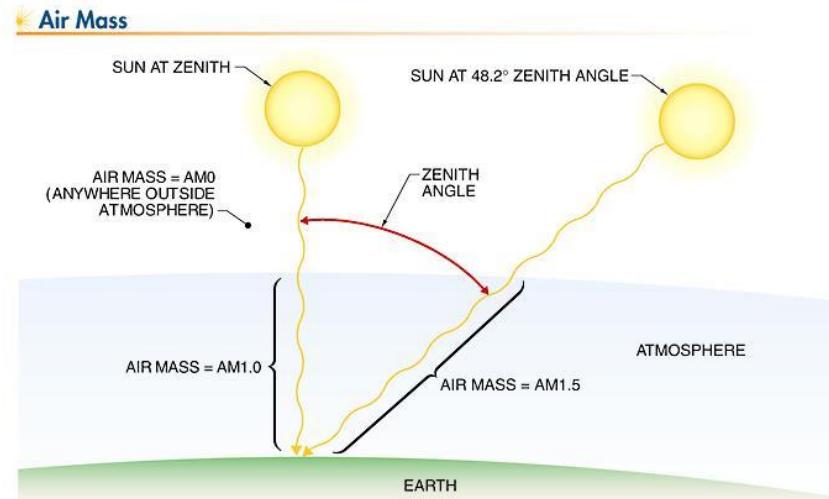
- Solar radiation entering Earth's atmosphere becomes direct, diffuse, or albedo radiation.

Atmospheric Effects





- Air mass is a representation of the amount of atmosphere radiation that must pass through to reach Earth's surface.



Tempo solar verdadeiro:

O tempo solar verdadeiro (ou hora solar) é o tempo especificado em todas as relações envolvendo a posição do Sol em um determinado momento. Está baseado no movimento angular aparente do Sol através do céu, onde o meio dia solar é a hora em que o Sol cruza o meridiano do observador.

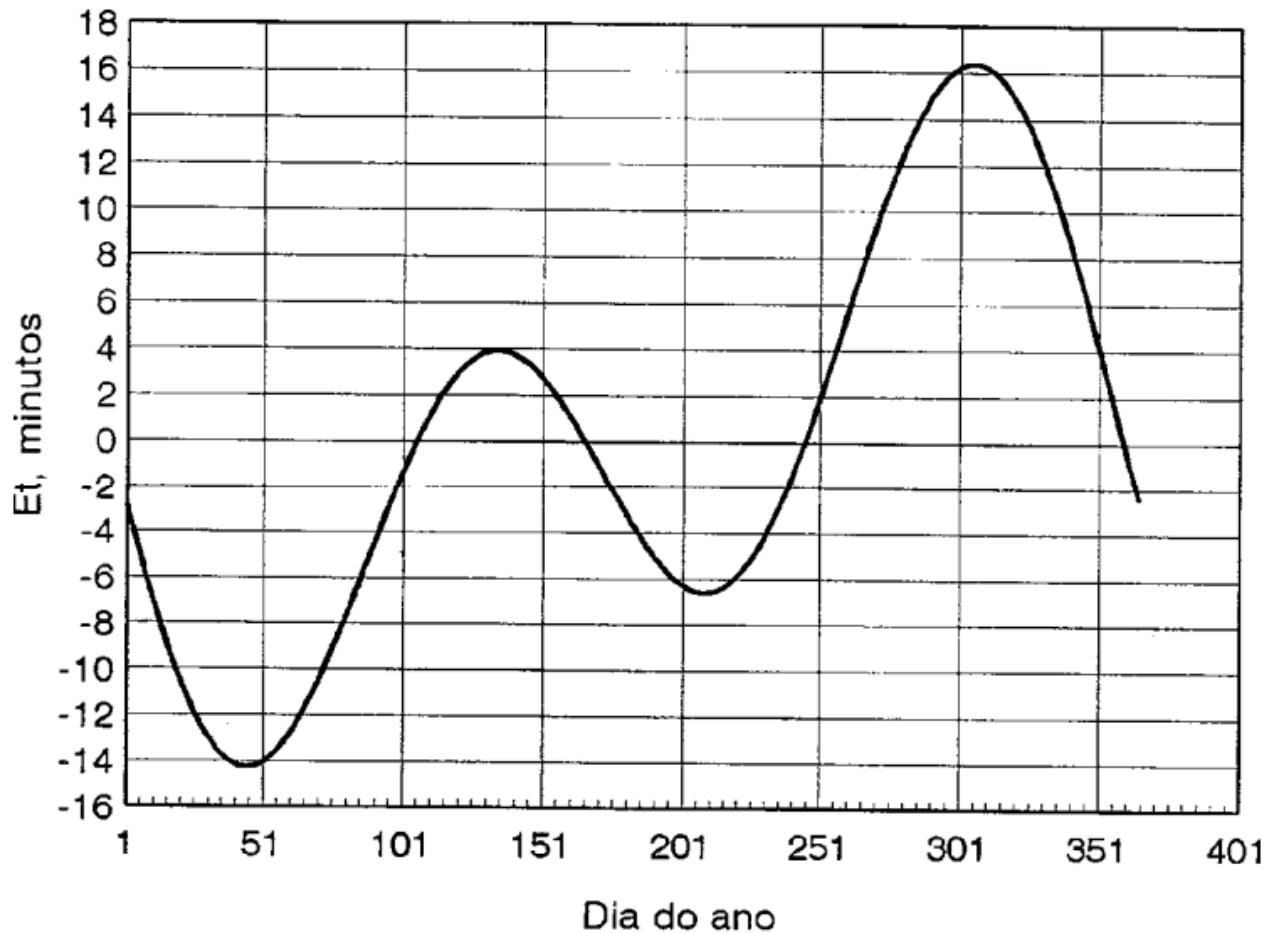
$$TSV = \underbrace{TO}_{hora} + \underbrace{4(L_{st} - L_{loc})}_{min} + \underbrace{E_t}_{min}$$

onde TO é a hora oficial, L_{st} a longitude do fuso horário, L_{loc} é a longitude do local e E_t é a equação do tempo. A equação do tempo é calculada por:

$$E_t = (0,000075 + 0,001868\cos\Gamma - 0,032077\sin\Gamma - 0,014615\cos 2\Gamma - 0,04089\sin 2\Gamma)(229,18)$$

A equação do tempo considera a perturbação na taxa de rotação da Terra, a qual afeta o tempo que o Sol cruza o meridiano do observador. O último termo da direita na equação é a conversão para minutos.

