

Energía Solar Térmica - 2020

REPASO - I : Radiación solar

Agustín Laguarda

agu.laguarda@gmail.com



LES
LABORATORIO DE
ENERGÍA SOLAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Energía Solar Térmica - 2020

Repaso de radiación solar

Repaso basado en las notas del curso Fundamentos del Recurso Solar (G.Abal, R.Alonso-Suárez, A.Laguarda)

Notas del curso accesibles en

https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/313487/mod_resource/content/1/FRS_notas_v4-0_R2_2020.pdf

Lista de ejercicios de repaso en:

<https://eva.fing.edu.uy/mod/folder/view.php?id=42267>

Por consultas de ejercicios dirigirse a
agu.laguarda@gmail.com

Energía Solar Térmica - 2020

constante solar

movimiento aparente del Sol

diagrama solar

efecto de la atmósfera (muuy resumido)

espectro solar

Constante Solar

La irradiancia solar media incidente (W/m^2) sobre una superficie normal a la dirección Tierra-Sol ubicada en TOA cuando la tierra está a 1 UA del Sol es aproximadamente constante.

Tope de la atmósfera

$$1 \text{ UA} = R_0 = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$$

Esta irradiancia es el punto de partida de todos los cálculos de irradiación solar incidente en la superficie de la Tierra.

El Sol es prácticamente una fuente puntual para la Tierra:

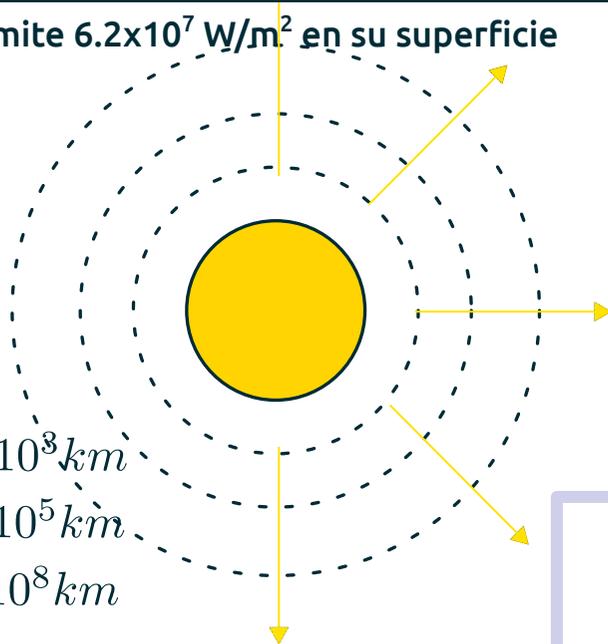
$$G_{sc} = \frac{P_{Sol}}{4\pi R_0^2} \simeq 1361 W/m^2$$

valor convencional de la constante solar

Sin embargo esta cantidad varía debido a la actividad solar (ciclos de 11 años, o de varias décadas)

Constante Solar

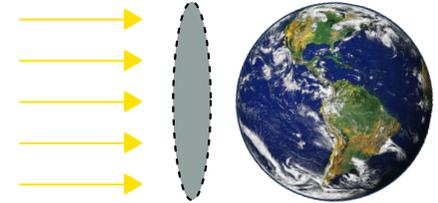
El Sol emite $6.2 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ en su superficie



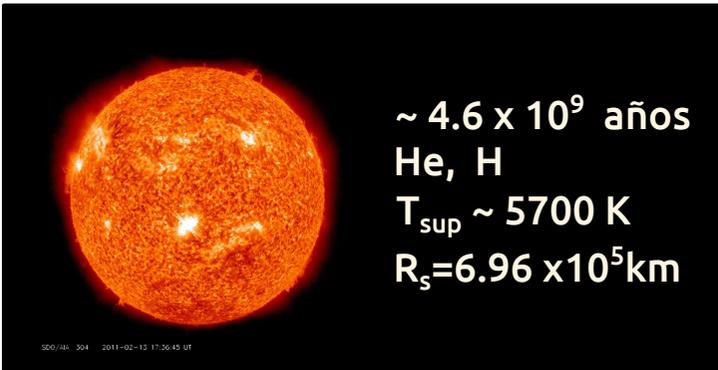
$$R_T \simeq 6.4 \times 10^3 \text{ km}$$

