



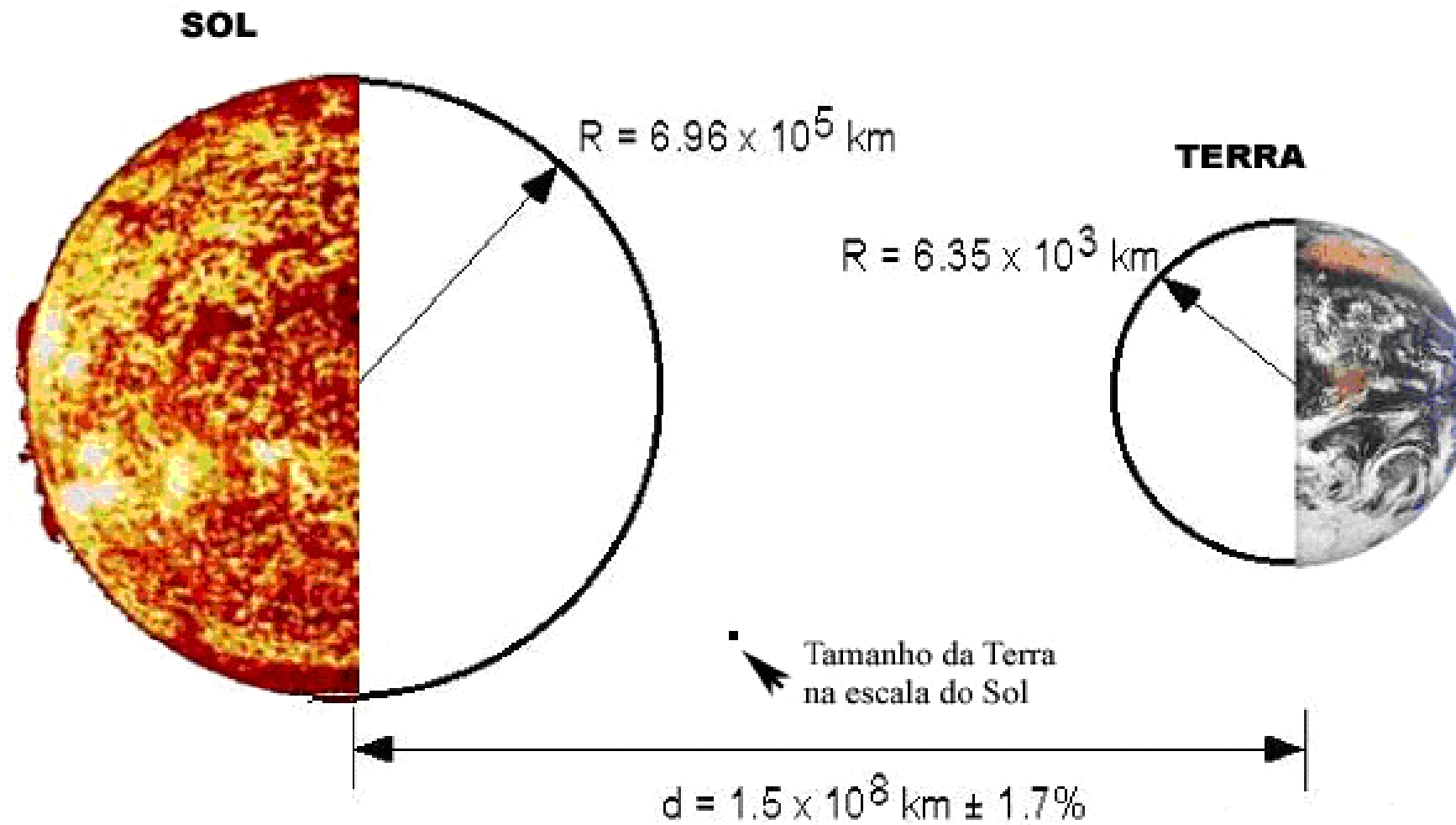
LABORATÓRIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS - INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

IEE0004 - APLICAÇÕES DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Aula 04 – O Recurso Solar

Pedro Torres
pftorres@iee.usp.br

O Sol



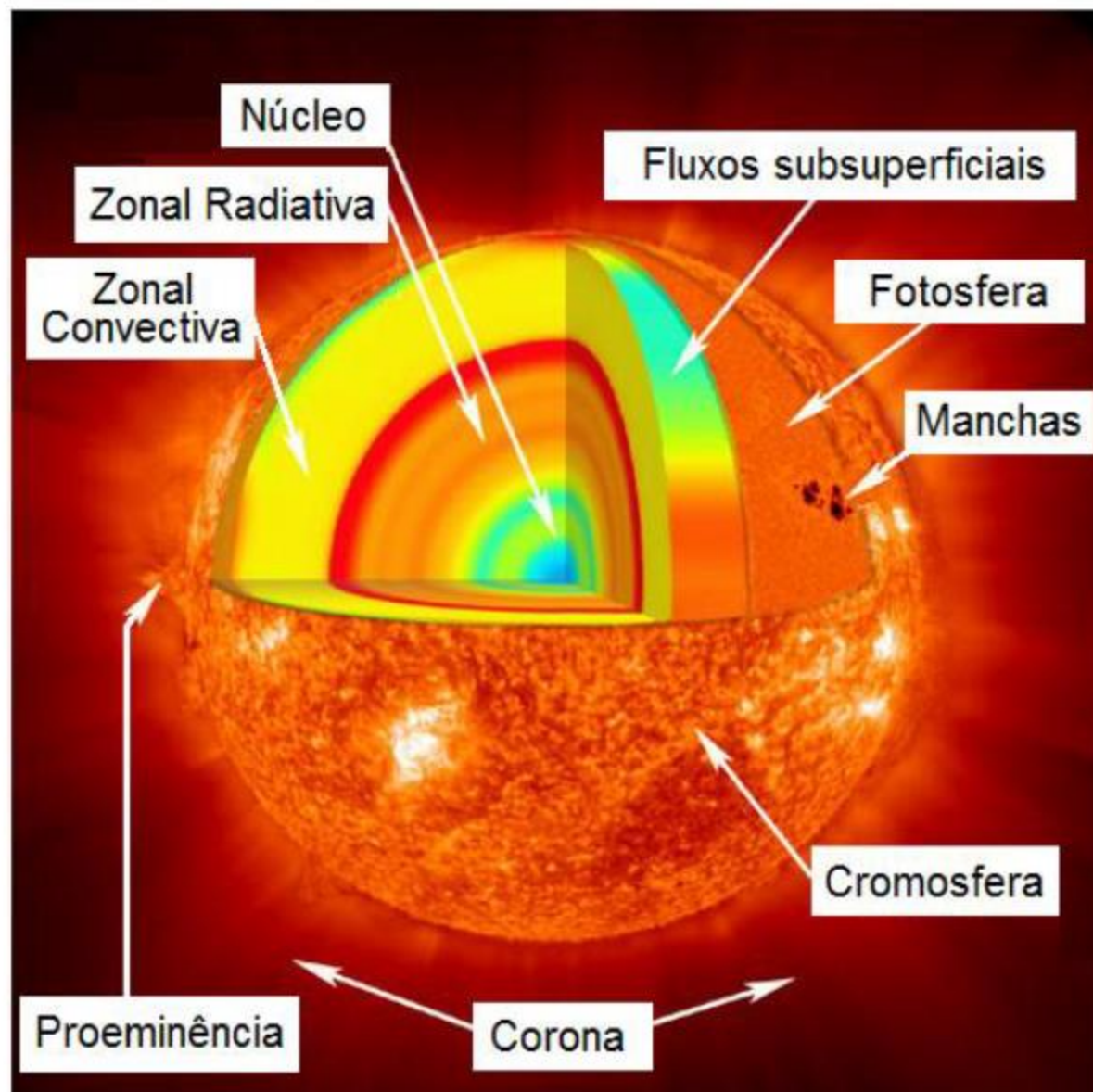


Figura 2.1 - Estrutura do Sol. Fonte: (<http://theuniversalmatrix.com/pt-br/artigos/wp-content/uploads/2011/12/Sol-Estrutura-Interna.png>)

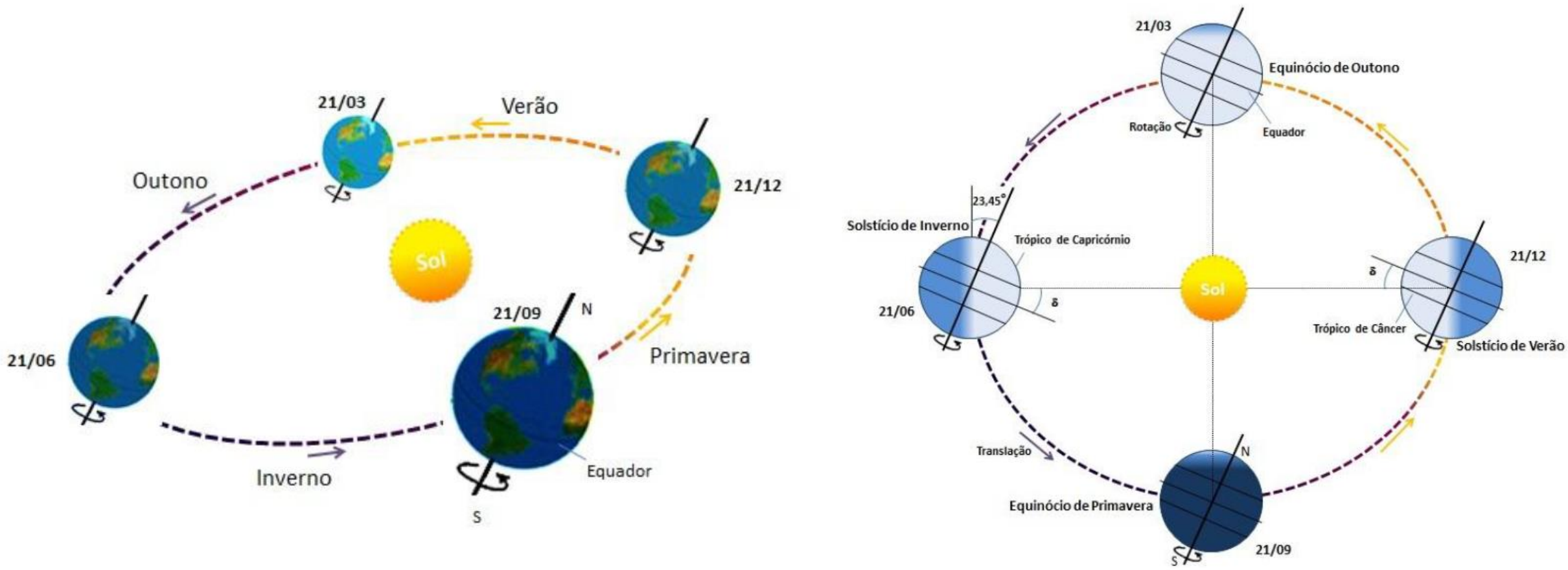
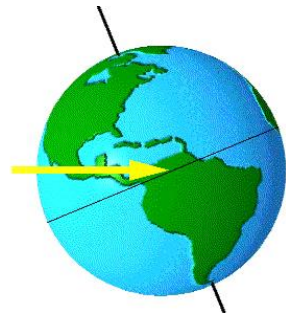
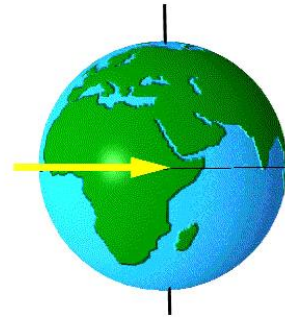


Figura 2.2 (a) e (b) – Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de $23,45^\circ$, indicando as estações do ano no hemisfério Sul.

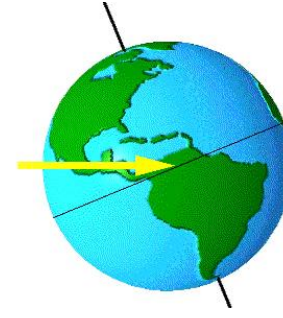
Declinação/ Estações do Ano



Verão*

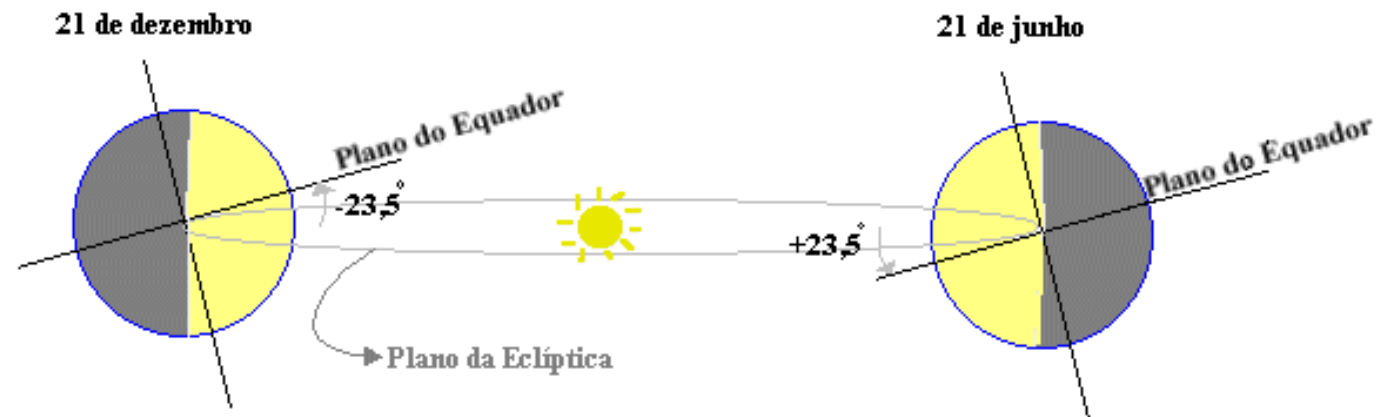


Primavera/Outono*



Inverno*

* Para o hemisfério Sul.

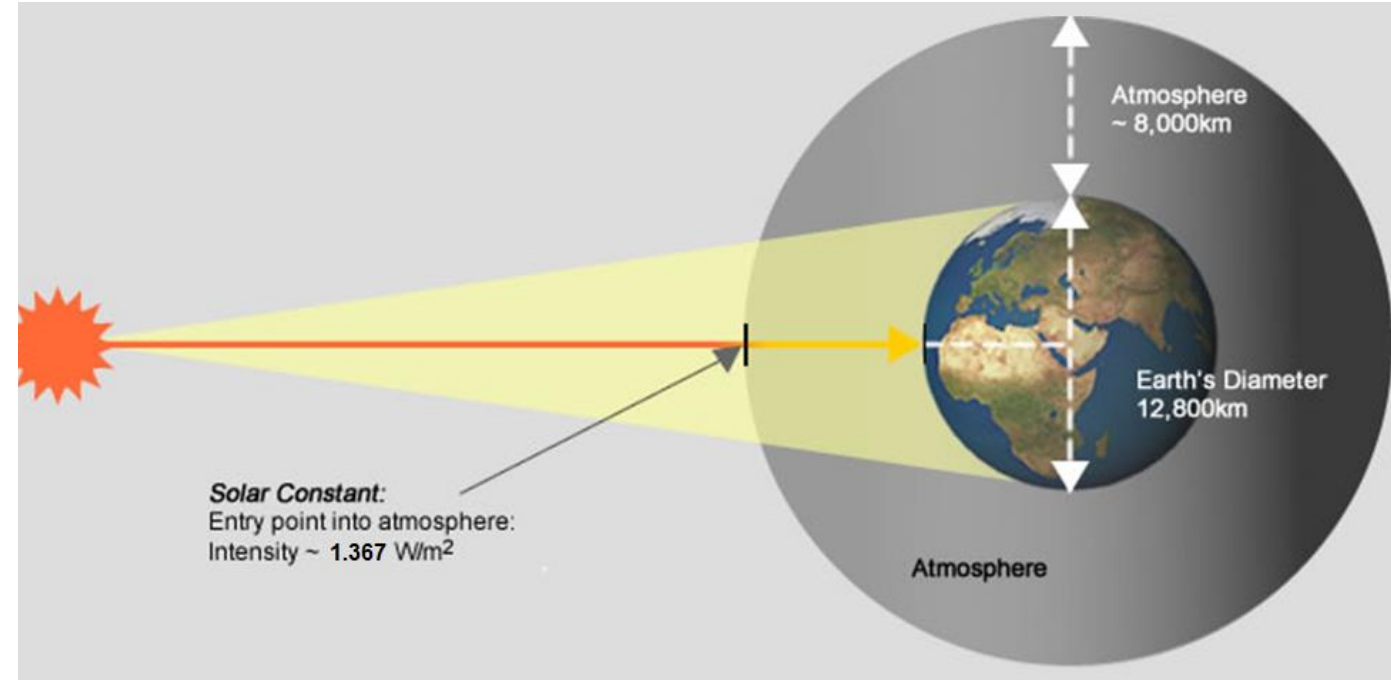
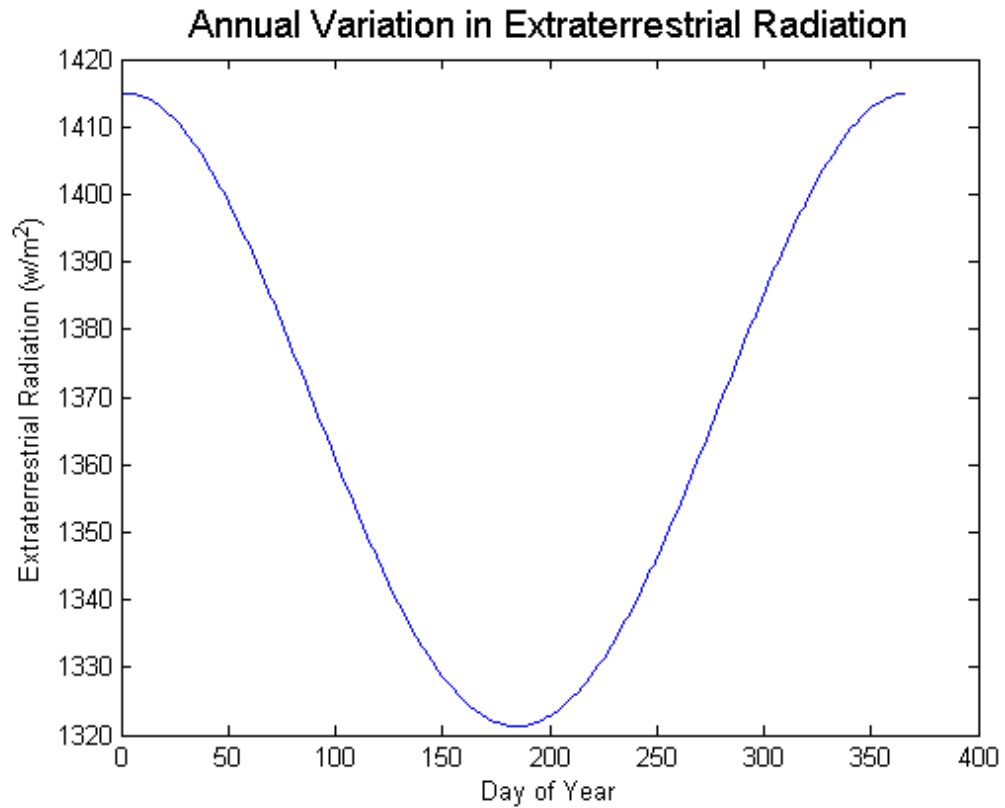