Variação anual da equação do tempo:



Duração do dia:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$$

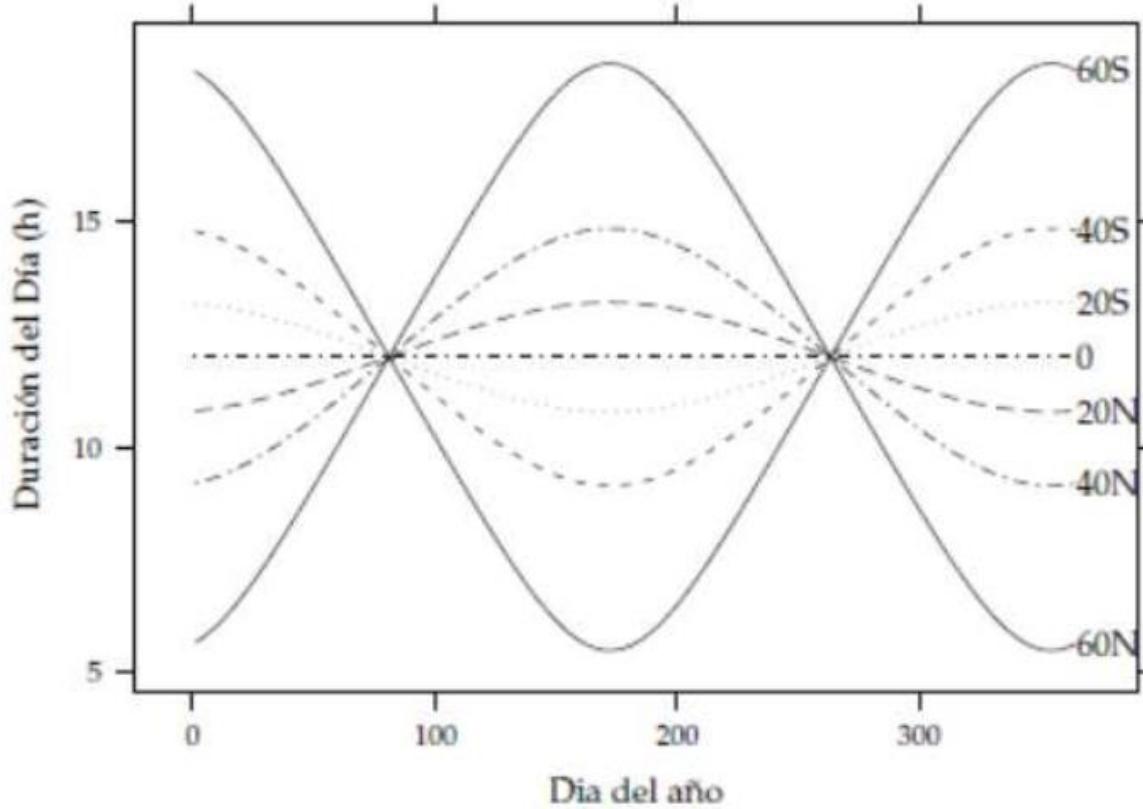
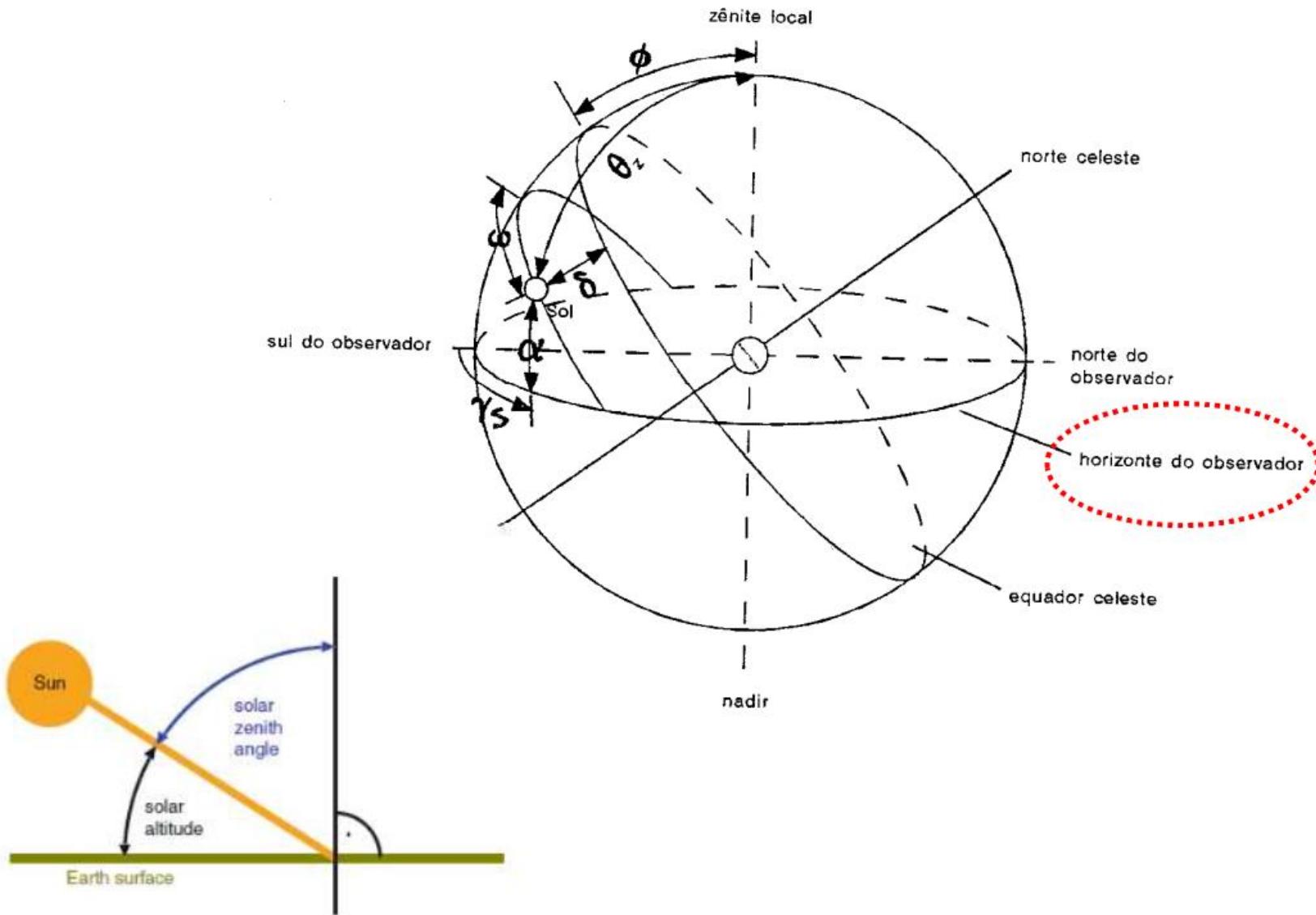


FIGURA 2.10: Duración del día en diferentes latitudes.