$$R_S \simeq 7.0 \times 10^5 \text{ km}$$

$$R_0 \simeq 1.5 \times 10^8 \text{ km}$$



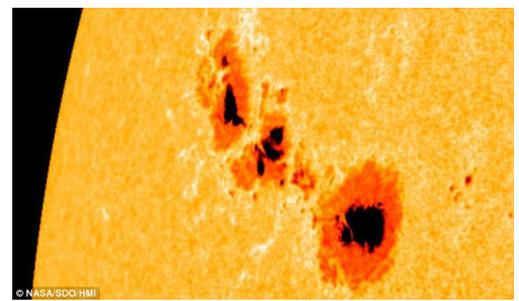
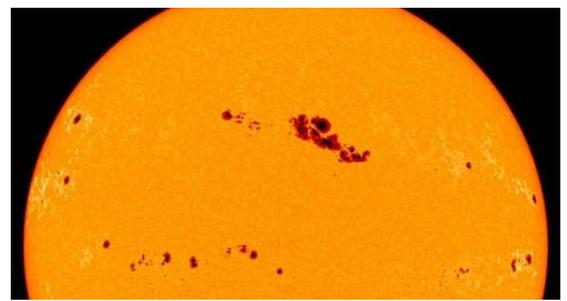
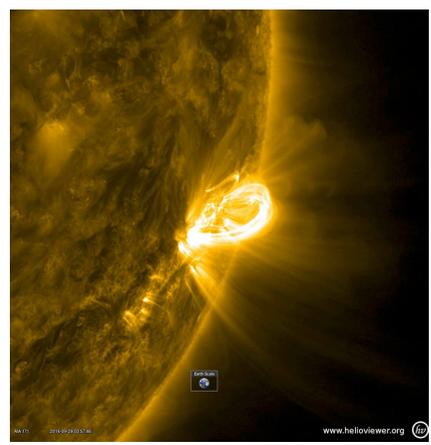
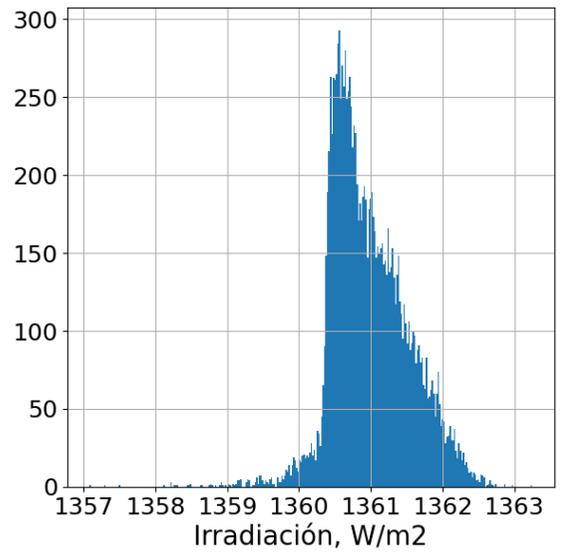
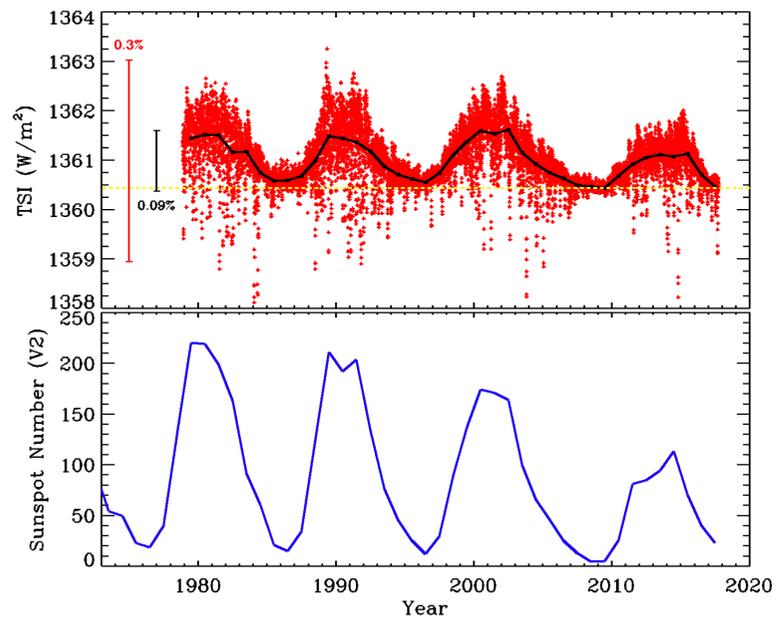
$$G_{sc} = \frac{P_{Sol}}{4\pi R_0^2} \simeq 1361 \text{ W/m}^2$$