$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right]$$

$$d_n = 1, 2, \dots, 365$$

Constante Solar

Constante Solar (fluxo médio de radiação): 1367 W/m^2



Irradiância Extraterrestre Efetiva

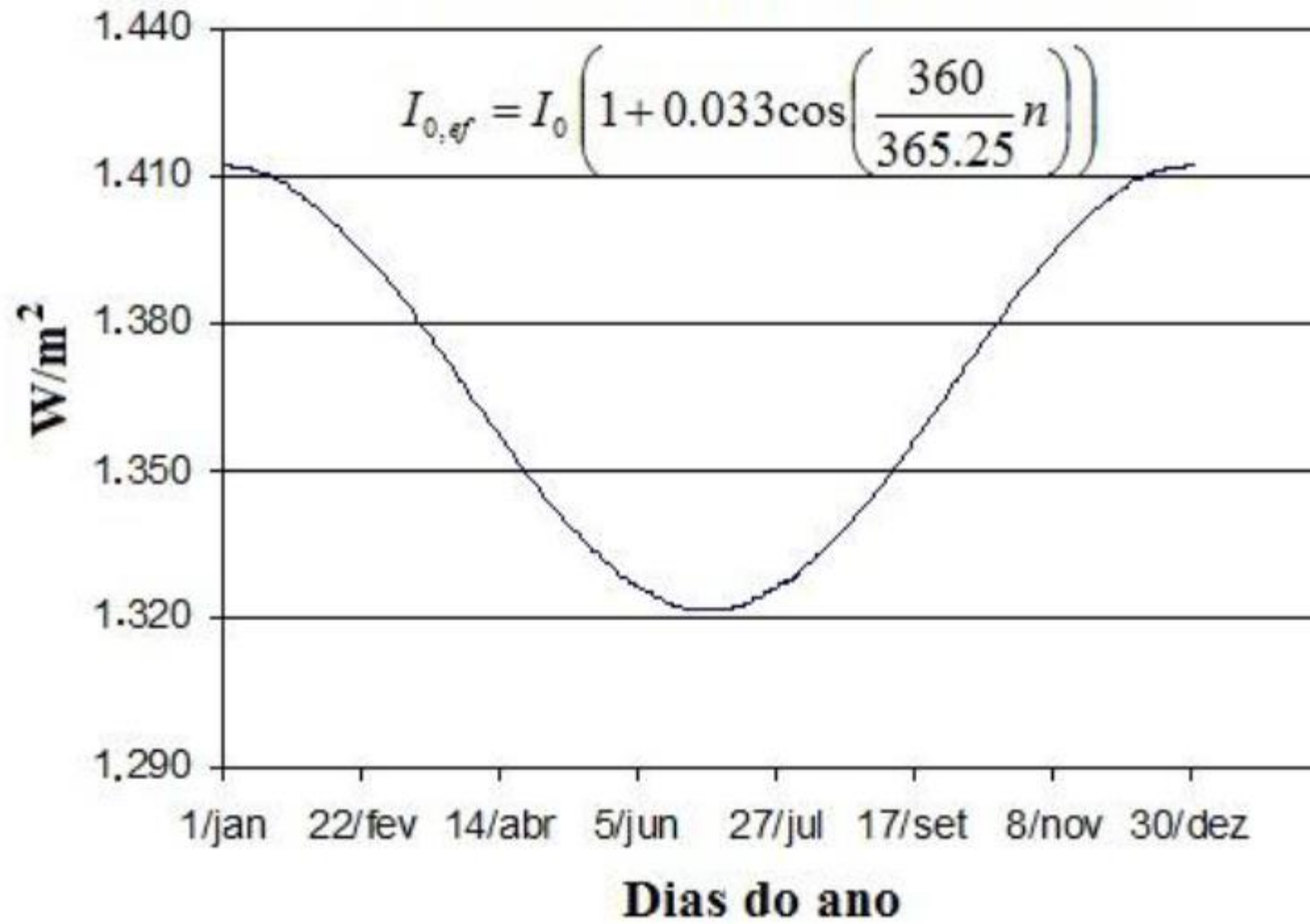
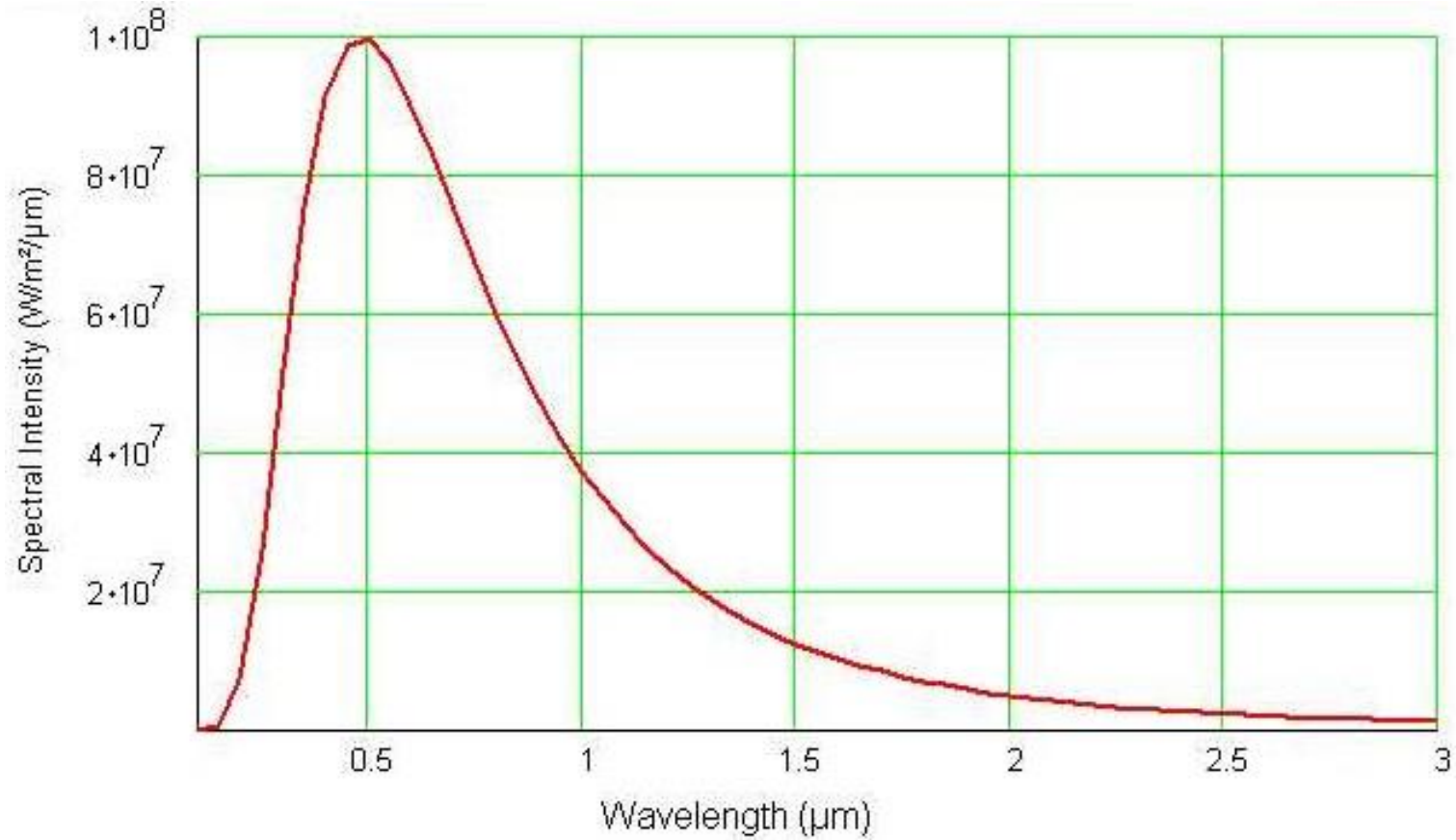
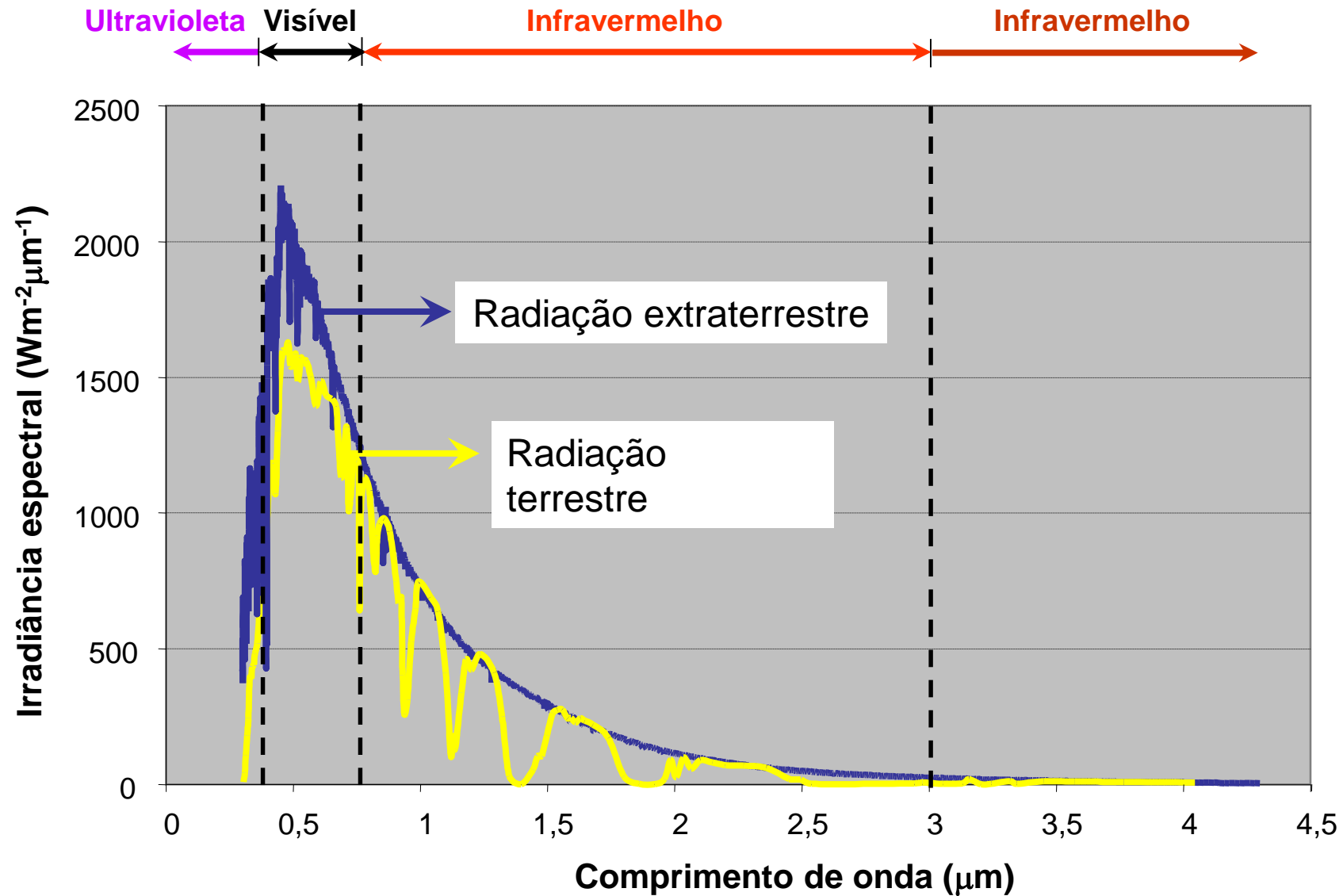


Figura 2.3 – Variação da irradiância solar extraterrestre ($I_{0,ef}$) ao longo do ano.

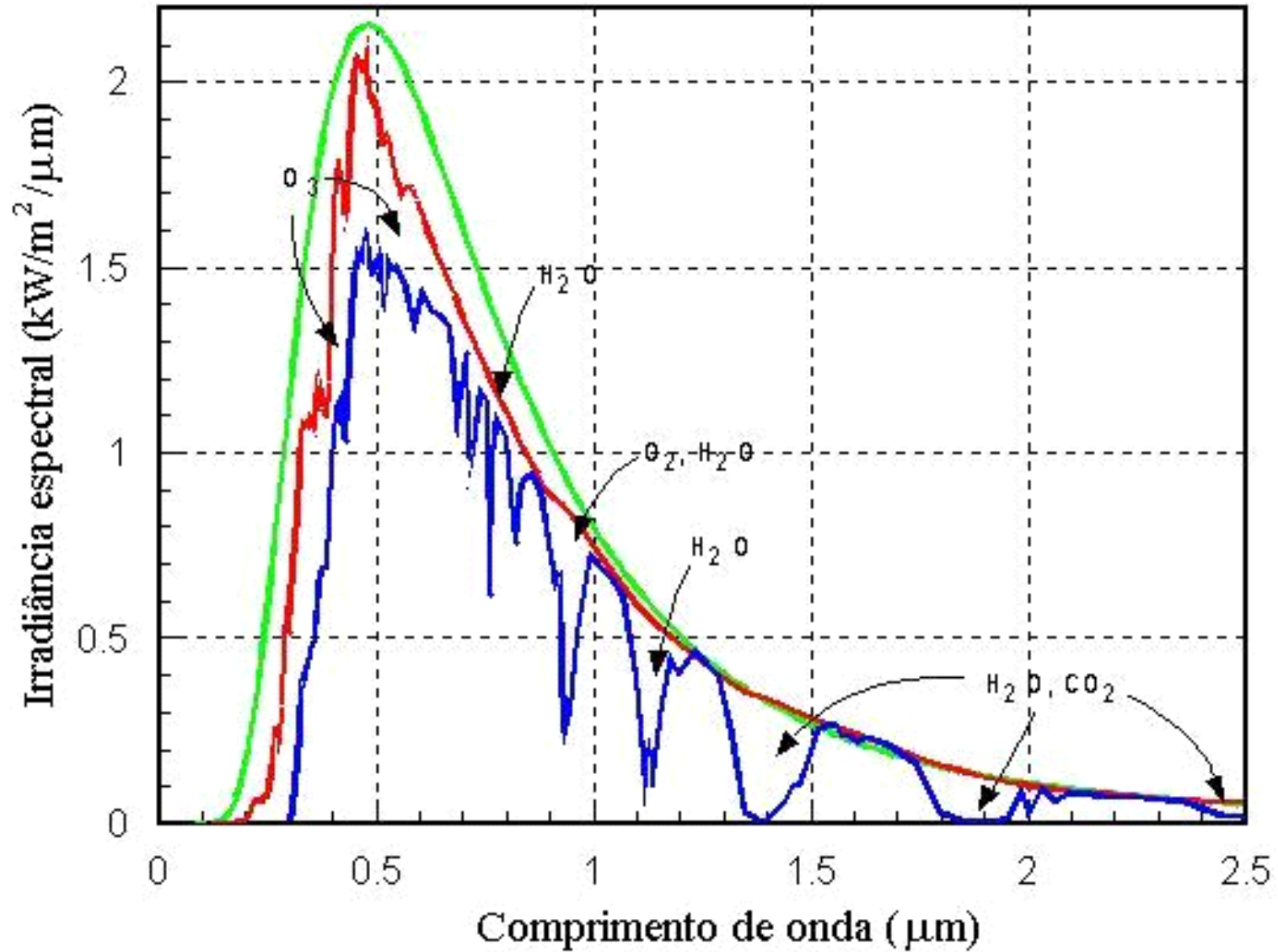
Radiação de Corpo Negro



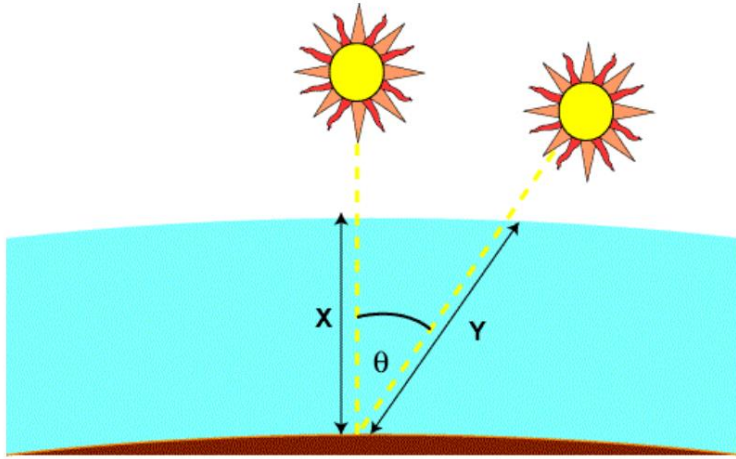
Distribuição espectral da radiação solar



Irradiância Espectral da Radiação Solar

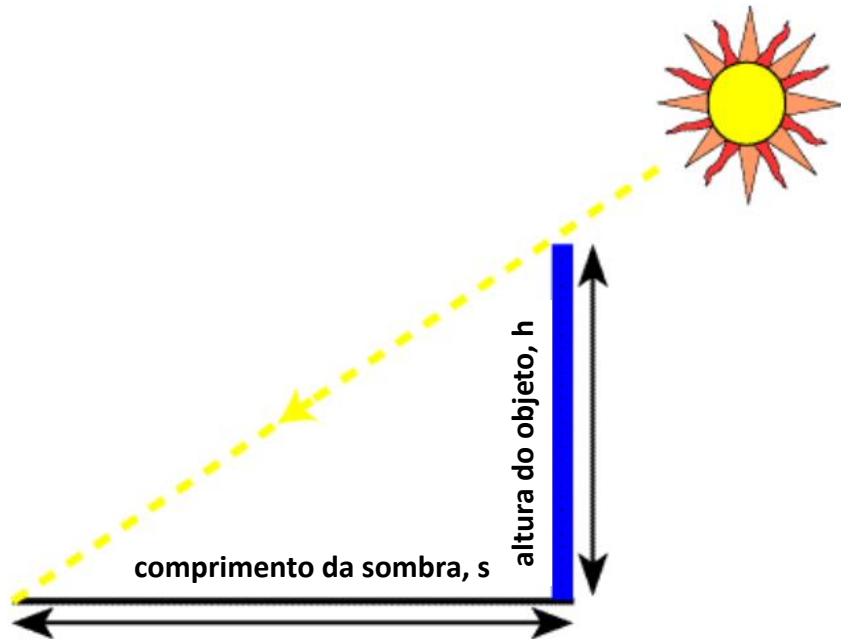


Massa de Ar:



$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

Maneira simples de calcular a Massa de Ar:



$$AM = \frac{1}{\cos(\theta) + 0.50572(96.07995 - \theta)^{-1.6364}}$$

Massa de Ar é a hipotenusa dividida para altura do objeto, h, e pelo Teorema de Pythagoras temos:

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2}$$

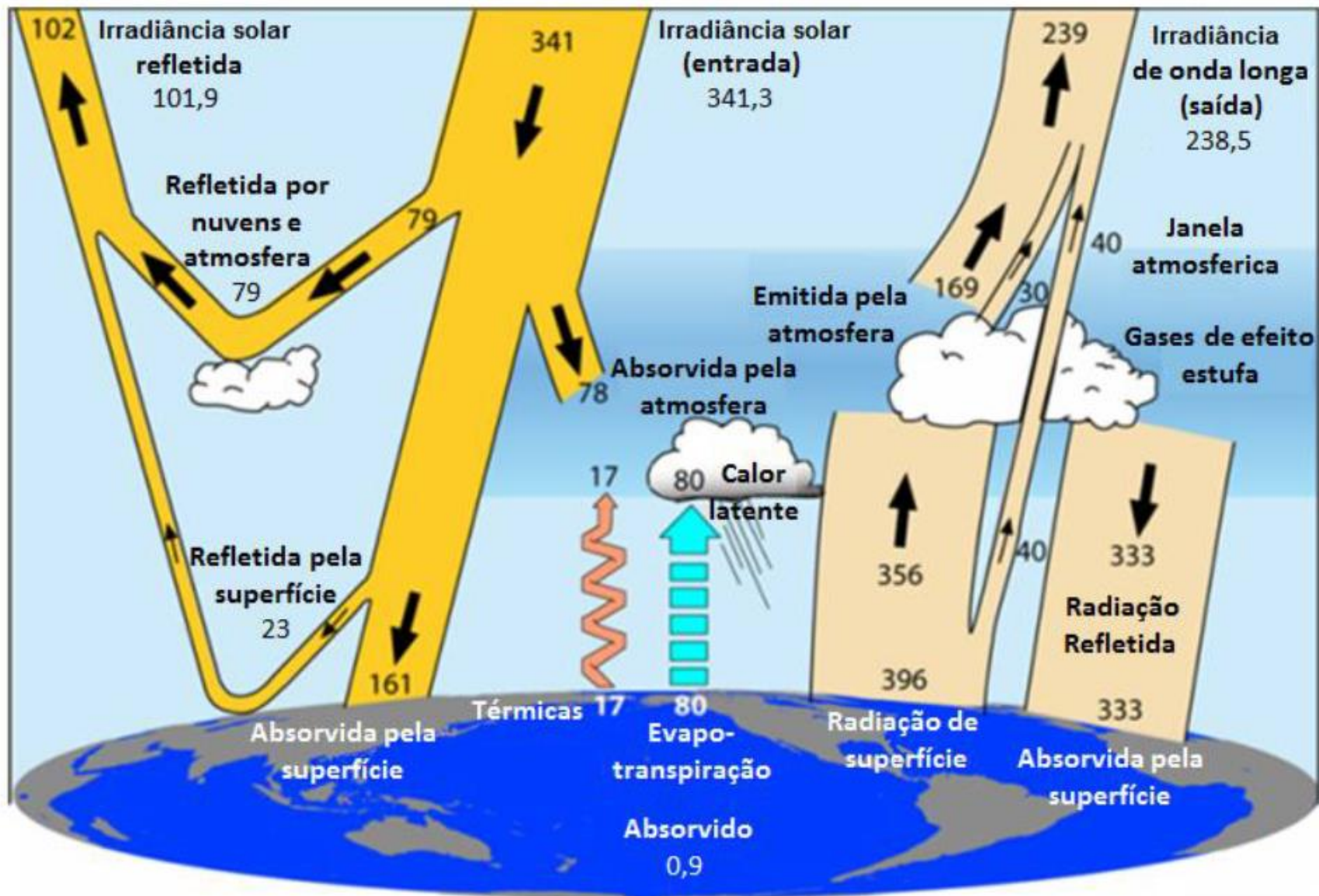
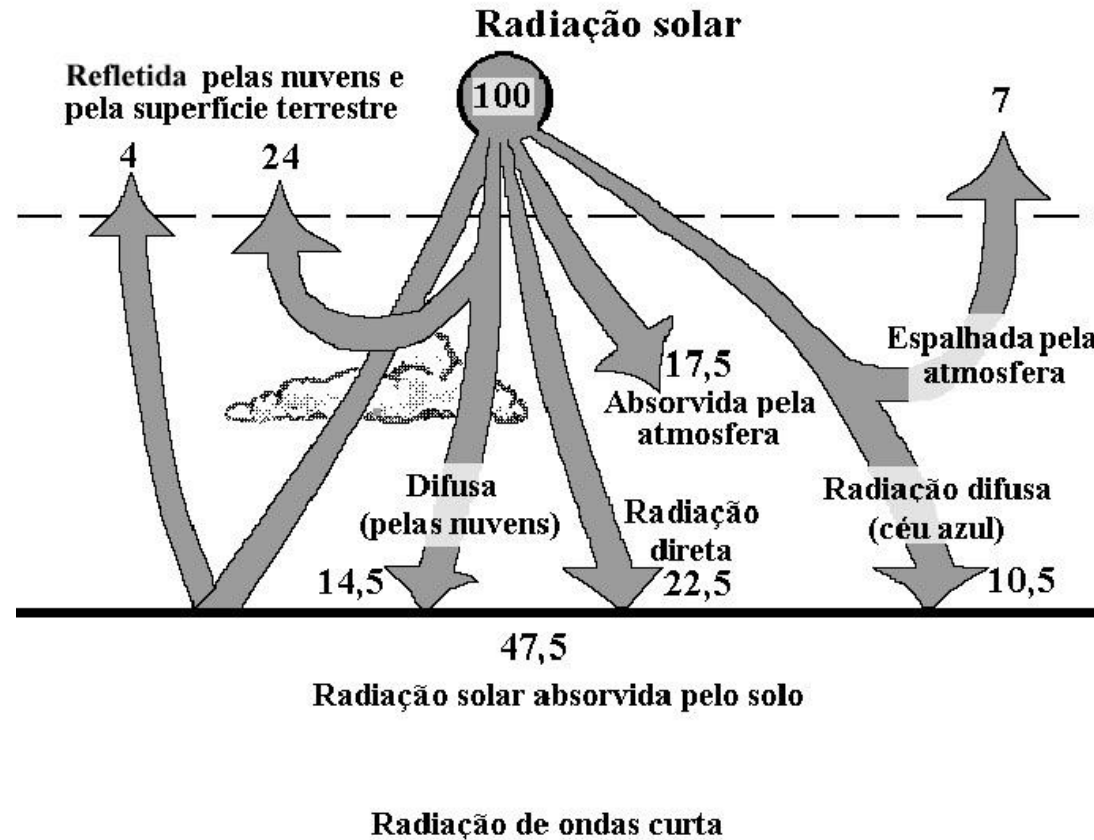
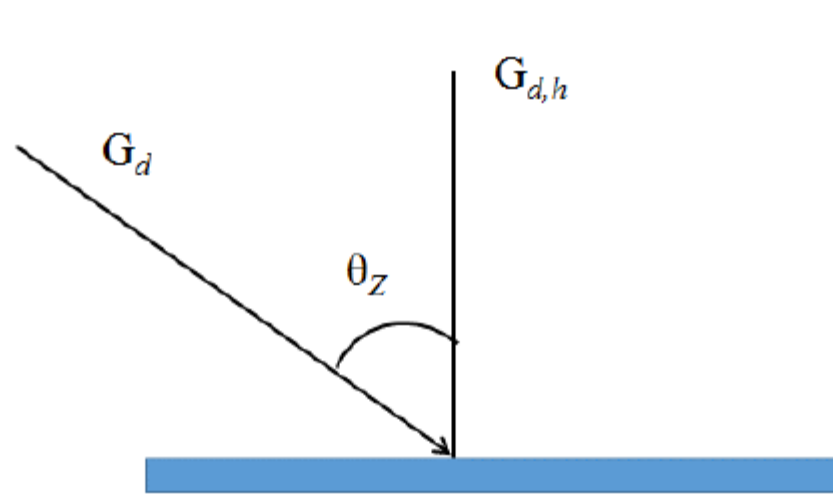


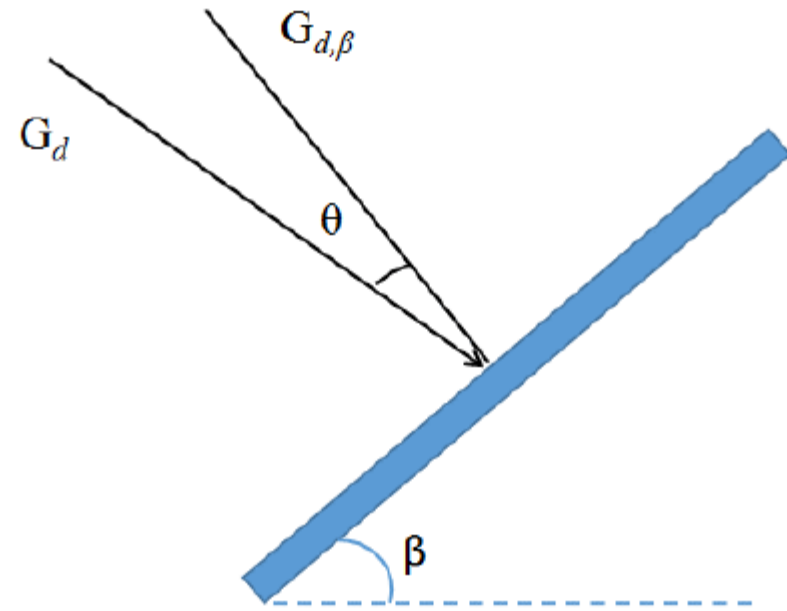
Figura 2.7 - Fluxo de potência global (em W/m^2). O valor da irradiância solar incidente no topo da atmosfera aqui apresentado é um fluxo médio anual recebido ao longo das 24 horas de um dia ($341,3 W/m^2$) no topo da atmosfera. Fonte: (Trenberth *et al.*, 2009).

Distribuição da Radiação Solar na Atmosfera



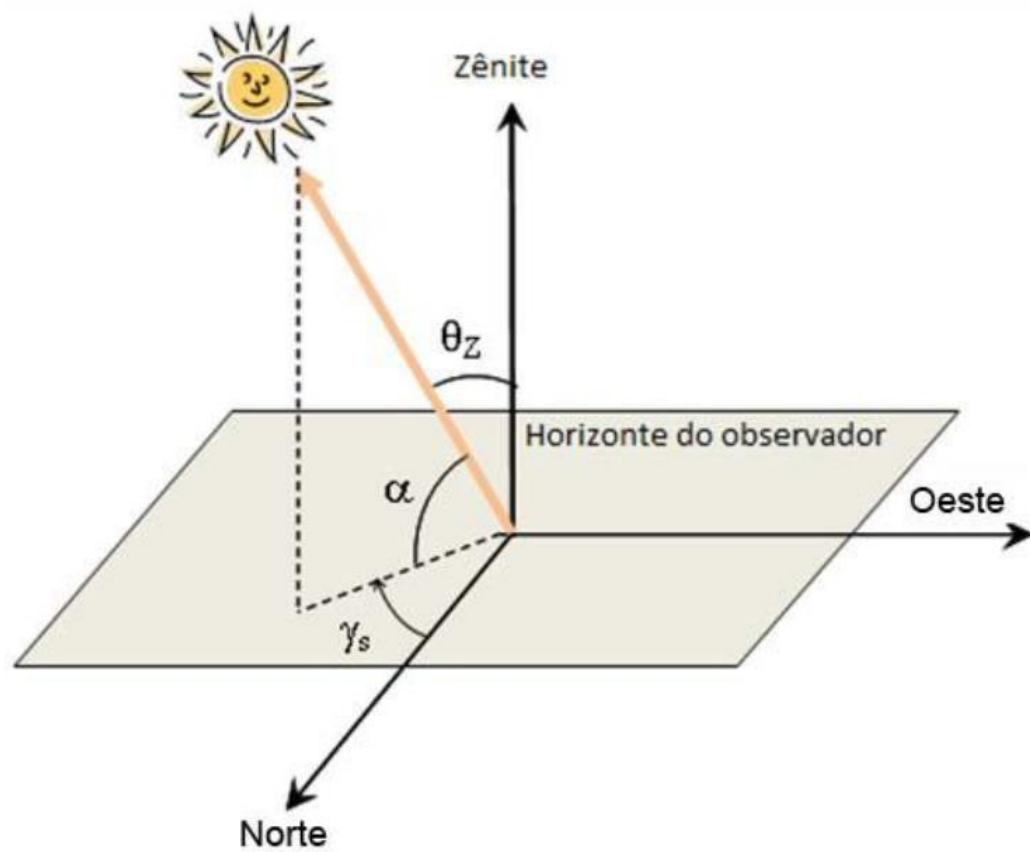


(a)

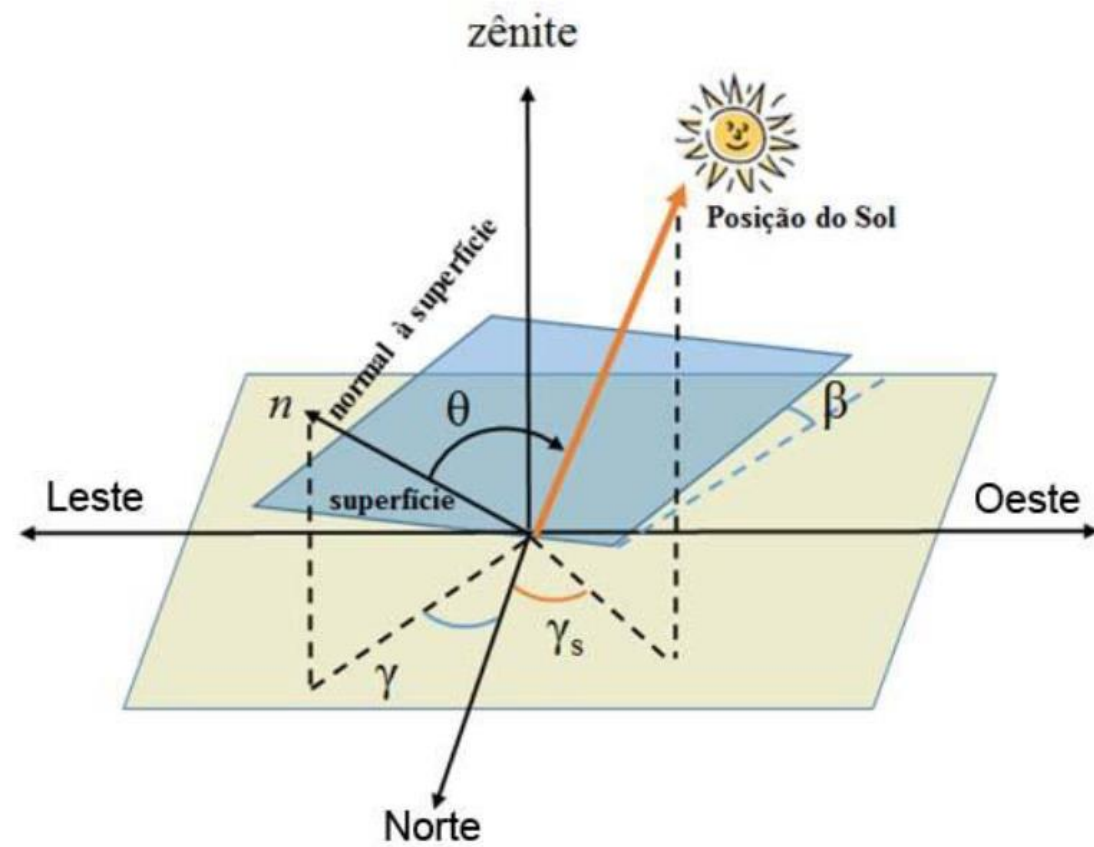


(b)

Figura 2.5 – (a) Irradiância direta incidente sobre uma superfície horizontal; (b) Irradiância direta incidente sobre uma superfície inclinada.