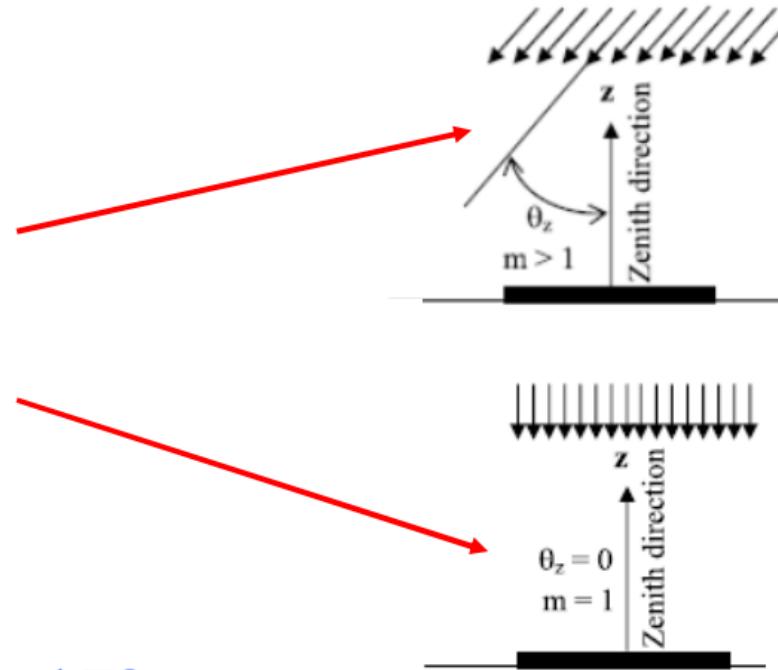
Geometria Terra-Sol:



Massa de ar:

Massa de ar (m): relação entre a massa de atmosfera através d radiação direta cruza e aquela que cruzaria se o sol se encontrasse zênite, isto é:

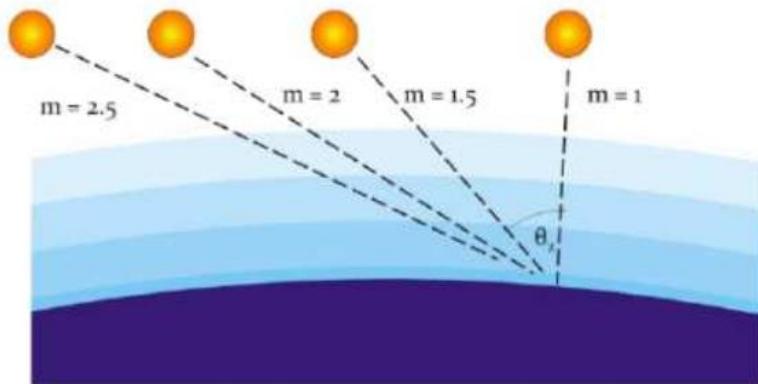
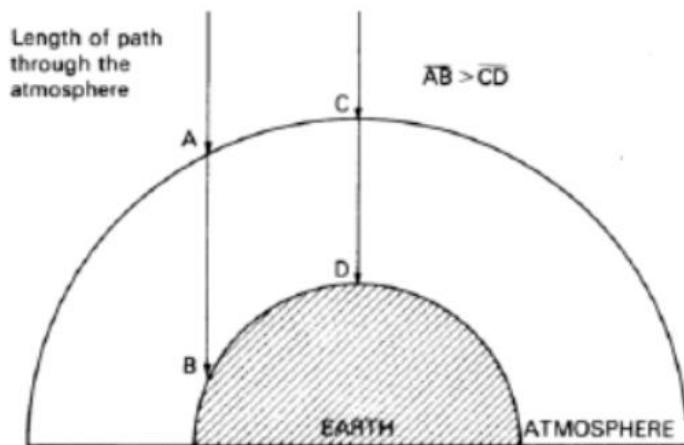
$$m = \frac{\int_0^{\infty} \rho(d) dd}{\int_0^{\infty} \rho(z) dz}$$



**Para ângulos de zênite < 70°
uma boa aproximação é:**

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

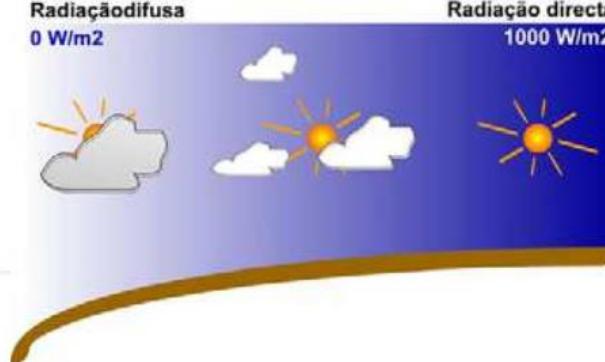
Massa de ar:



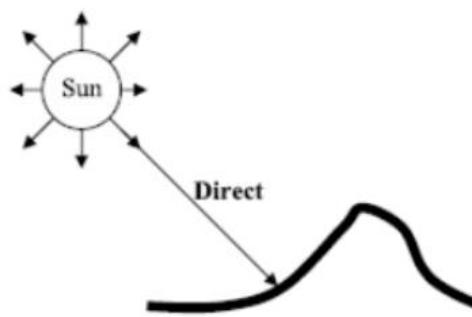
$$m = \frac{\exp(-0,0001184h)}{\cos \theta_z + 0,5057(96,080 - \theta_z)^{-1,634}}$$

Equação empírica (Kasten e Young – 1989) considerando que a atmosfera não é plana. Nessa equação, h é a altitude do local, em m.