La irradiancia media sobre la Tierra es

$$\langle G \rangle = \frac{G_{sc}}{4} = 340 \text{ W/m}^2$$

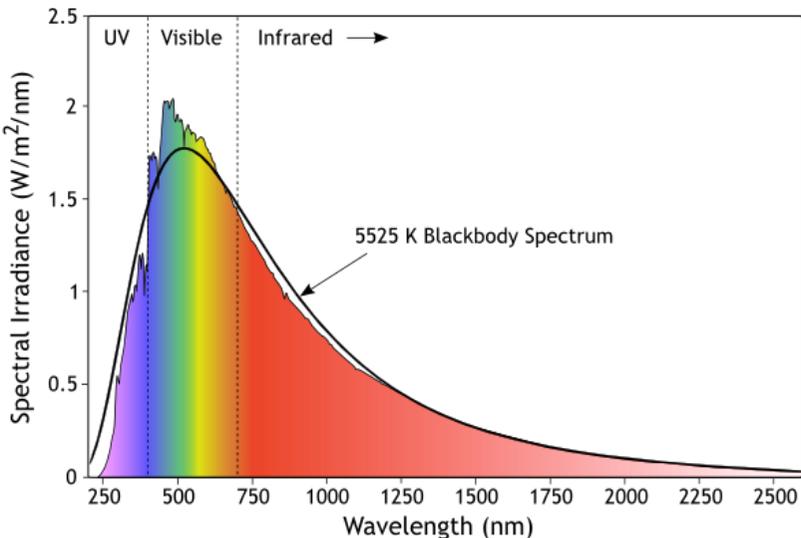
Constante Solar



© NASA/SDO/HMI

Constante Solar

Distribución espectral TOA



Tope de la atmósfera			
banda espectral	rango (nm)	cuerpo negro T = 5778 K (%)	ASTM-E490 (%)
UV-C	0 - 280	2.1	0.5
UV-B	280 - 315	2.0	1.2
UV-A	315 - 400	8.0	6.0
VIS	400 - 700	36.7	38.8
N-IR	700 - 5000	50.7	53.0
IR-T	5000 - ∞	0.5	0.5

8 %
39 %
53 %

Estándares espectrales disponibles:

Emisión de cuerpo negro:

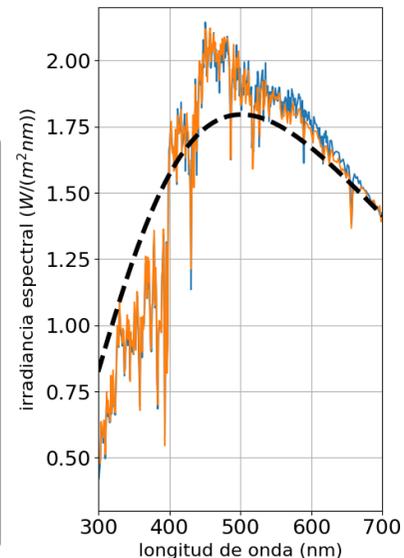
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/k_b\lambda T} - 1)}$$

Wherli (WRC):

<ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/SolarReferenceSpectrum>

E490 (NOAA):