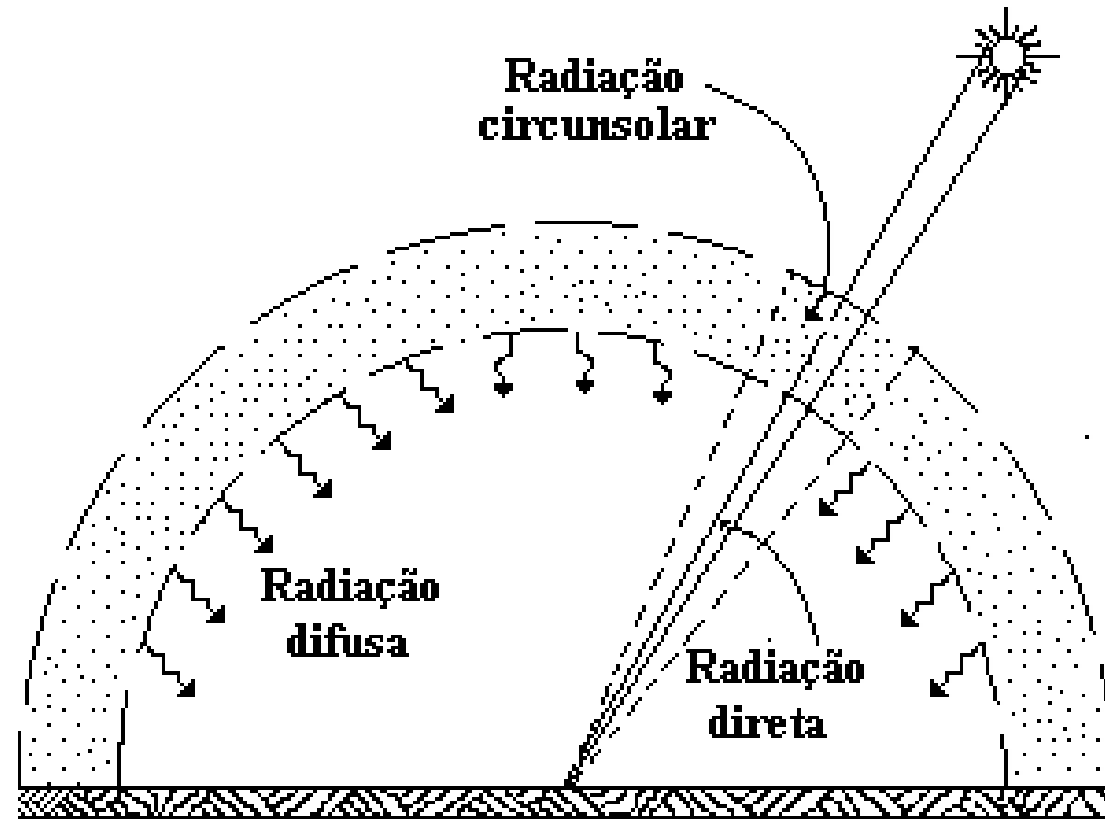
(a)



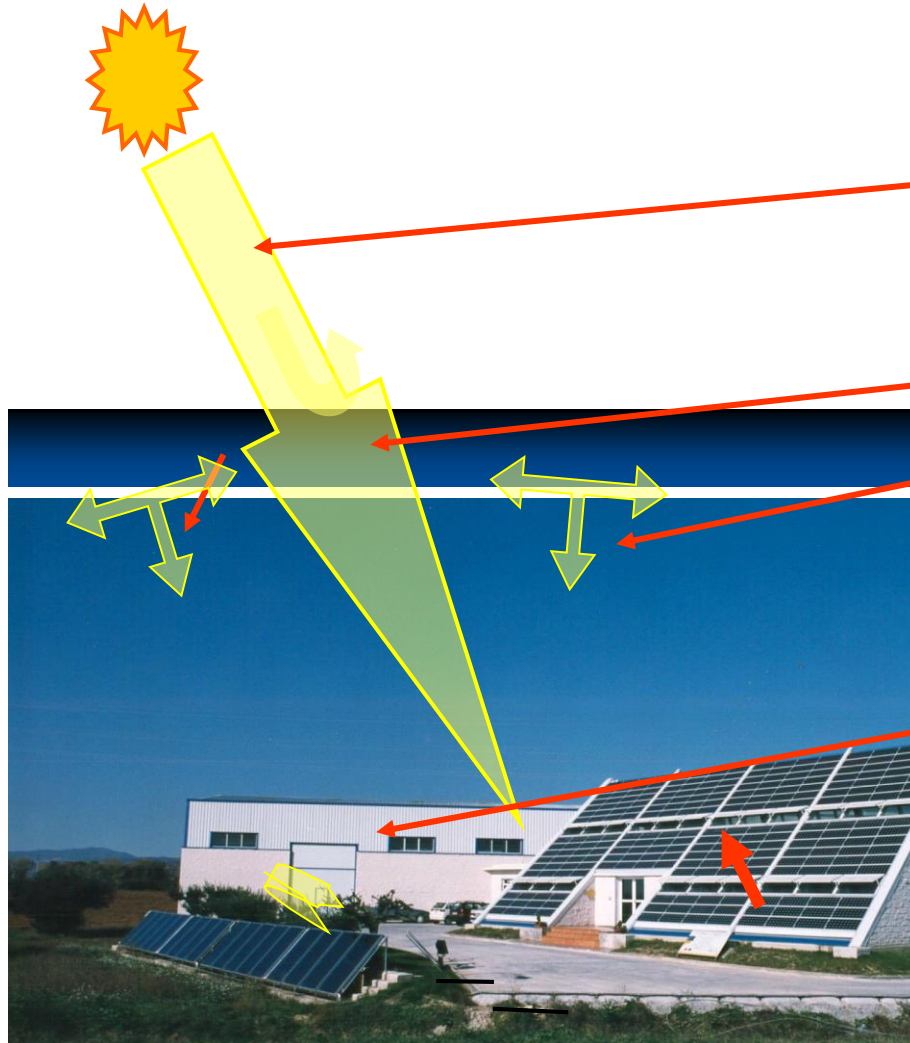
(b)

Figura 2.4 – (a) Ilustração dos ângulos θ_Z , α e γ_s , representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal; (b) Ilustração da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano: ângulos β , γ , γ_s e θ .

Componentes da Radiação Solar



Componentes da Radiação Solar: Direta, Difusa, Refletida

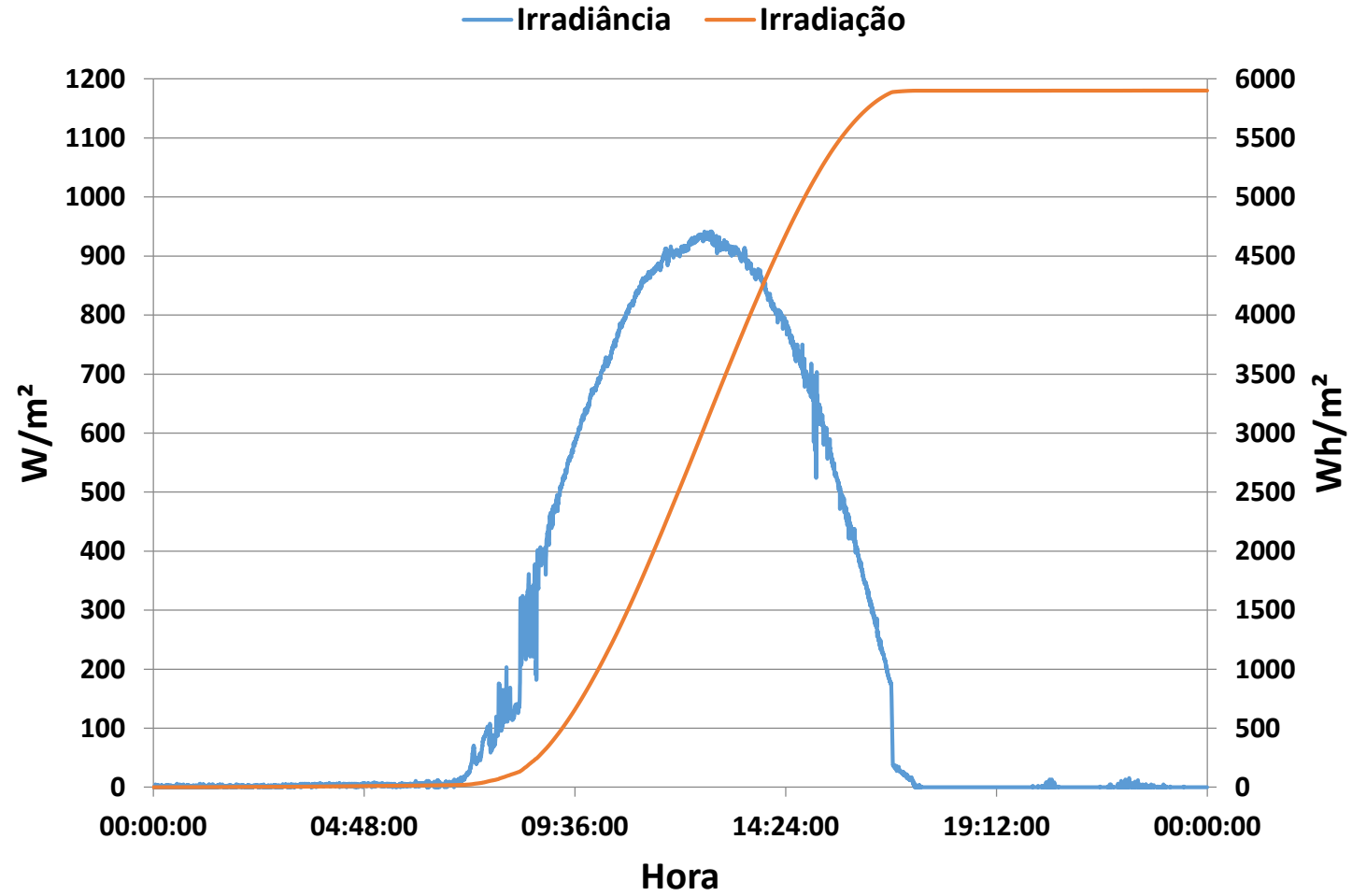


- **Irradiância:** Potência por unidade de superfície (kW/m^2)
- **Irradiação:** Energia por unidade de superfície (kWh/m^2)
- **Extra-atmosférica:** Fora da atmosfera
- **Direta:** Procede do sol e depende de sua posição
- **Difusa:** Procede da atmosfera e é consequência dos processos de reflexão, difração, dispersão e absorção
- **Refletida:** Procede da reflexão da radiação incidente sobre o entorno
- **Global = Direta + Difusa + Refletida:** Radiação total incidente sobre uma superfície

Tabela 2.3 - Valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies. Fonte: (MARKVART e CASTAÑER, 2004).

| Superfície | Albedo |
|--|-------------|
| Gramado | 0,18 – 0,23 |
| Grama seca | 0,28 – 0,32 |
| Solo descampado | 0,17 |
| Asfalto | 0,15 |
| Concreto novo (sem ação de intempéries) | 0,55 |
| Concreto (em construção urbana) | 0,2 |
| Neve fresca | 0,8 – 0,9 |
| Água, para diferentes valores de altura solar: | |
| $\alpha > 45^\circ$ | 0,05 |
| $\alpha = 30^\circ$ | 0,08 |
| $\alpha = 20^\circ$ | 0,12 |
| $\alpha = 10^\circ$ | 0,22 |

Irradiância vs Irradiação



Perfis diários de irradiância

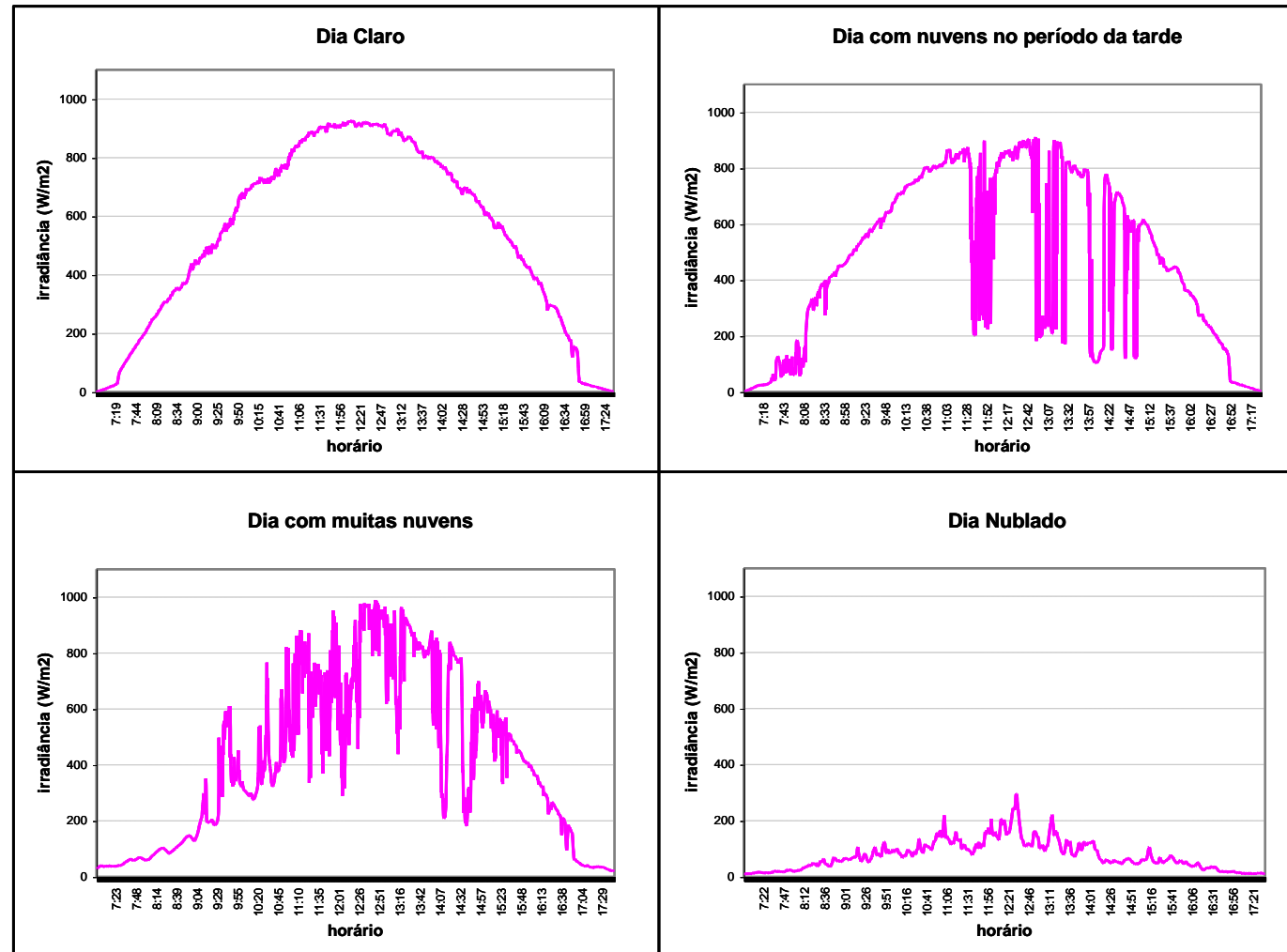


Diagrama de trajetórias do sol (I)

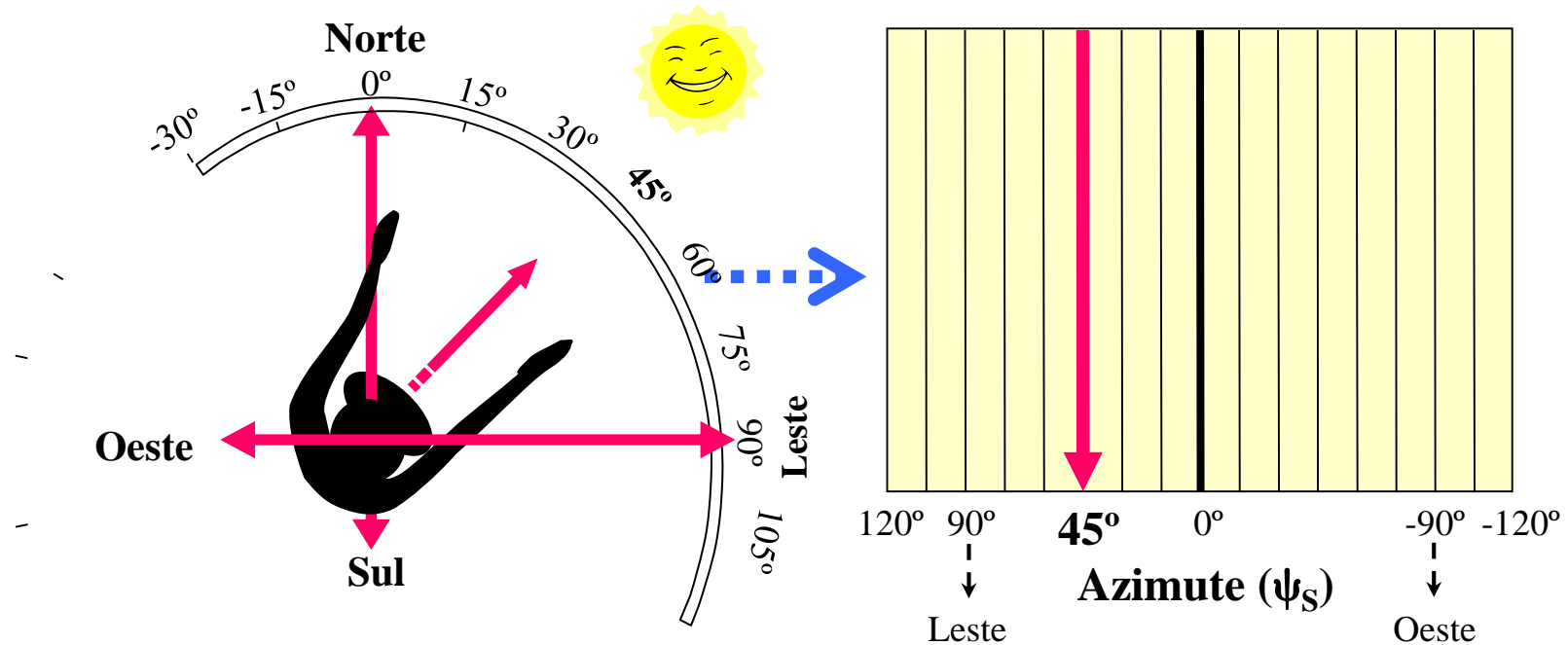
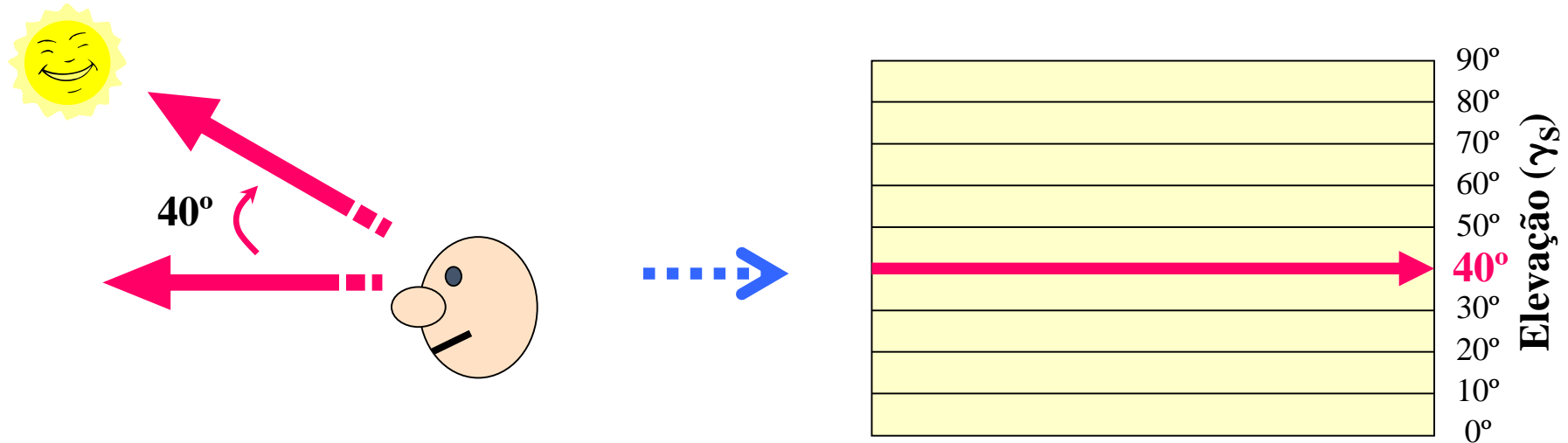


Diagrama de trajetórias do sol (II)