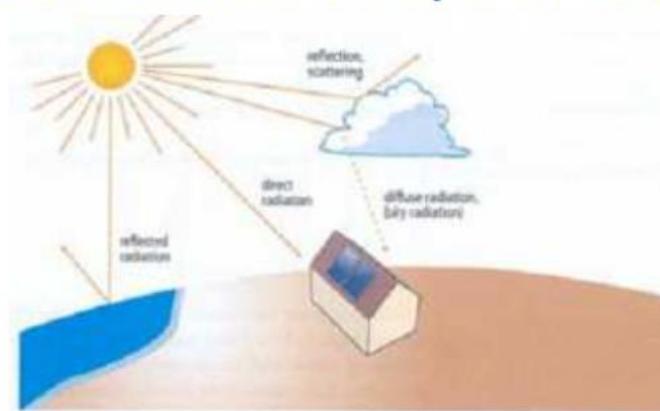
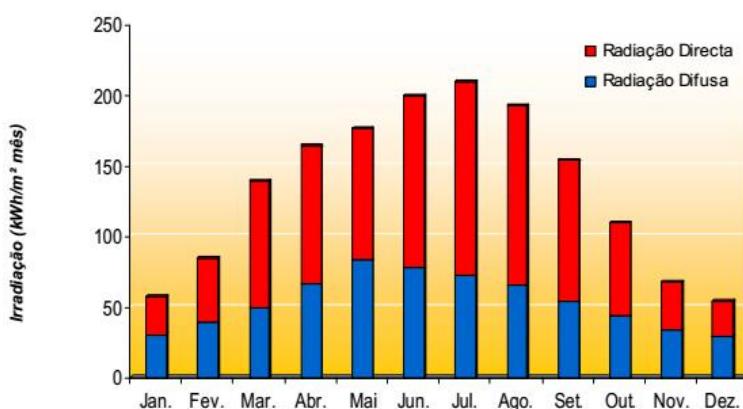
Definições:

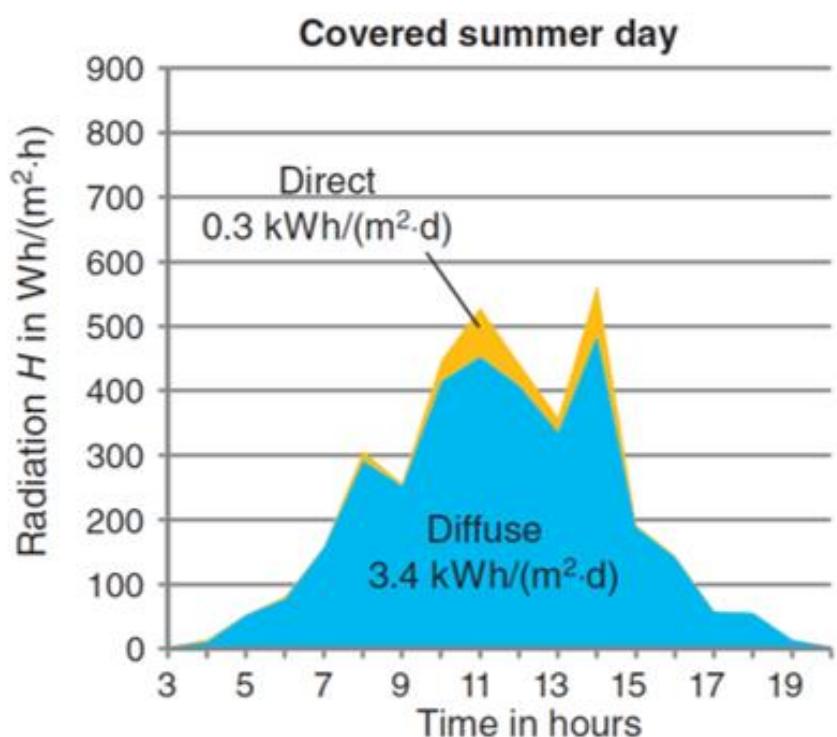
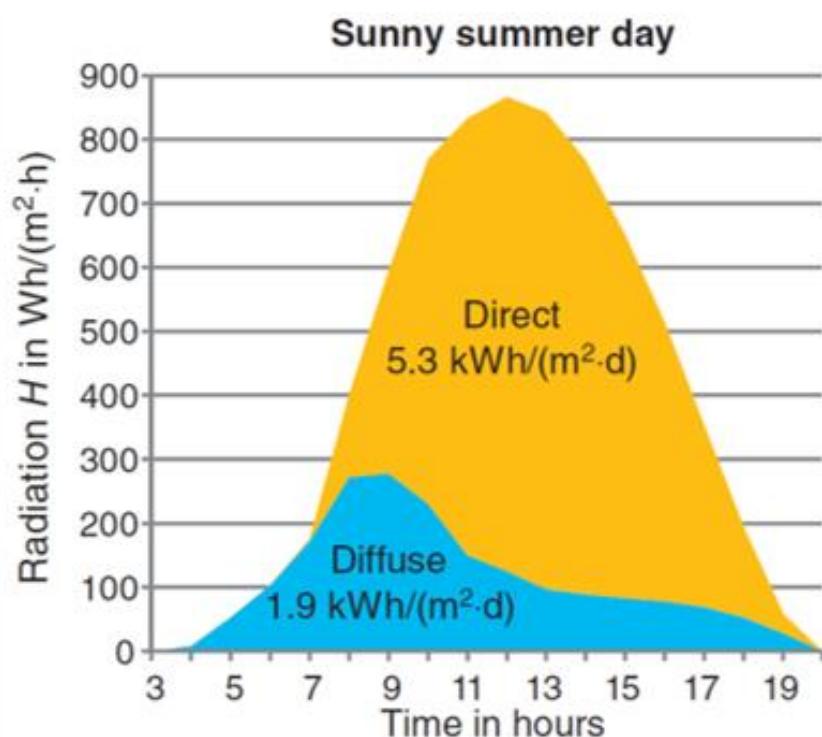
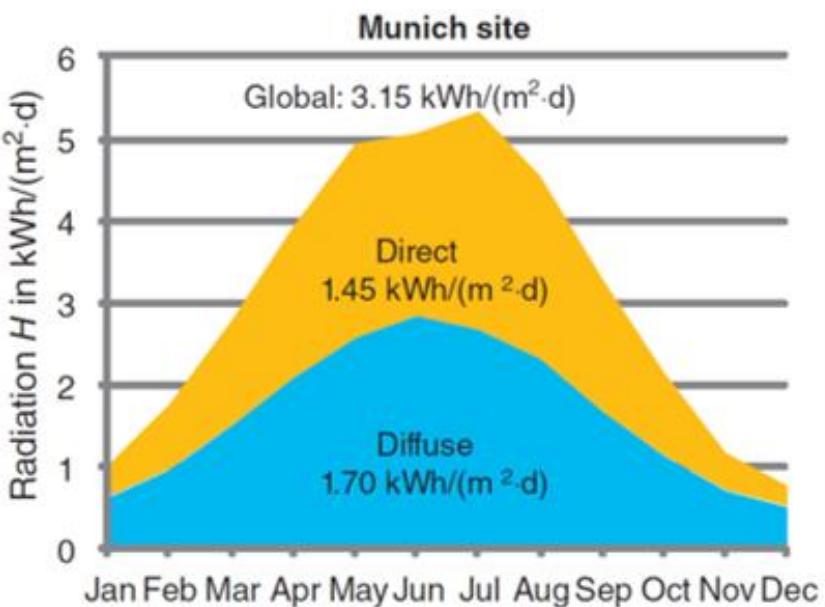
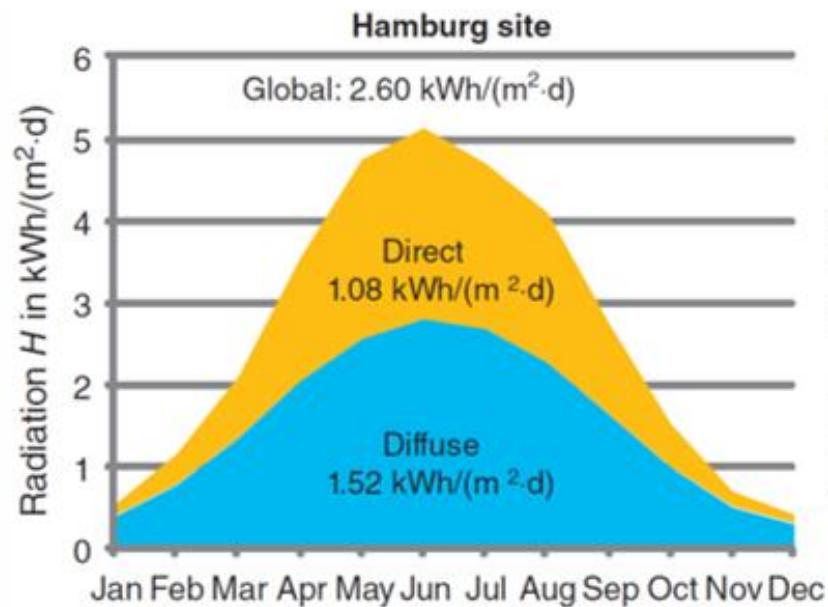