<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>



Energía Solar Térmica - 2020

constante solar

movimiento aparente del Sol

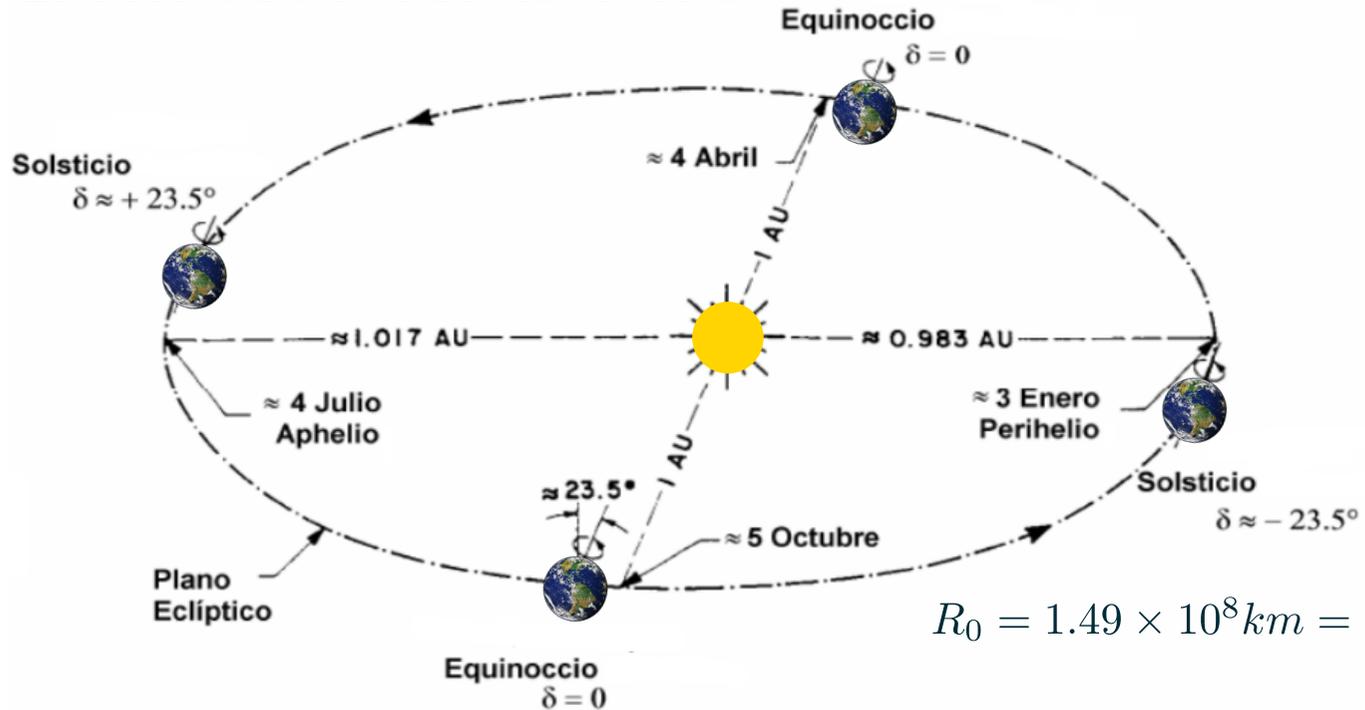
diagrama solar

efecto de la atmósfera (muuy resumido)