Exemplo: Equinócios

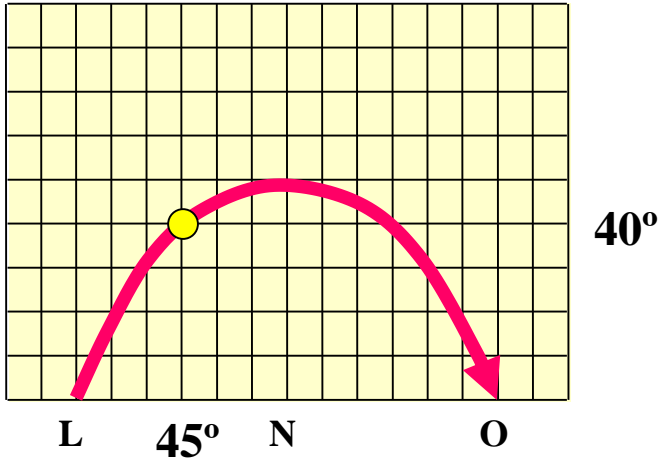
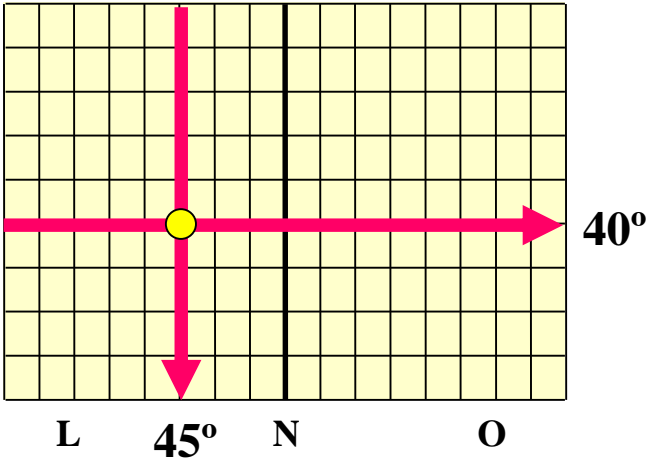
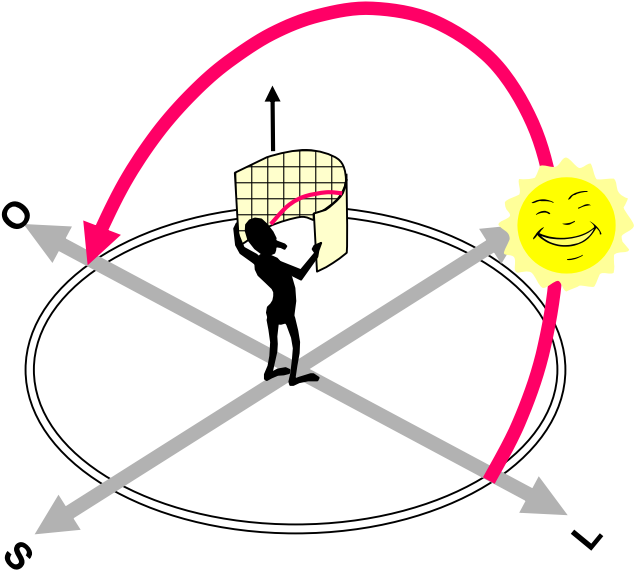
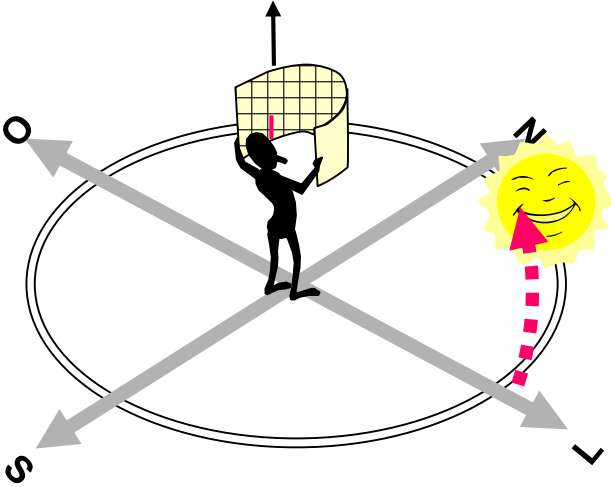
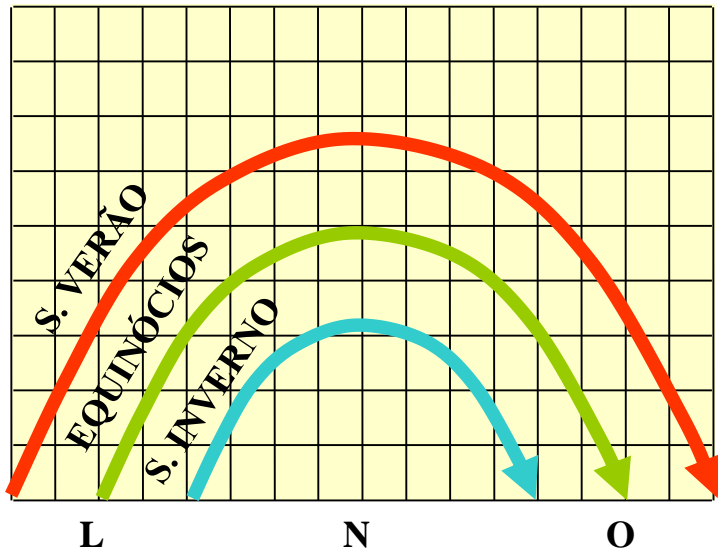
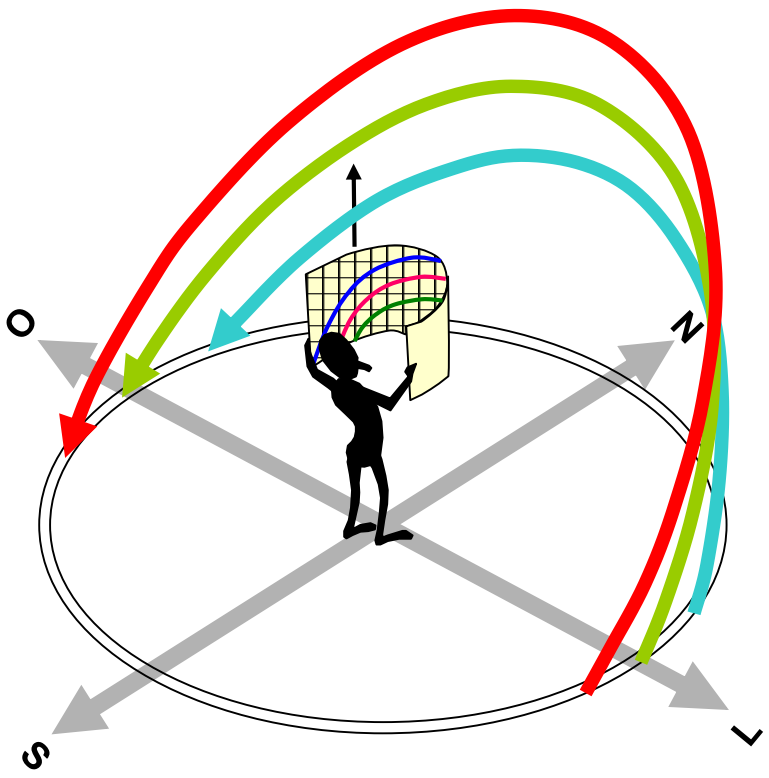


Diagrama de trajetórias do sol (III)

- ➔ Solstício de verão (Dezembro)
- ➔ Equinócios de Primavera e Outono (Setembro/Março)
- ➔ Solstício de inverno (Junho)



Estimação das componentes da radiação solar

- 📄 Cálculo da irradiação extra-atmosférica
- 📄 Dados de valores globais sobre superfície horizontal
- 📄 Cálculo das componentes sobre superfície horizontal
- 📄 Cálculo da irradiação sobre uma superfície arbitrariamente orientada

•Nomenclatura

- Extra-atmosférica (B_0)
- Direta (B)
- Difusa (D)
- Refletida (R)
- Global (G)

•Subíndices

- — irradiância
- h irradiação horária
- d irradiação diária
- m irradiação média

•Exemplos:

- $G(0)$ irradiância global sobre superfície horizontal
- $G_{dm}(\alpha, \beta)$ irradiação global diária média sobre S
- $B(90)$ irradiância direta sobre uma superfície vertical orientada ao equador

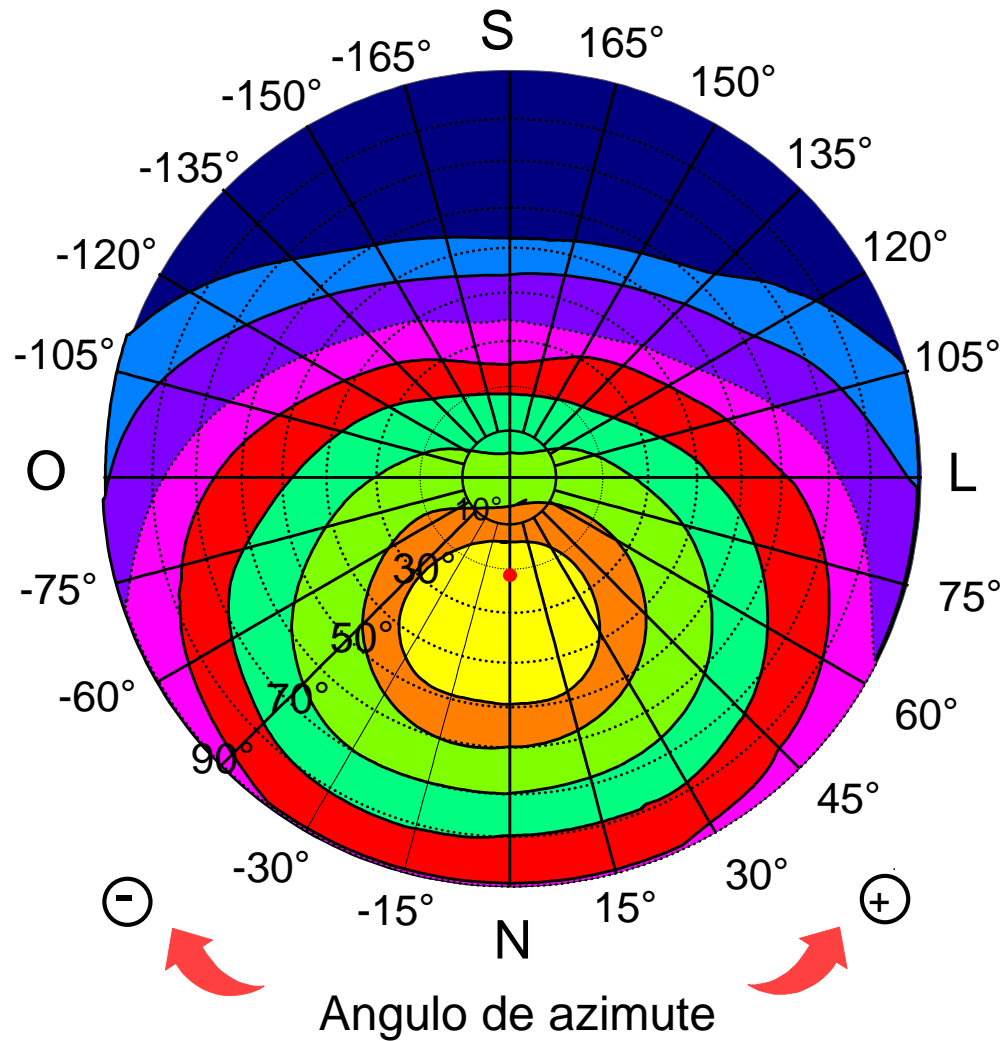
Cálculos de irradiação - Exemplo: São Paulo

| • Mês | d_n | δ (°) | B_{Od} (0) (Wh/m ²) | G_{dm} (0) (Wh/m ²) | G_{dm} (23°) (Wh/m ²) | G_{dm} (33°) (Wh/m ²) |
|----------------|-------|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| • JAN | 17 | -20.90 | 11765 | 4500 | 4143 | 3864 |
| • FEV | 46 | -13.29 | 11125 | 5000 | 4776 | 4525 |
| • MAR | 75 | -2.42 | 9936 | 4056 | 4117 | 4013 |
| • ABR | 105 | 9.41 | 8337 | 3611 | 3959 | 3980 |
| • MAI | 135 | 18.79 | 6899 | 3194 | 3796 | 3927 |
| • JUN | 161 | 23.01 | 6211 | 2944 | 3651 | 3832 |
| • JUL | 198 | 21.18 | 6480 | 3222 | 3968 | 4152 |
| • AGO | 228 | 13.45 | 7659 | 3722 | 4269 | 4359 |
| • SET | 258 | 1.81 | 9236 | 3750 | 3907 | 3852 |
| • OUT | 289 | -9.97 | 10683 | 4028 | 3921 | 3756 |
| • NOV | 319 | -19.15 | 11558 | 5000 | 4619 | 4309 |
| • DEZ | 345 | -23.12 | 11887 | 4530 | 4124 | 3825 |
| • Anual | | | 9305 | 3956 | 4099 | 4029 |

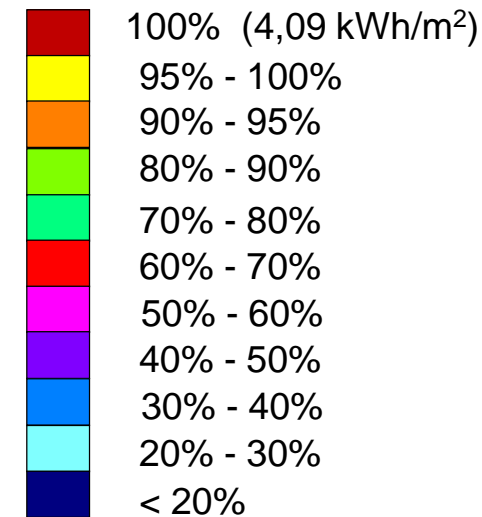
Valor médio diario máximo de uma superfície óptima [$G_{dm}(\alpha_{opt}, \beta_{opt})$],
de acordo com os dados de irradiação diária média mensal

Irradiação sobre superfícies inclinadas (III)

- “Carta de irradiação”:



Valor médio diário máximo de uma superfície ótima [$G_{dm}(\alpha_{opt}, \beta_{opt})$], de acordo com o AMT de São Paulo

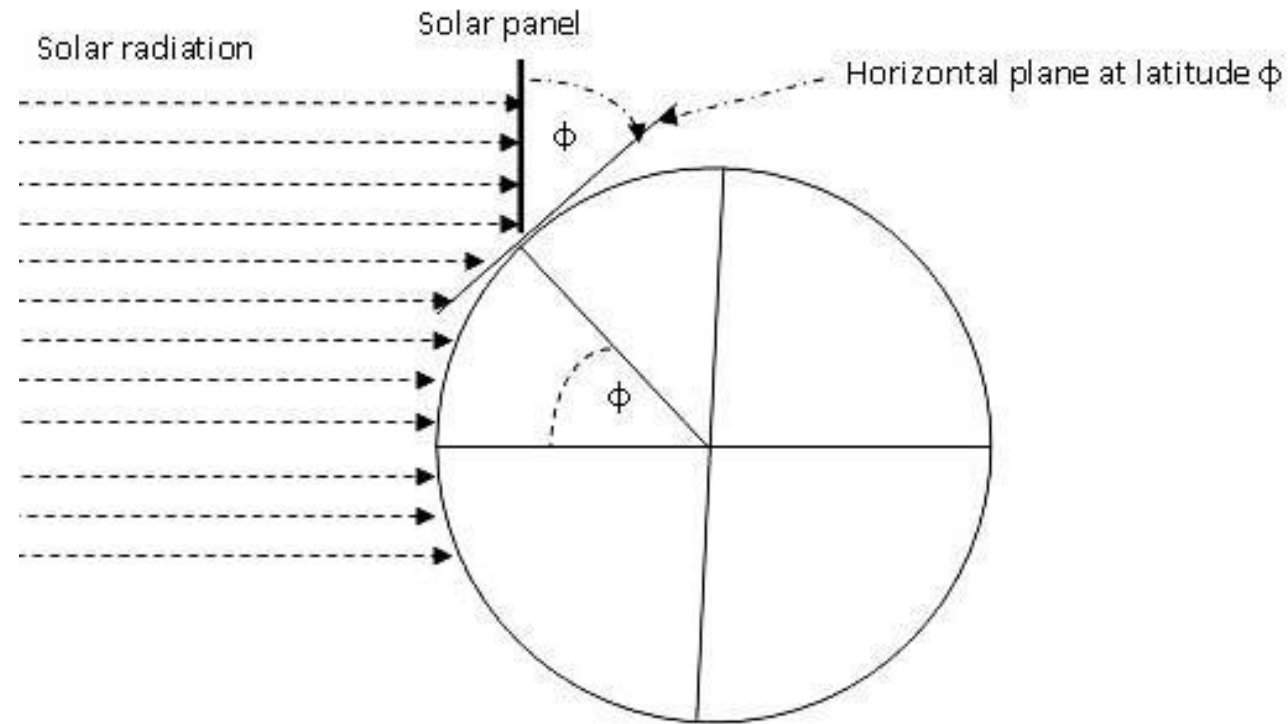


Perdas com relação ao máximo:

β : 0,2% /° (entorno $\pm 15^\circ$)

α : 0,05% /° (entorno $\pm 25^\circ$)

Inclinação Igual à Latitude



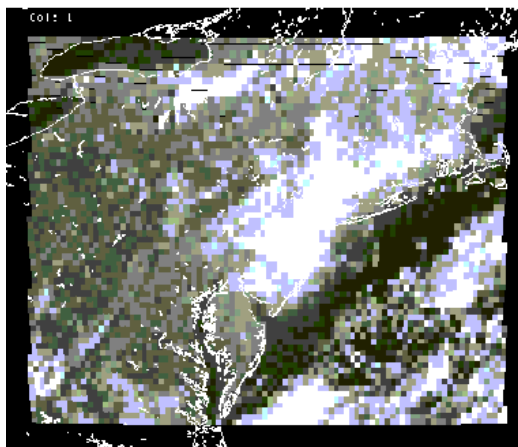
Redução do ângulo de incidência máximo ao longo do ano.