Radiação direta: radiação recebida do disco solar, que não tenha sido dispersada na atmosfera.



Radiação difusa: radiação solar recebida do sol após sua direção ter sido mudada pela atmosfera (também chamada de radiação do céu, etc.)





Definições:

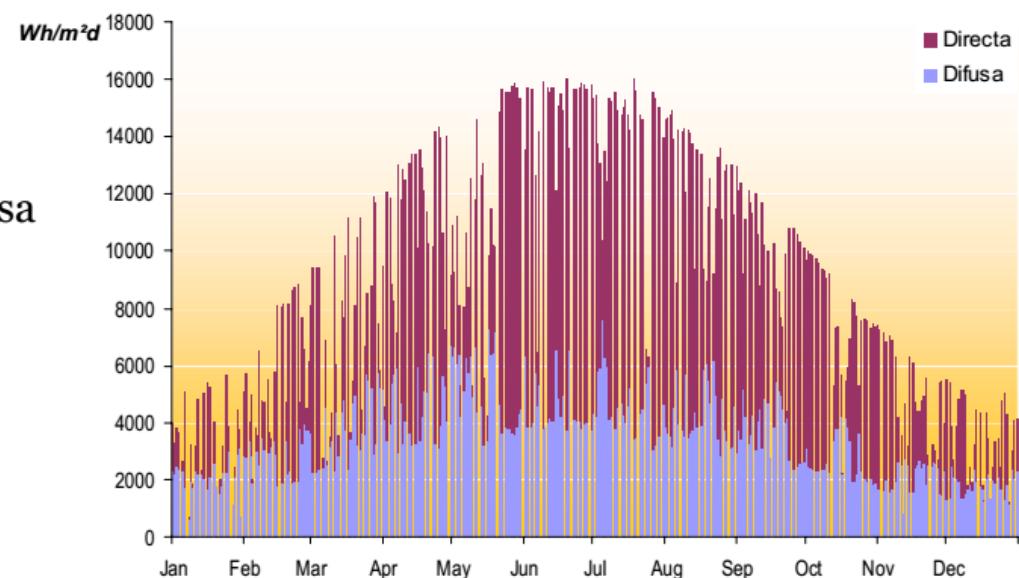


Radiação total ou global: é a soma dos dois componentes anteriores, isto é, radiação direta mais a difusa.

Irradiância (W/m^2): taxa de energia radiante incide em uma determinada superfície, por unidade de área.

Irradiação (J/m^2): energia incidente em uma determinada superfície, por unidade de área, obtida pela integração da irradiância sobre um determinado tempo (geralmente 1 hora ou 1 dia).

Processo típico de radiação direta e difusa durante o dia (hemisfério norte).



Geometria Terra-Sol:

Latitude: posição angular do local, norte ou sul do equador, norte positivo
 $\rightarrow -90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$;

Longitude: é medida ao longo do Equador e representa a distância entre um ponto e o Meridiano de Greenwich. Também é medida em graus, podendo ir de 0° a 180° para leste ou para oeste;

Ângulo de zênite: ângulo formado entre a vertical e o vetor Terra-Sol, i.é, o ângulo de incidência da radiação direta e a horizontal (θ_z);

Ângulo de altitude solar: é o ângulo entre a horizontal e o vetor Terra-Sol, i.é, o complemento do ângulo de zênite (α_s);

Ângulo de azimute solar: deslocamento angular da projeção do vetor Terra-Sol no plano horizontal (γ_s);

Ângulo horário: deslocamento angular do sol, leste ou oeste, do meridiano local, devido a rotação da Terra, com 15° por hora. Manhã negativo e tarde positivo.