espectro solar

Factor orbital

La distancia Tierra-Sol es variable



$$R_0 = 1.49 \times 10^8 \text{ km} = 1 \text{ UA}$$

Irradiancia TOA a distancia R_0

$$G_{sc} = \frac{P_{Sol}}{4\pi R_0^2}$$

Irradiancia TOA a distancia R

$$G_0 = \frac{P_{Sol}}{4\pi R^2}$$

$$G_0 = G_{sc} \times \left(\frac{R_0}{R} \right)^2$$

factor orbital ~ 1
depende del día del año

Factor orbital

Parametrizaciones del factor orbital

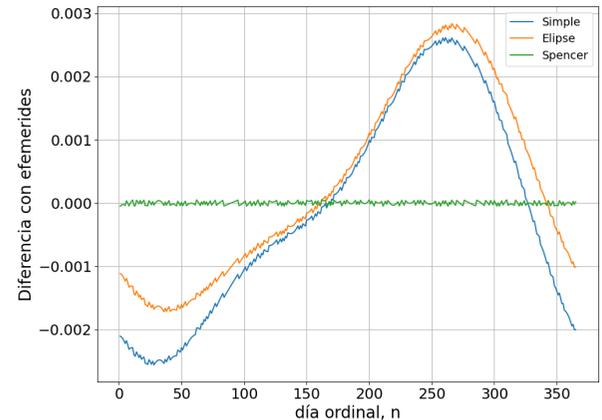
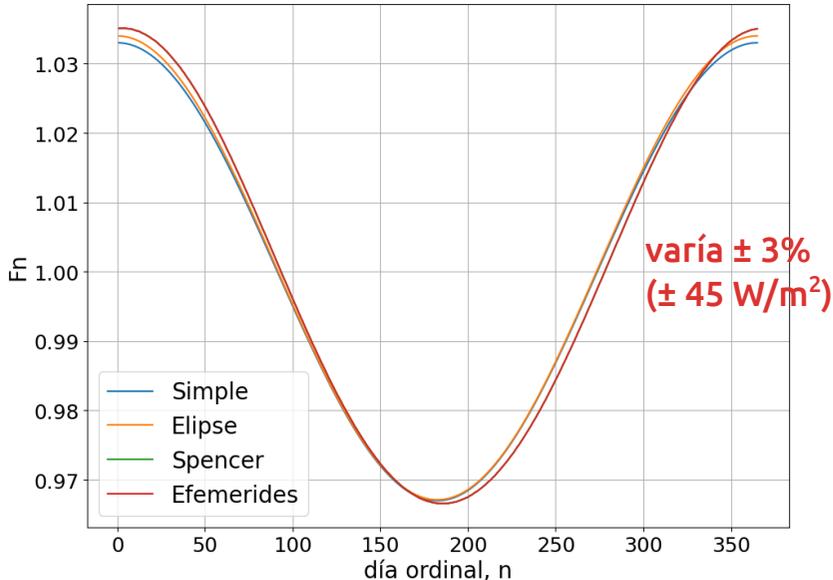
Órbita elíptica:

$$F_n = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 = \frac{(1 + \epsilon \cos \varphi)^2}{1 - \epsilon^2} \simeq 1 + 2\epsilon \cos \varphi \simeq 1 + 0.033 \cos(\varphi_n)$$

Spencer:

$$F_n = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 = 2.000220 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin(\Gamma) + 0.000719 \cos(2\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365}$$