Irradiação global

- Medidas diretas



- Medidas indiretas
 - Horas de sol
 - Satélite



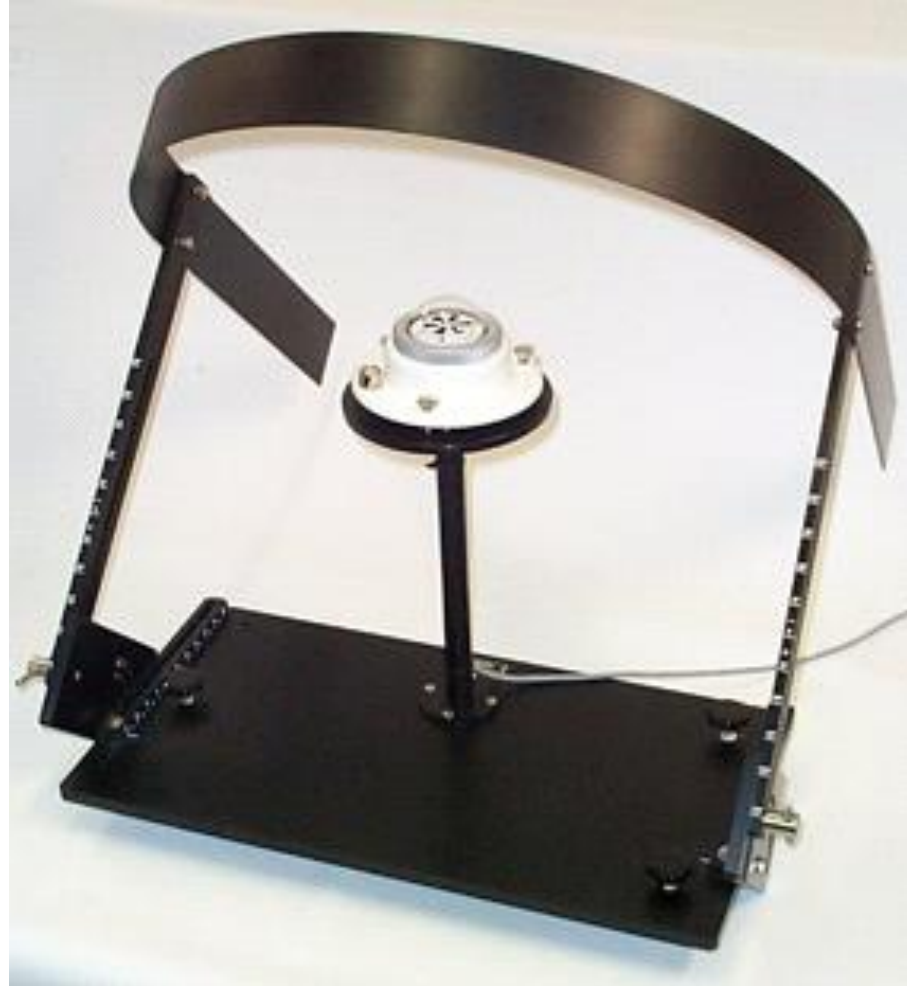
Pireliômetro



Piranômetro



Piranômetro com Banda de Sombra



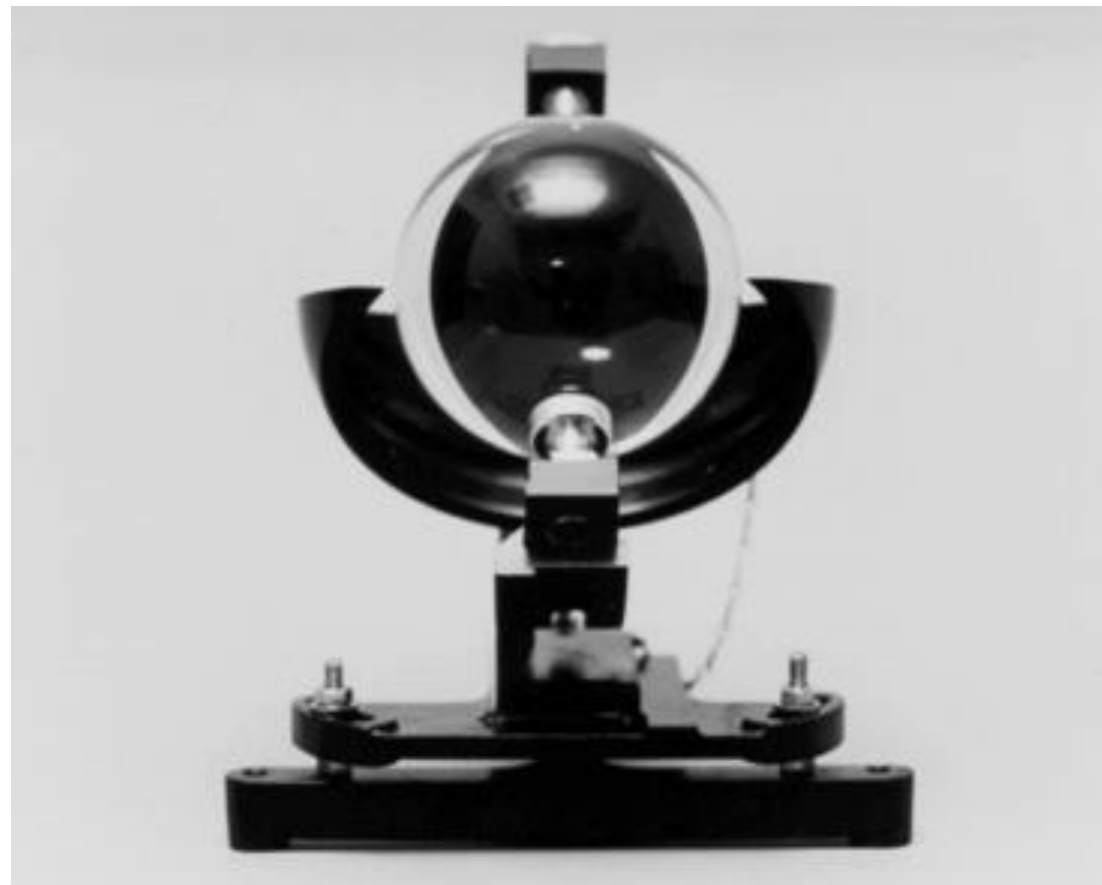
Piranômetro Fotovoltaico

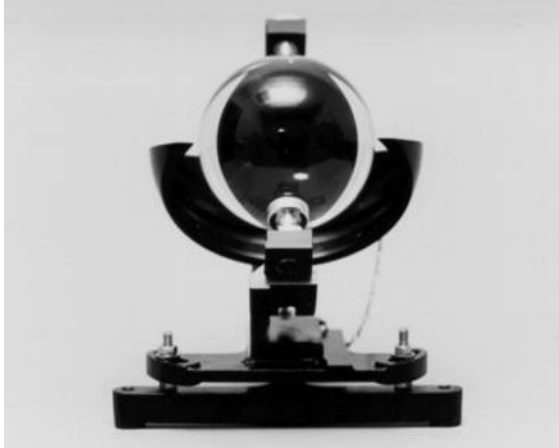


Piranômetro de Precisão



Heliógrafo



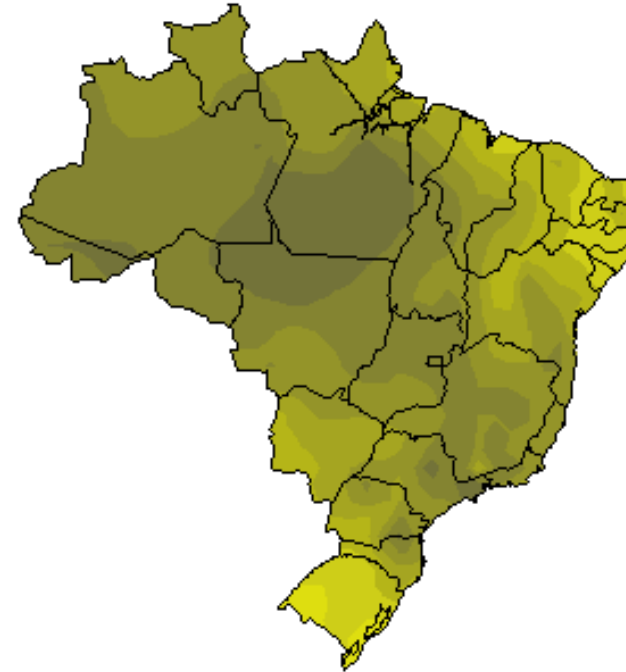


Insolação = horas de sol por mês

Page

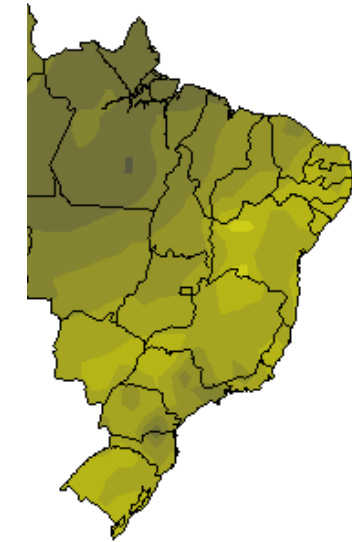
$$H / H_o = a + b (n / N_d)$$

INSOLAÇÃO - DEZEMBRO



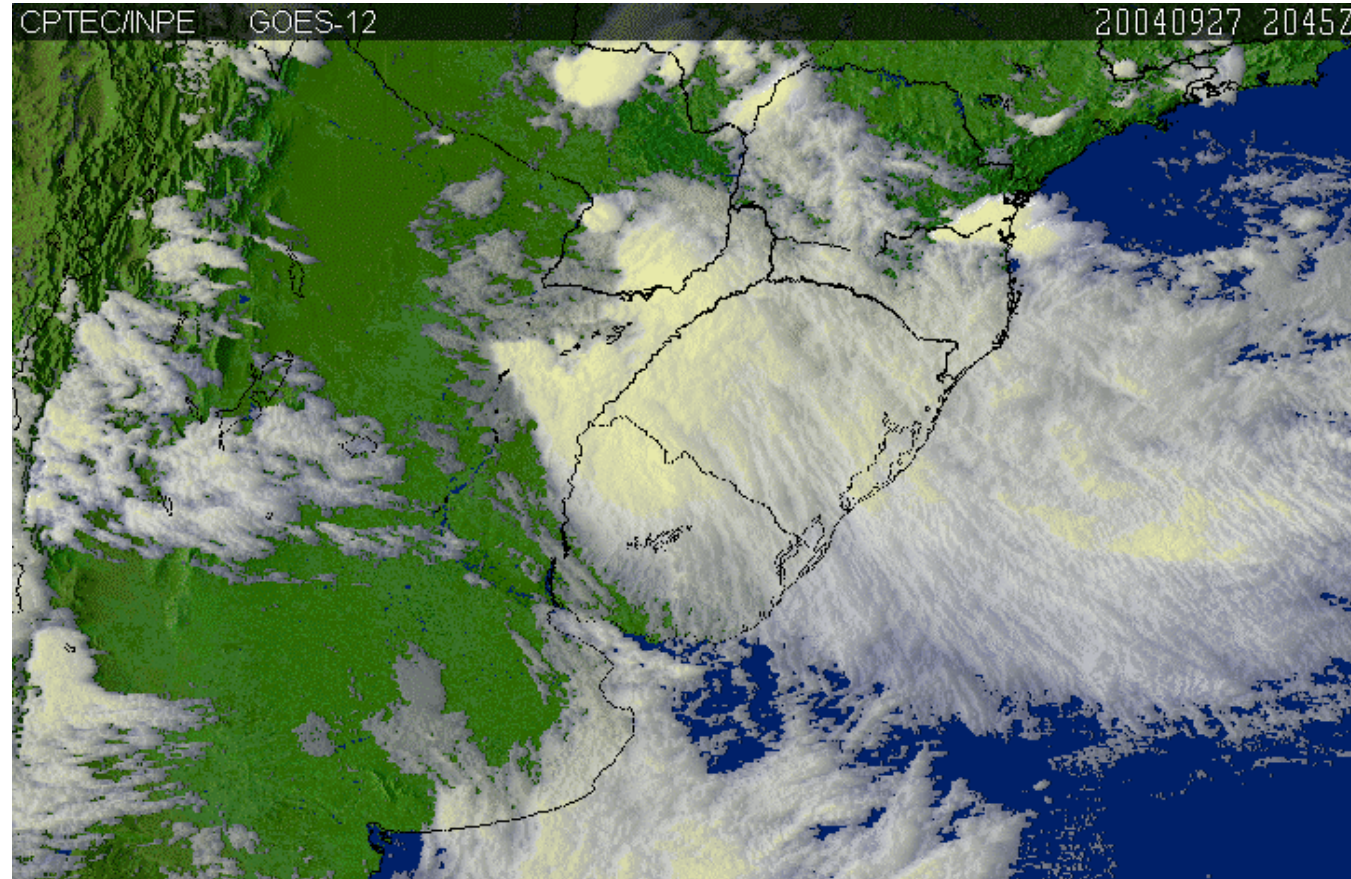
Fonte: INMET 1931/1990

IARÇO



131/1990

Modelos a partir de imagens de satélites



Compilações de dados terrestres e de satélite

Atlas UFSC

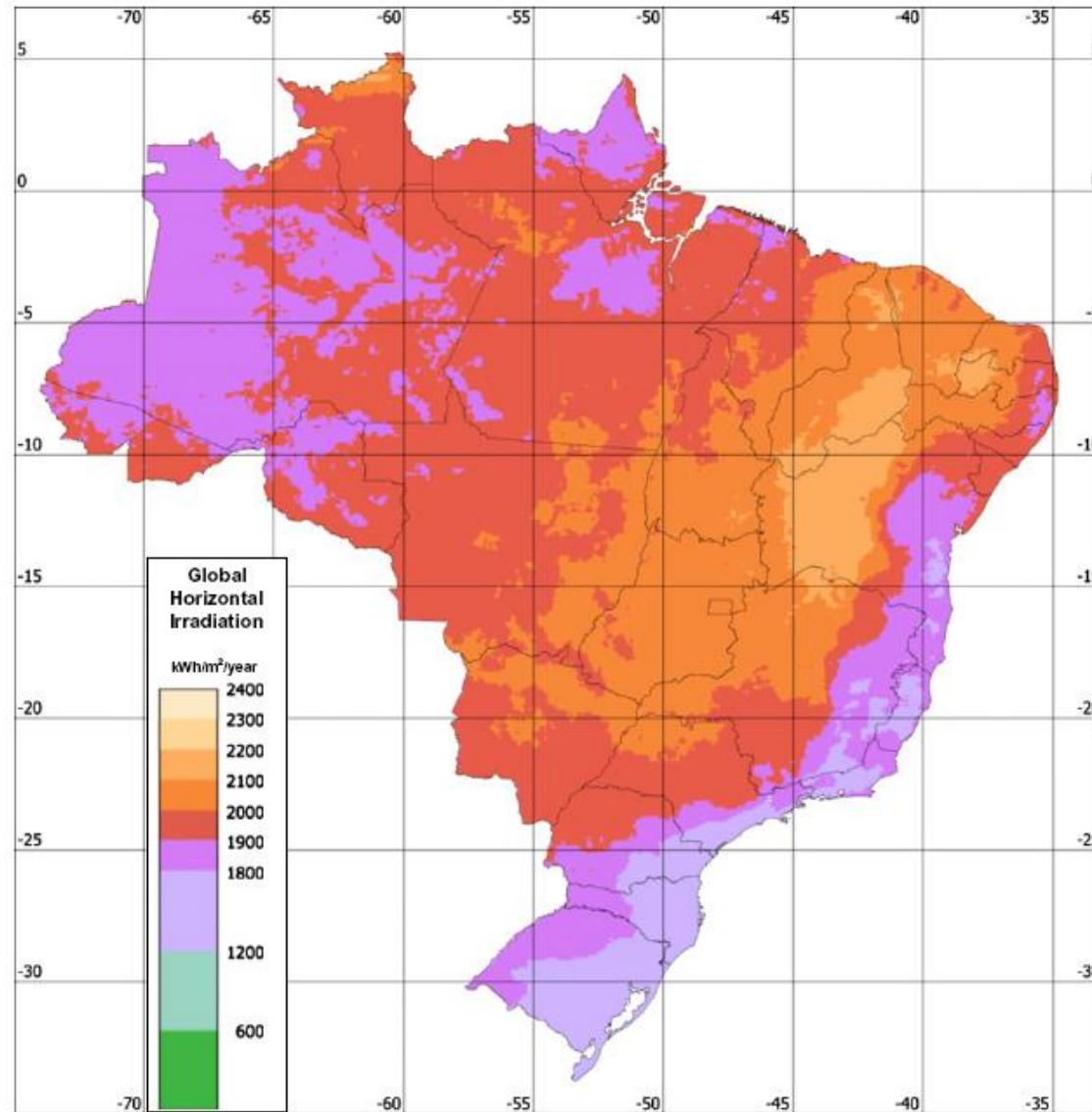


compilação e tratamento dos dados

SWERA

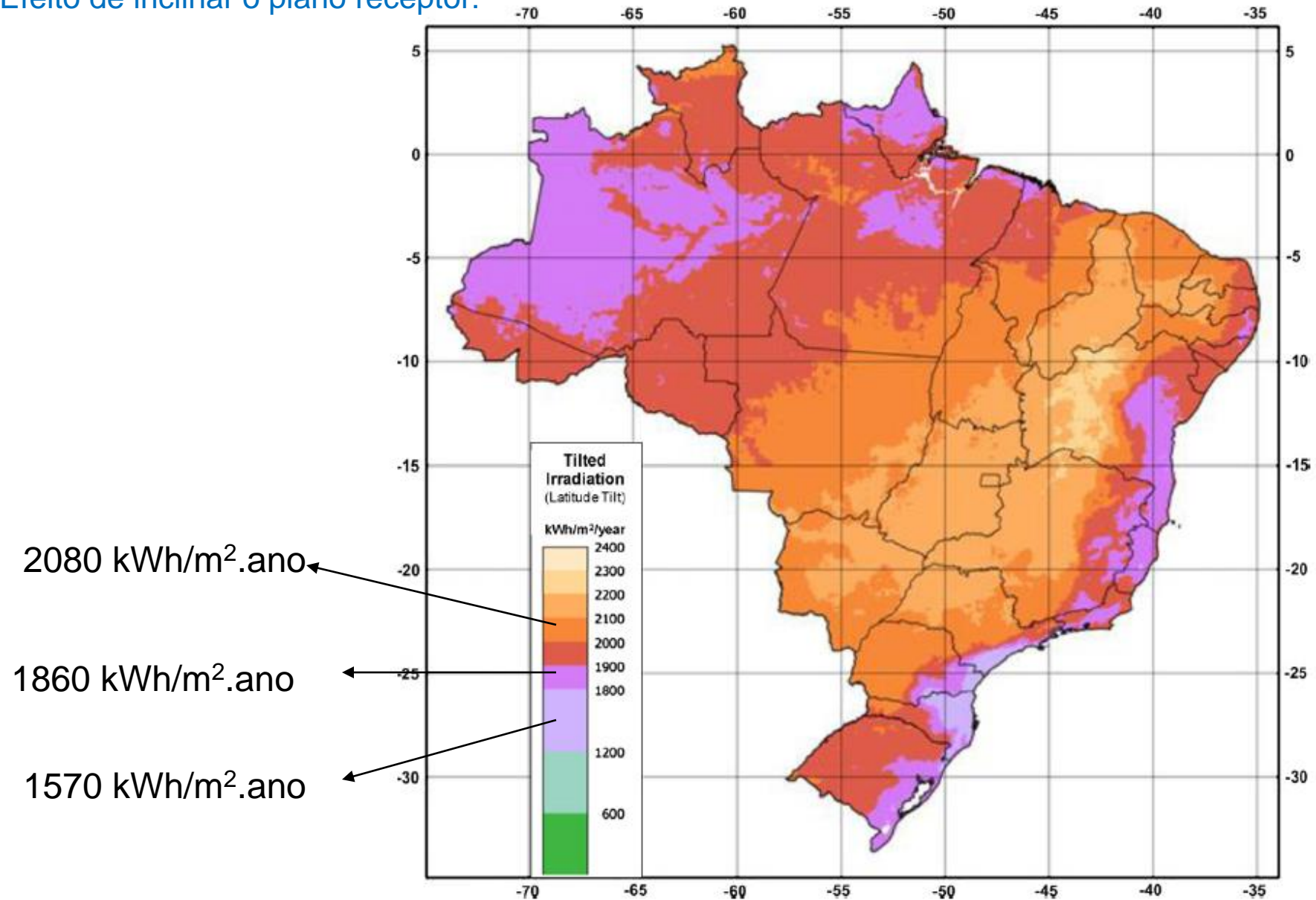
- Compilação das principais bases de coleta de dados solares e eólicos
- Compilação de dados auxiliares tais como dados sobre rede de distribuição de eletricidade, malha viária, população e dados sócio econômicos, etc..
- Ferramenta de análise GIS para identificação de área potenciais para exploração e montagem do banco de dados/metadados