Geometria Terra-Sol:



Ângulo horário:

$$\omega = (TSV - 12) \cdot 15$$

Ângulo de zênite:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$$

Ângulo de altitude solar:

$$\alpha_s = 90 - \theta_z$$

Ângulo de azimute solar:

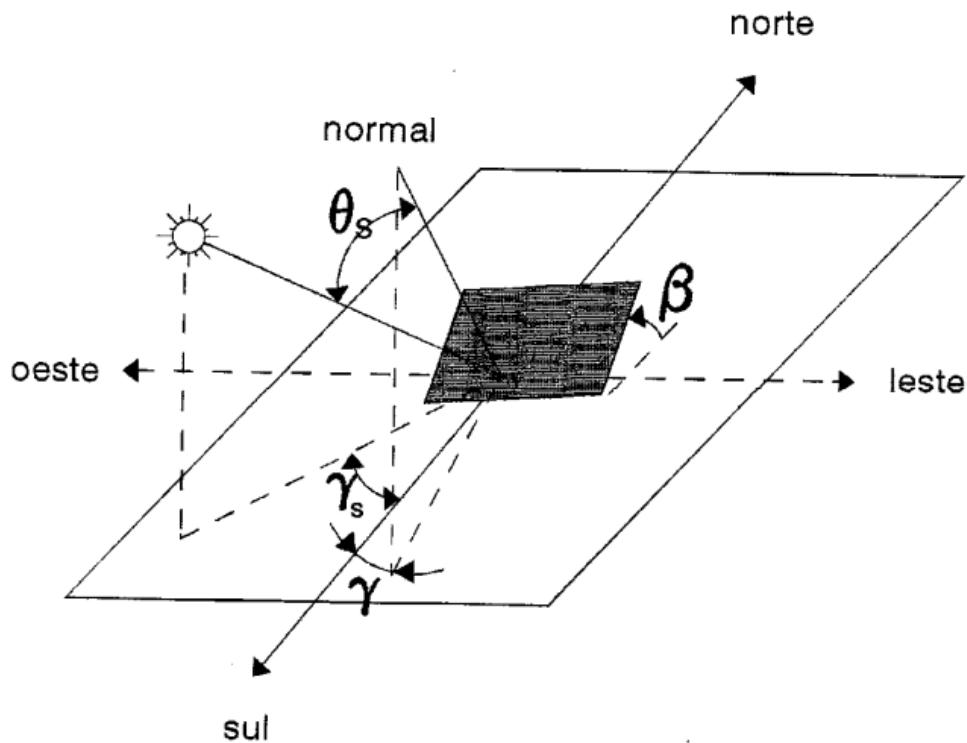
$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \frac{(\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta)}{(\sin \theta_z \cos \phi)} \right|$$

Coordenadas para superfícies inclinadas:

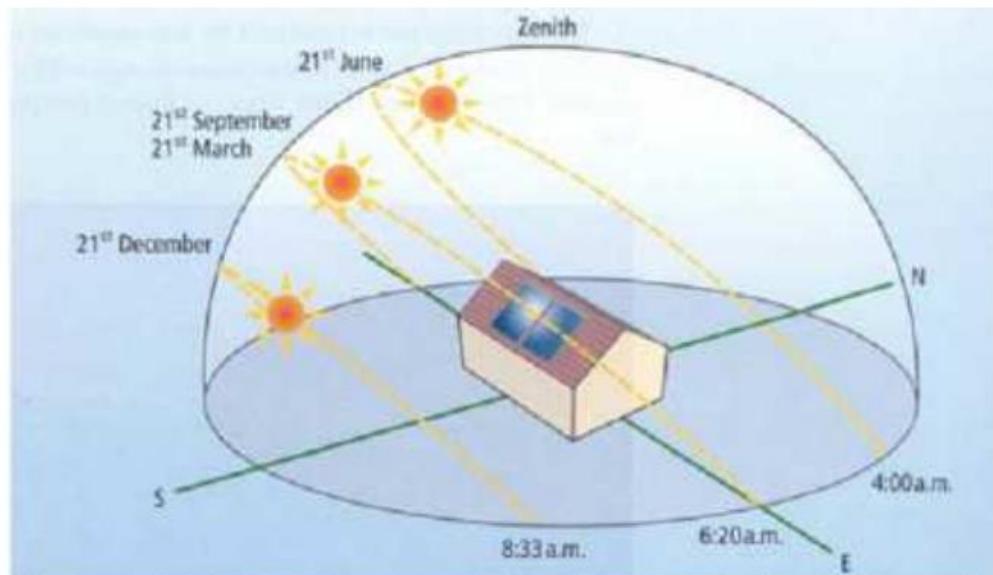
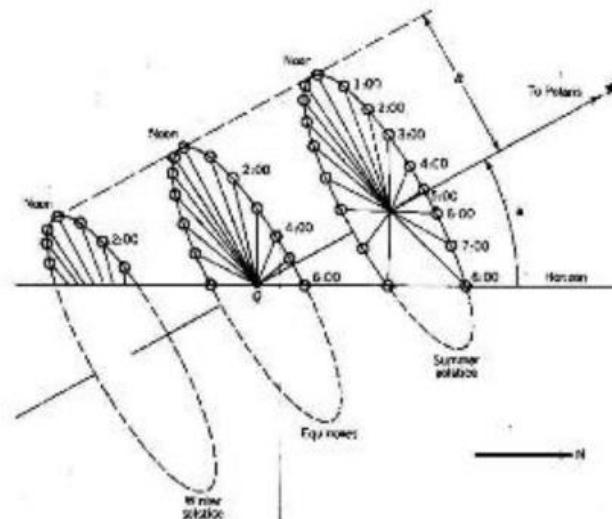
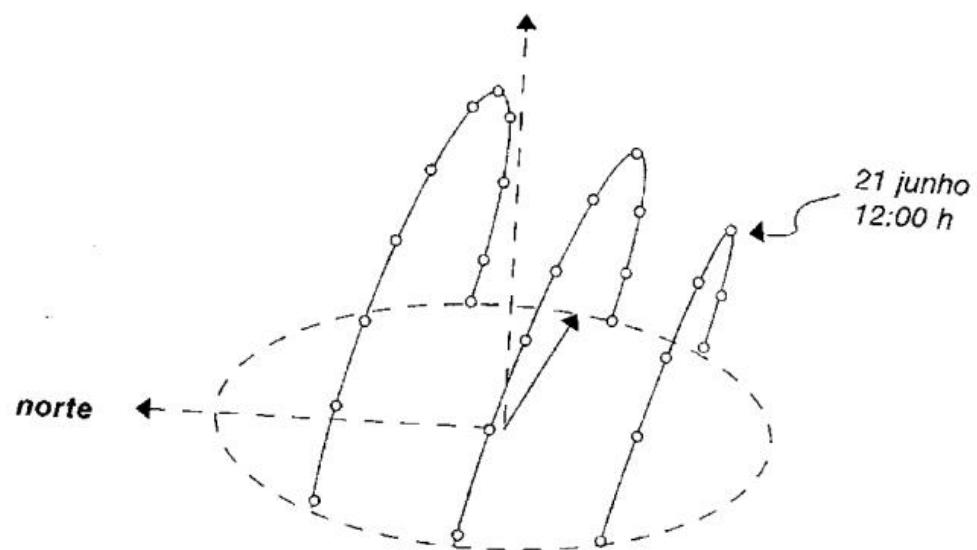
Ângulo de inclinação: ângulo formado entre o plano da superfície em questão e a horizontal $\rightarrow 0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$;

Ângulo azimutal da superfície: desvio da projeção da normal da normal da superfície no plano horizontal (γ). Norte 180° ;

Ângulo de incidência: ângulo entre o vetor Terra-Sol e a normal da superfície (θ_s).



Trajetória do sol visto por um observador:



The sun's path at different times of the year at central European latitude (London, Berlin)

Coordenadas para superfícies inclinadas:

Ângulo de incidência:

$$\begin{aligned}\cos \theta_s = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \\& + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\& + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega\end{aligned}$$

ou:

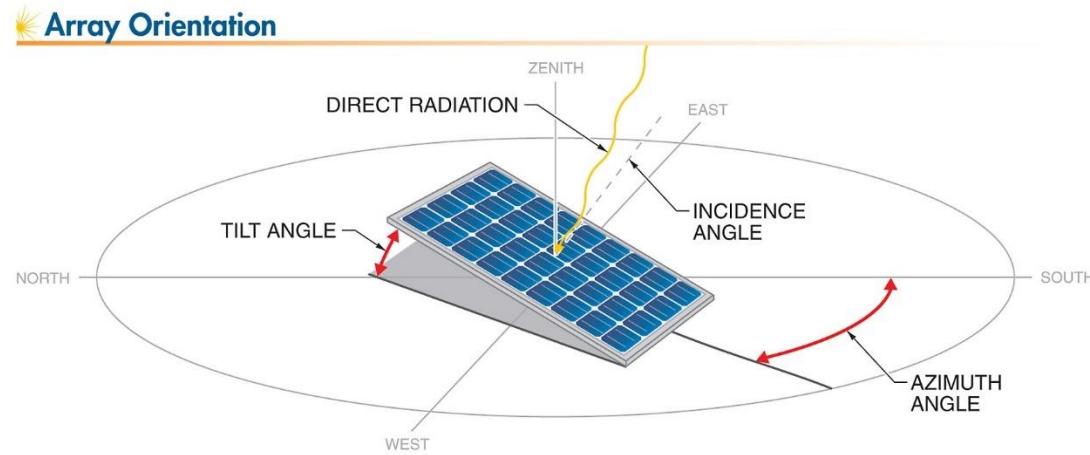
$$\cos \theta_s = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$