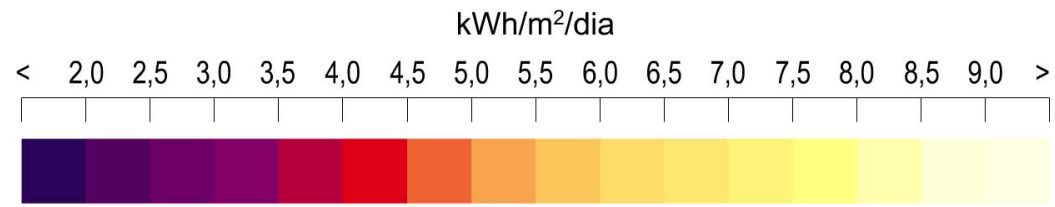
SOFTWARES



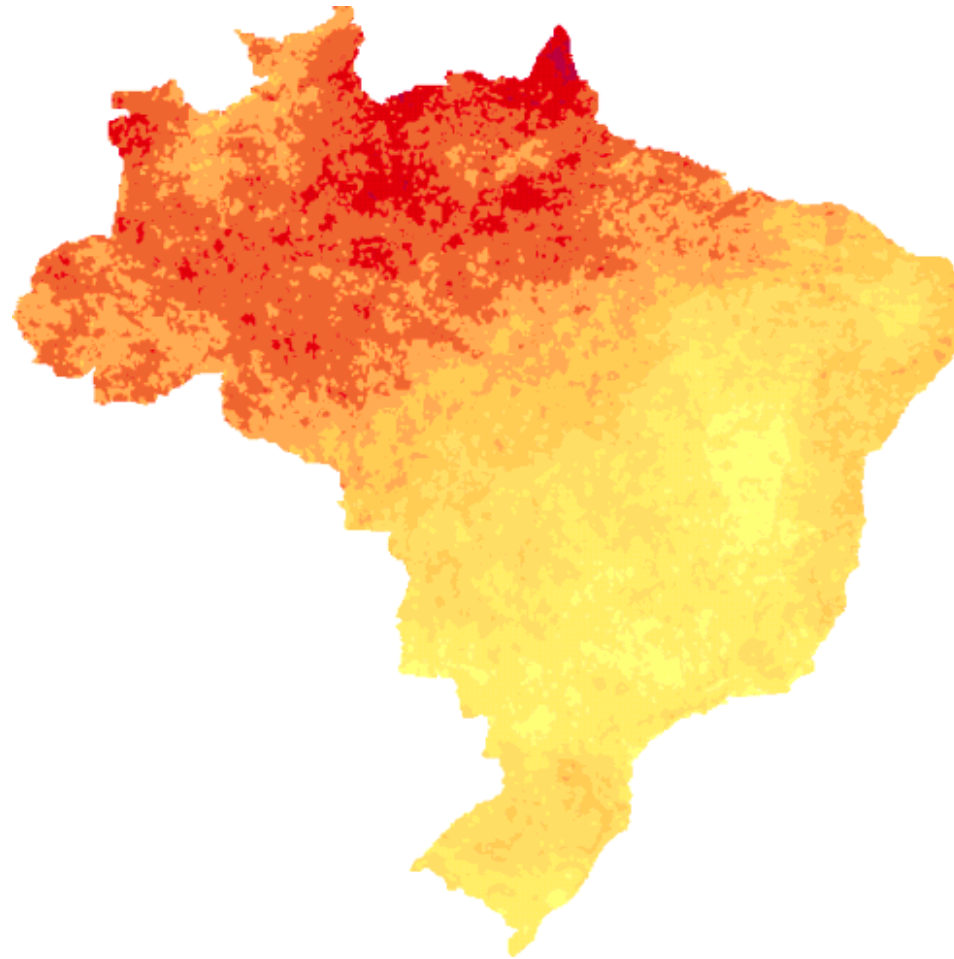
Viana et al, Solar Energy 85, 2011, 586-495

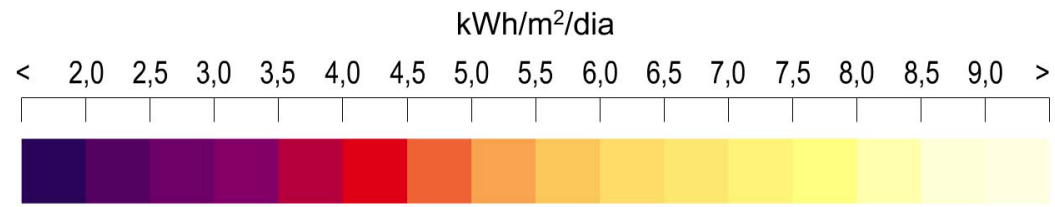
Efeito de inclinar o plano receptor:



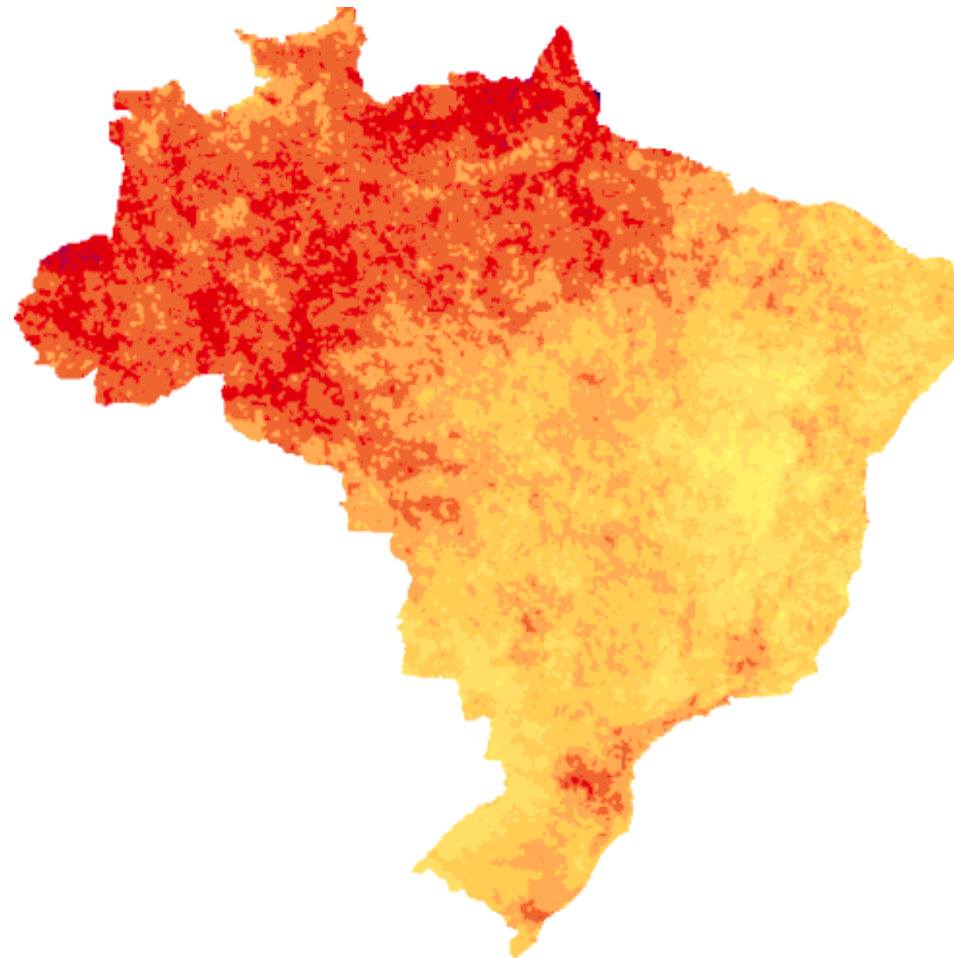


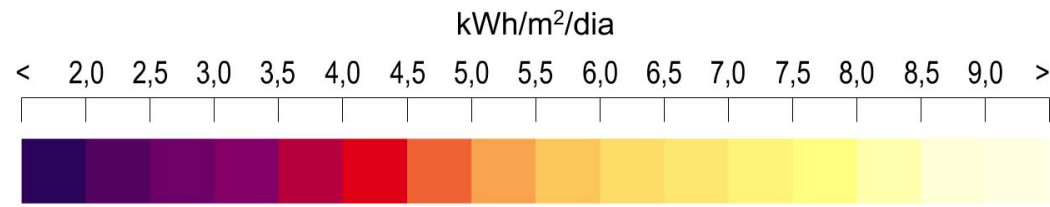
JANEIRO



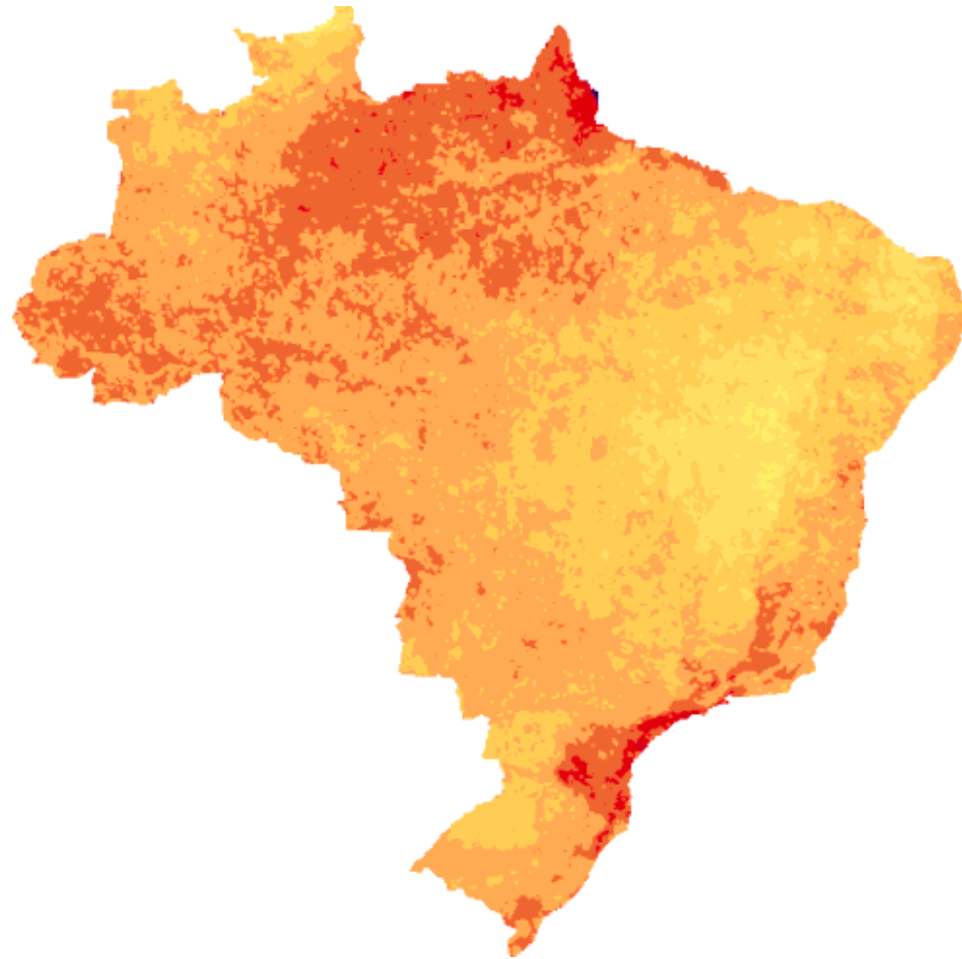


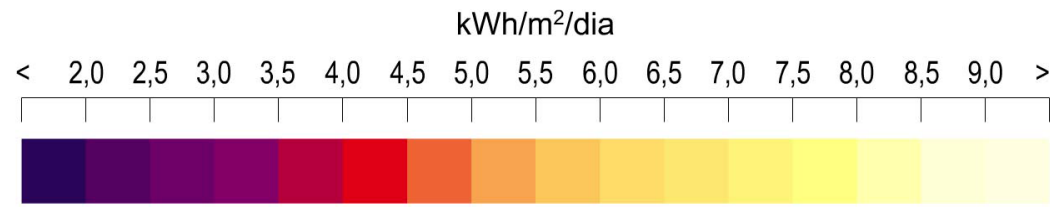
FEVEREIRO



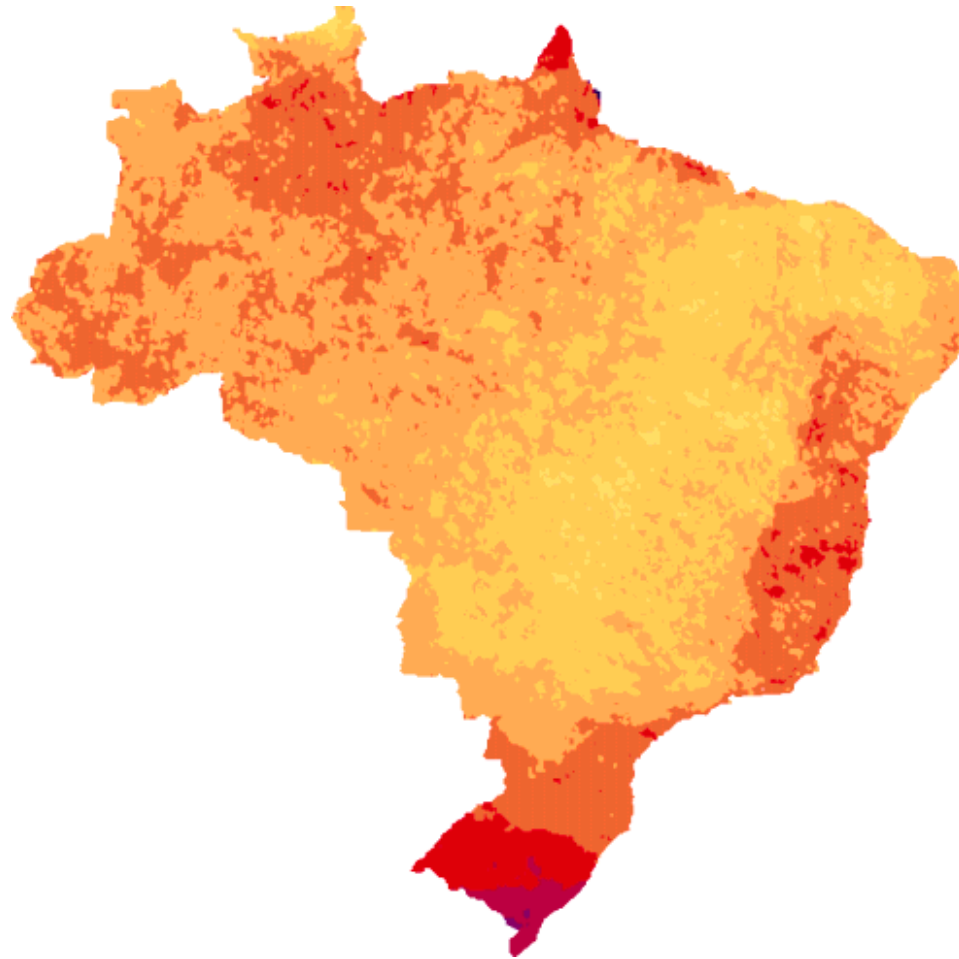


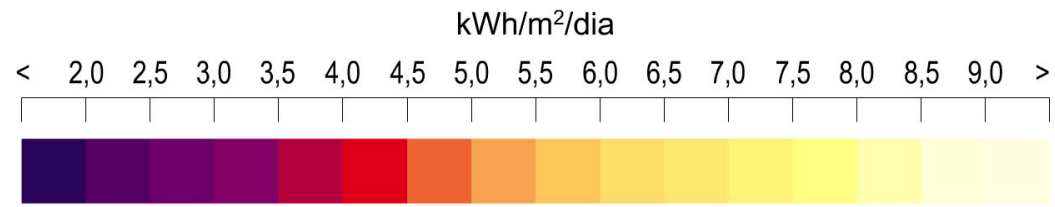
MARÇO



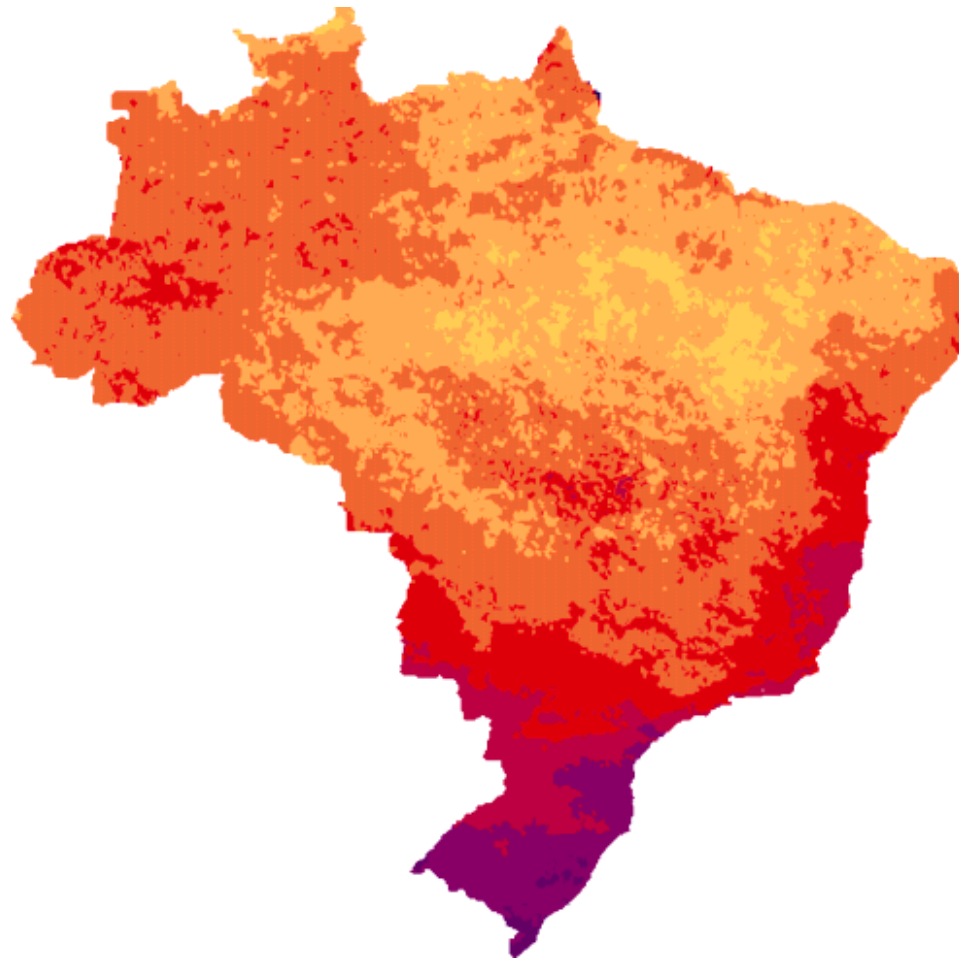


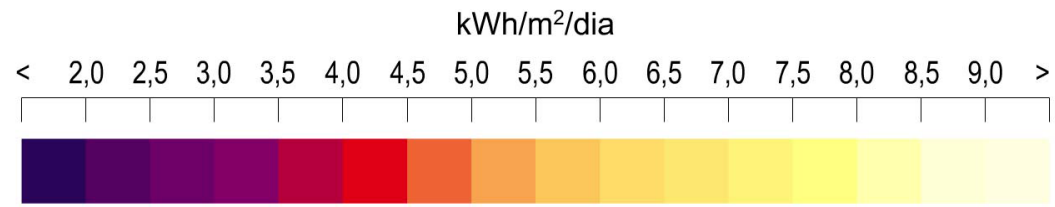
ABRIL





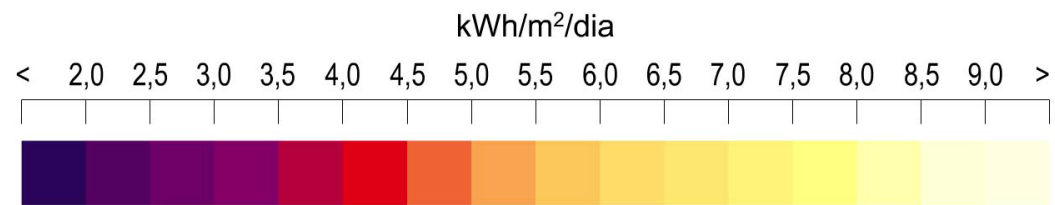
MAIO





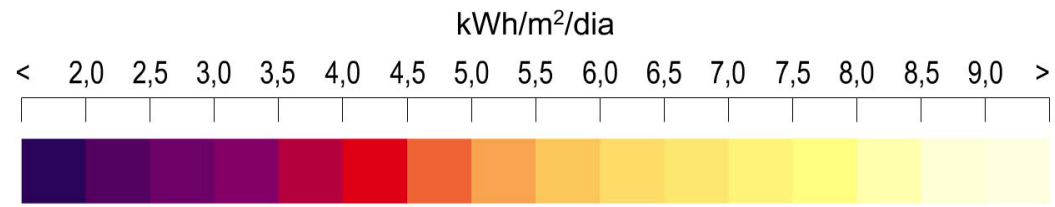
JUNHO



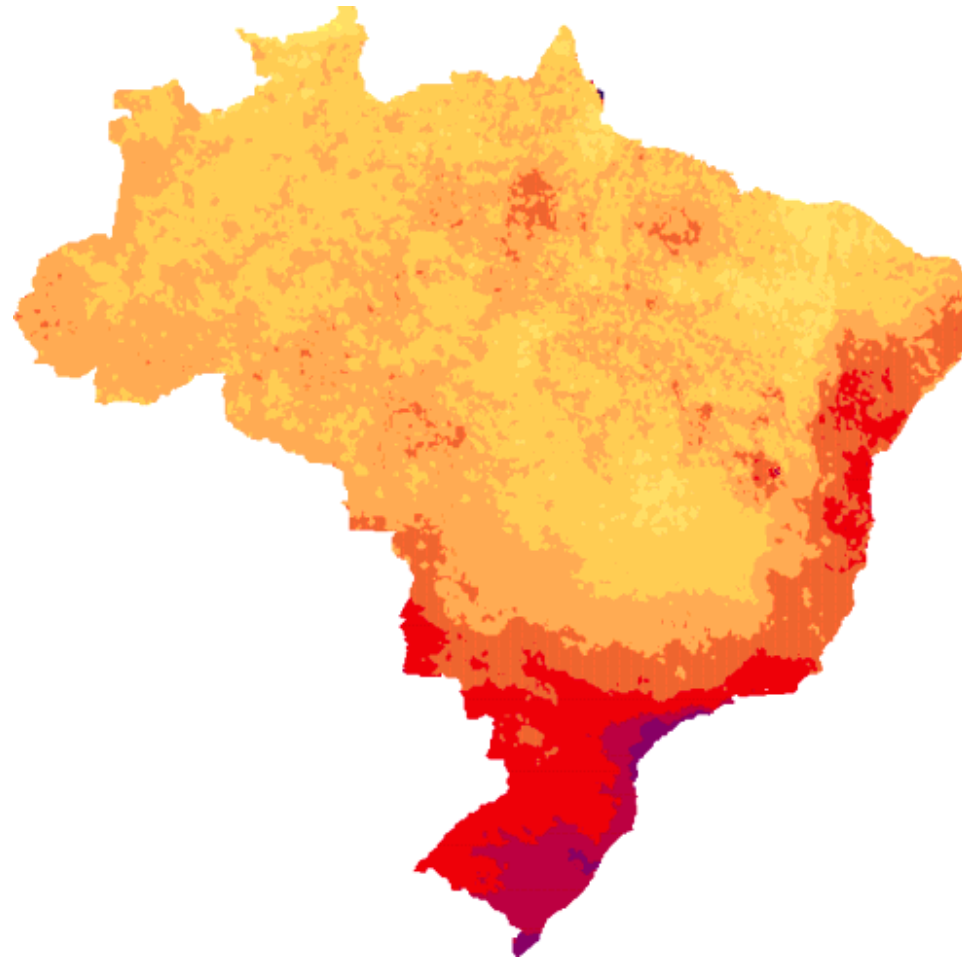


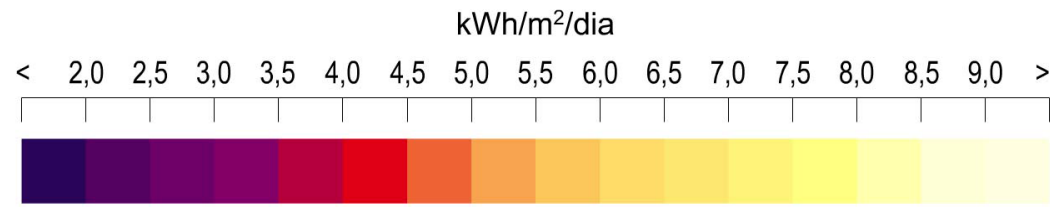
JULHO



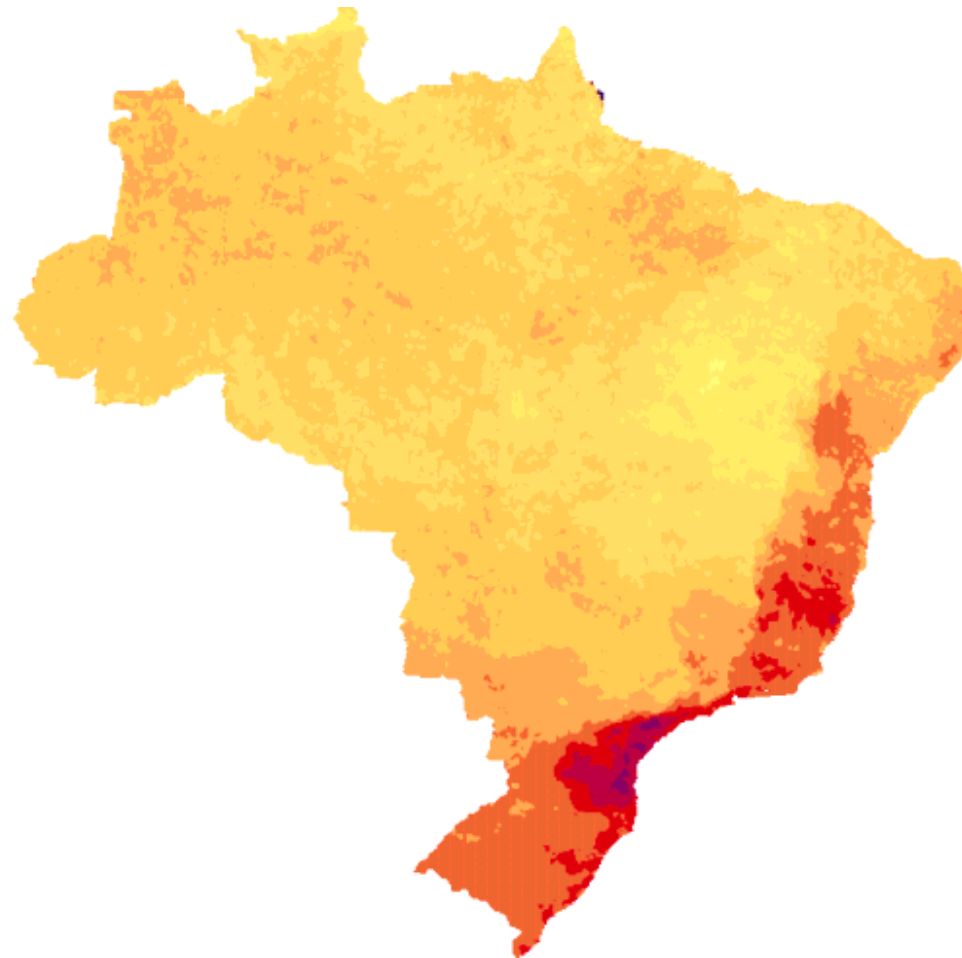


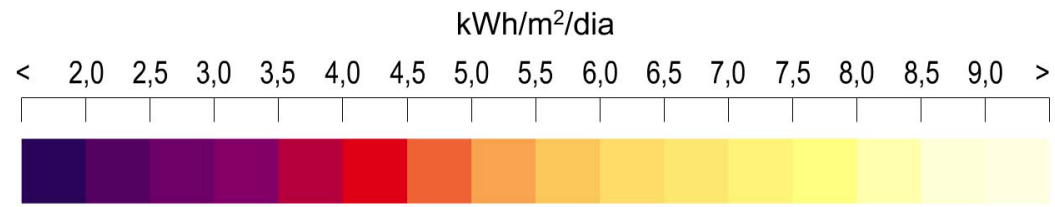
AGOSTO





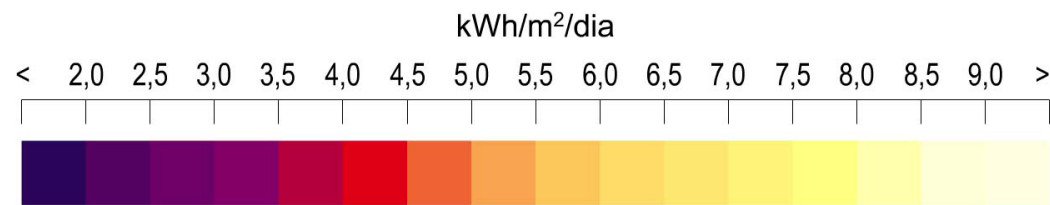
SETEMBRO





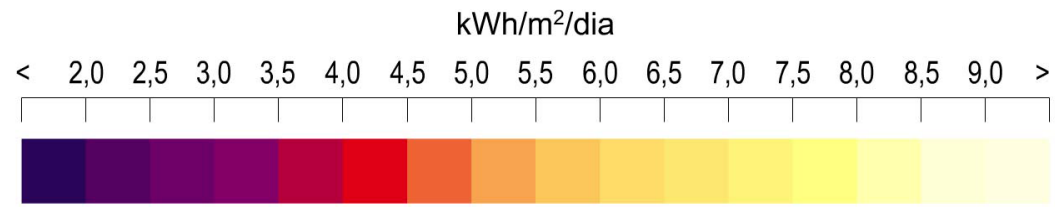
OUTUBRO





NOVEMBRO





DEZEMBRO



Radiação solar média diária no coletor inclinado de 10° N - Manaus/AM

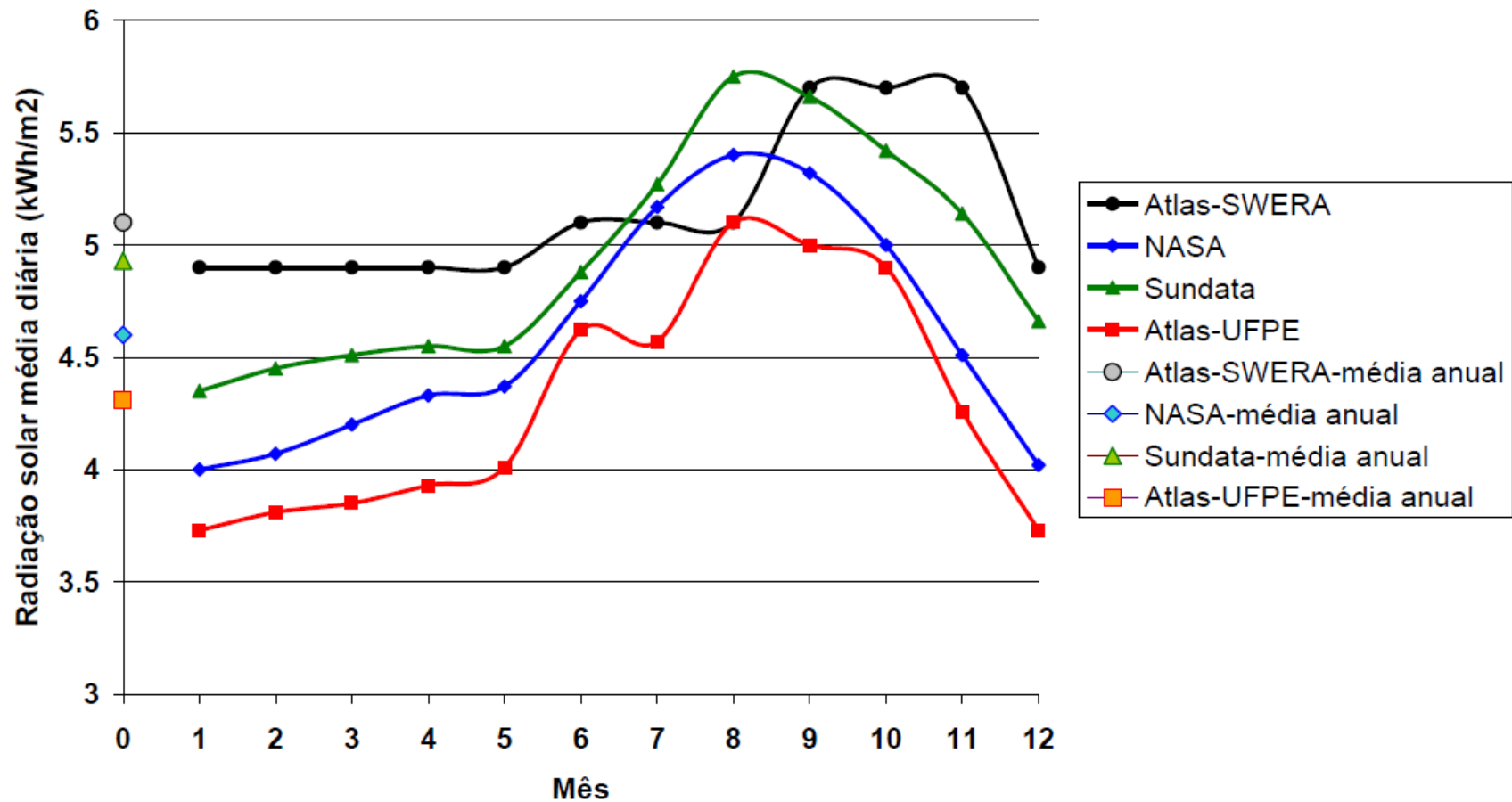
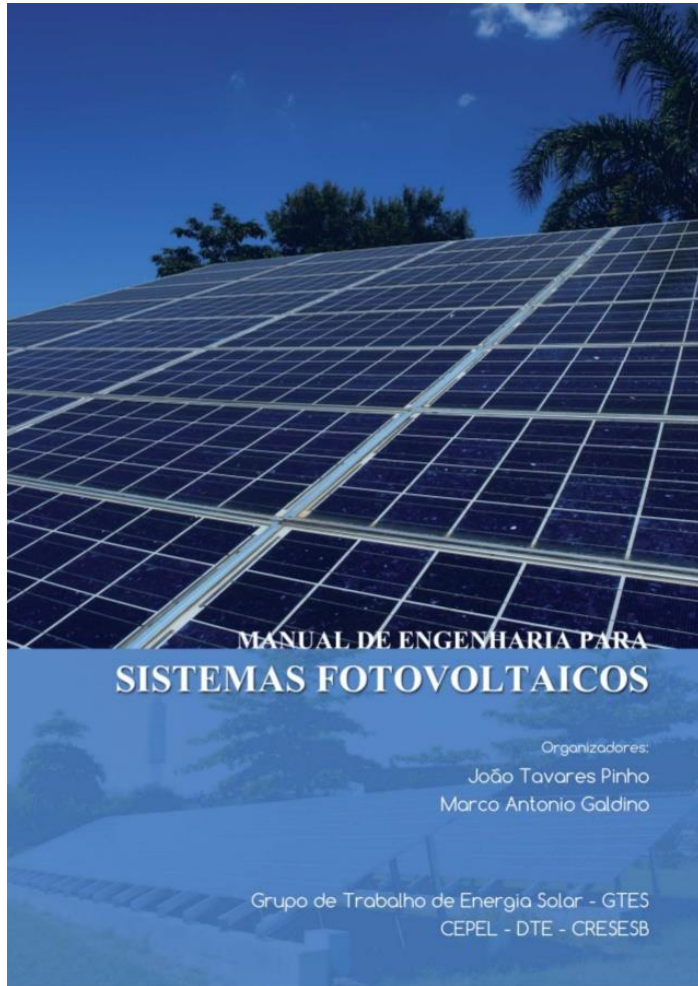


Figura 2.22 - Médias mensais e anual da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10°N na região de Manaus. A média anual de cada série está mostrada por um símbolo sobre o eixo vertical no "mês zero". Cada série é proveniente de um banco de dados diferente. Fonte: (SOARES et al., 2010).

Onde recorrer? – dados de irradiação solar

<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>

http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html



CAPÍTULO 2 – RECURSO SOLAR

2.1 – O Sol e suas características

2.2 – Geometria Sol-Terra

2.3 – Radiação solar sobre a terra

2.3.1 – Distribuição da irradiação solar média diária no mundo

2.4 – Instrumentos de medição da radiação solar

2.5 – Potencial solar e sua avaliação

2.6 – Tratamento e análise dos dados solarimétricos

2.6.1 – Avaliação da qualidade dos dados medidos

2.6.2 – Tratamento dos dados primários e sua análise

2.7 – Bases de dados solarimétricos e programas computacionais

2.7.1 – Informações a partir de medições de superfície

2.7.2 – Informações a partir de medições por satélites