Note that the three sun path
are parallel

Noon

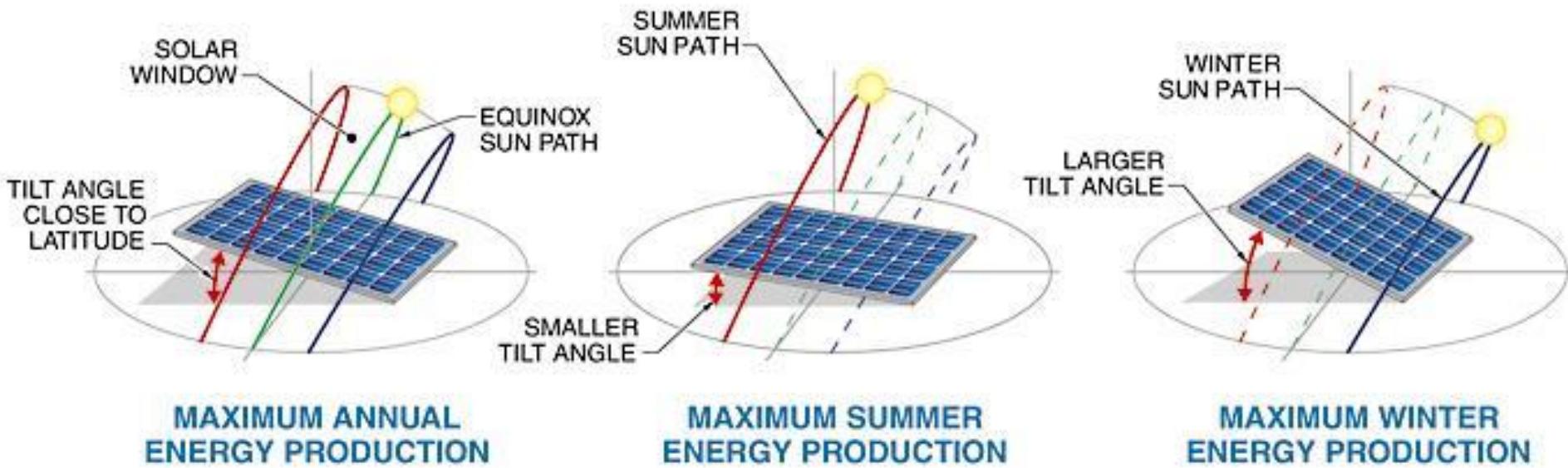
40.19 N Lat

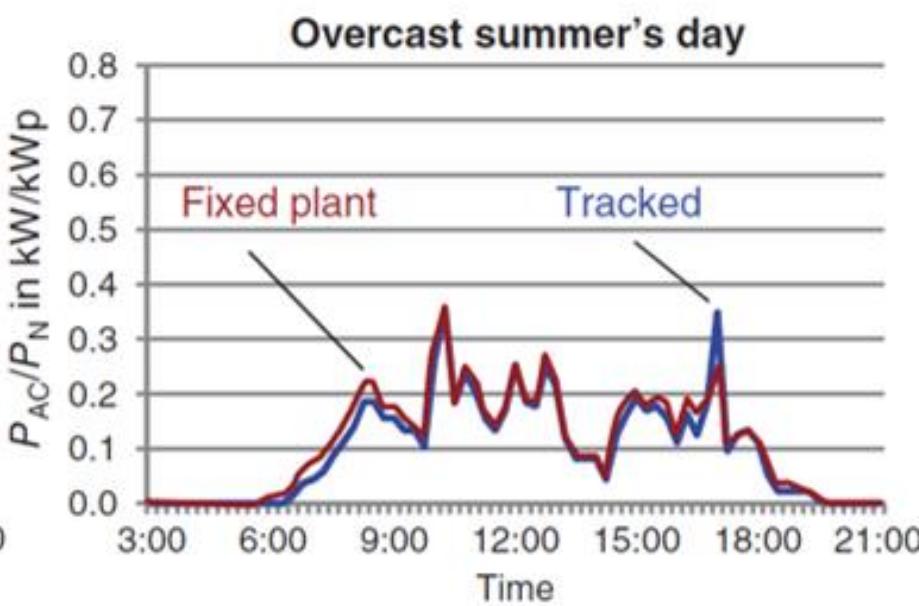
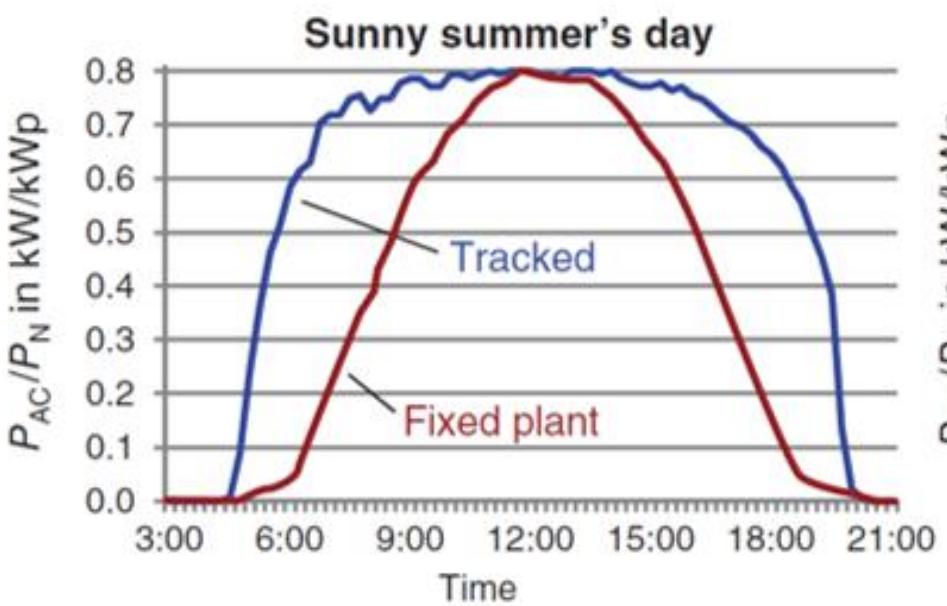
- Array orientation can be described using azimuth and tilt angles.



- Energy production at certain times of the year can be optimized by adjusting the array tilt angle.

Optimum Array Tilt Angles

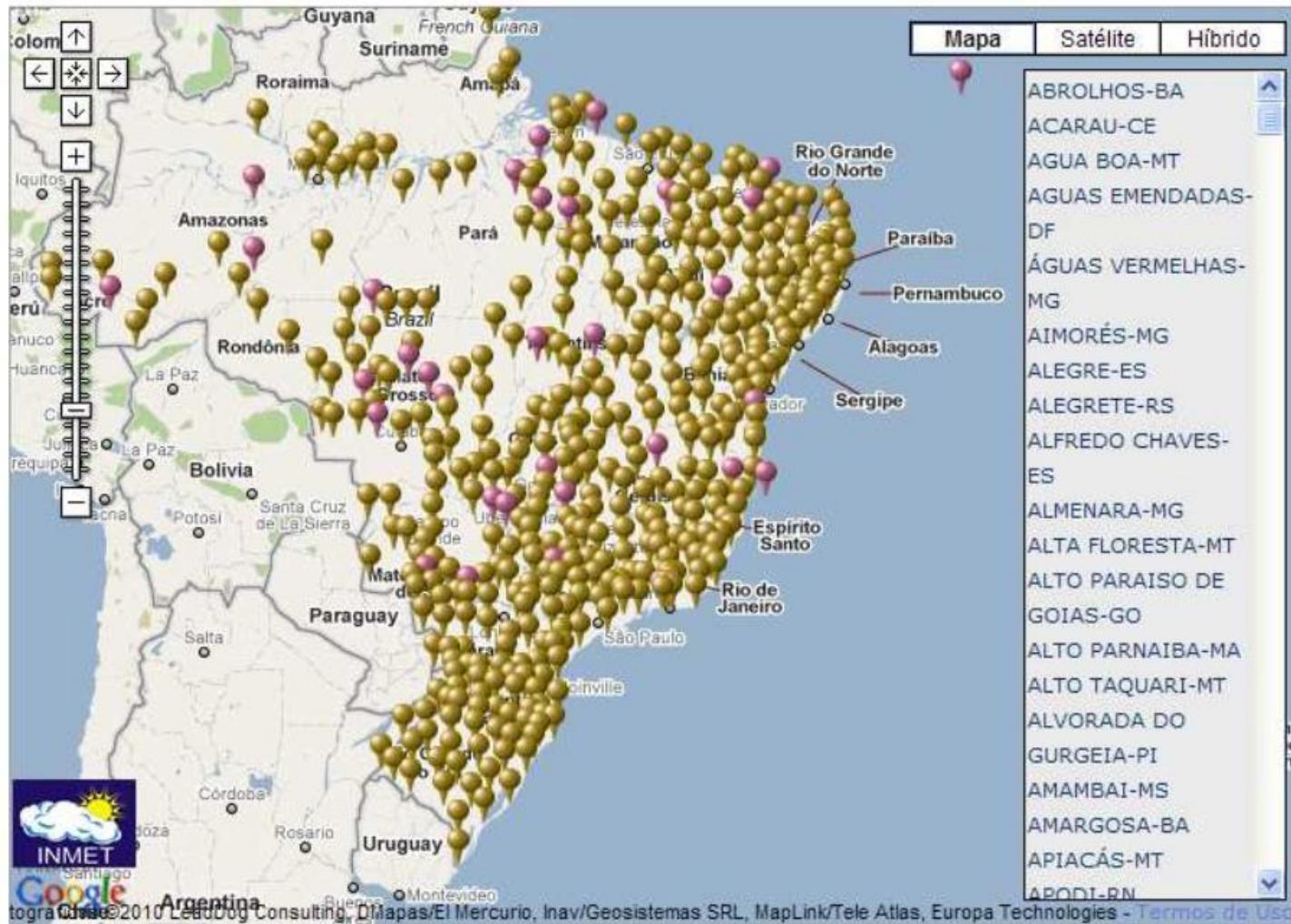




Source: K. Mertens: textbook-pv.org

No Brasil:

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET): www.inmet.gov.br





Para saber mais:

- <http://www.pveducation.org/>

Referencias:

- <https://www.quia.com/files/quia/users/mwelthyone/Powerpoint/Chapter-2-Power-Point>
- http://www.sci.ccny.cuny.edu/~stan/ATM_SUN.ppt