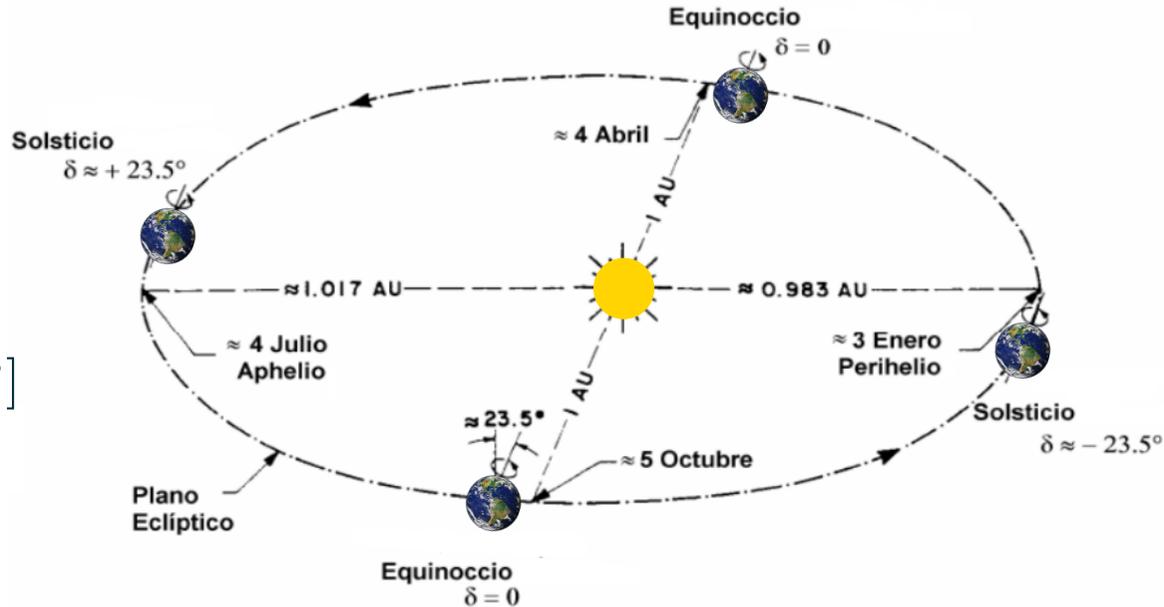


diferencia con valores tabulados $< 10^{-4}$
para Spencer

Declinación solar

Declinación solar:
Es el ángulo entre
los planos orbital
y ecuatorial

$$\delta \in [-23.5^\circ, 23.5^\circ]$$



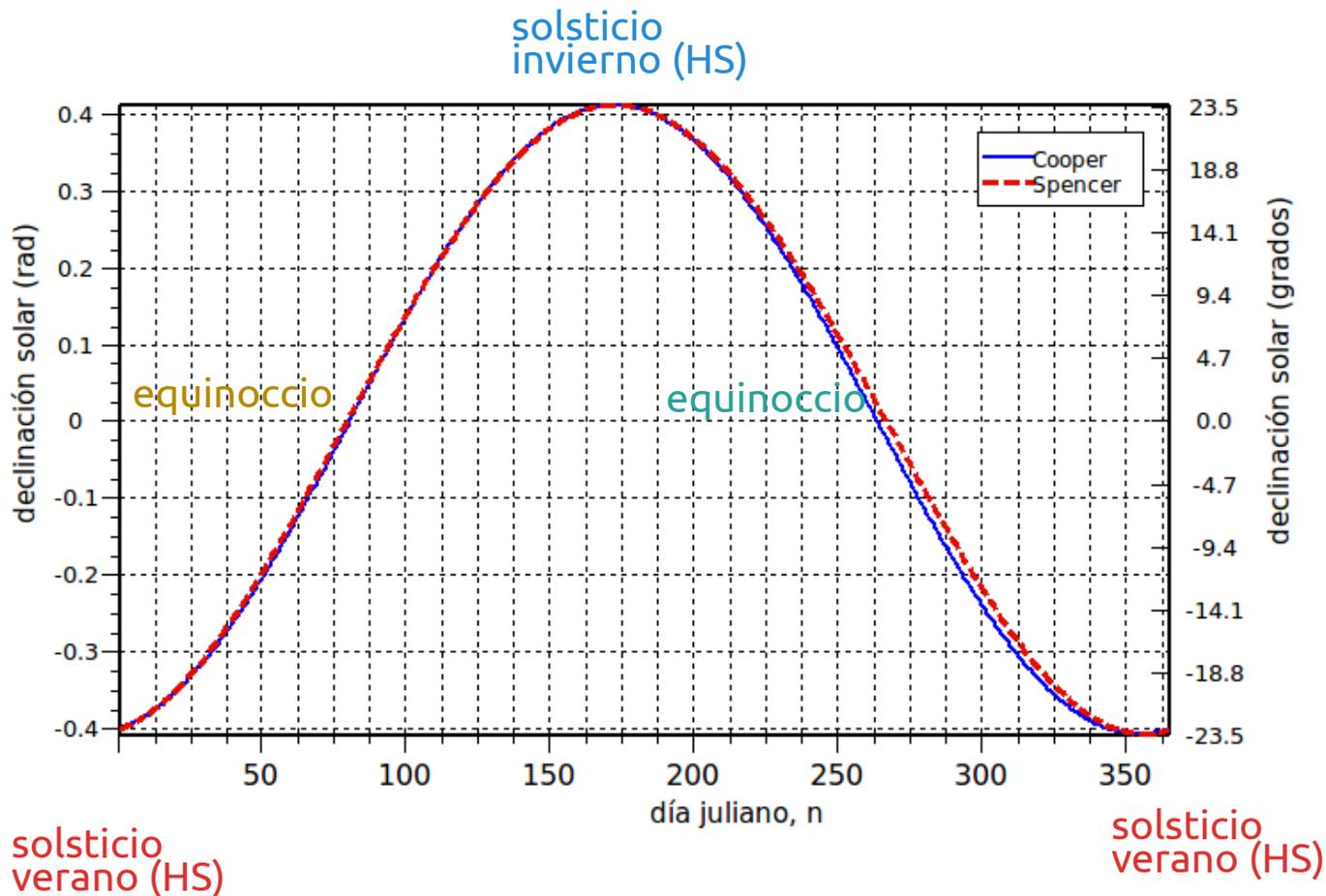
Parametrizaciones:

Simple:
$$\delta = \delta_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right]$$

Spencer:
$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos(\Gamma) + 0.070257 \sin(\Gamma) - 0.006758 \cos(2\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma) - 0.002697 \cos(3\Gamma) + 0.00148 \sin(3\Gamma)$$

error
< 3' de arco

Declinación solar



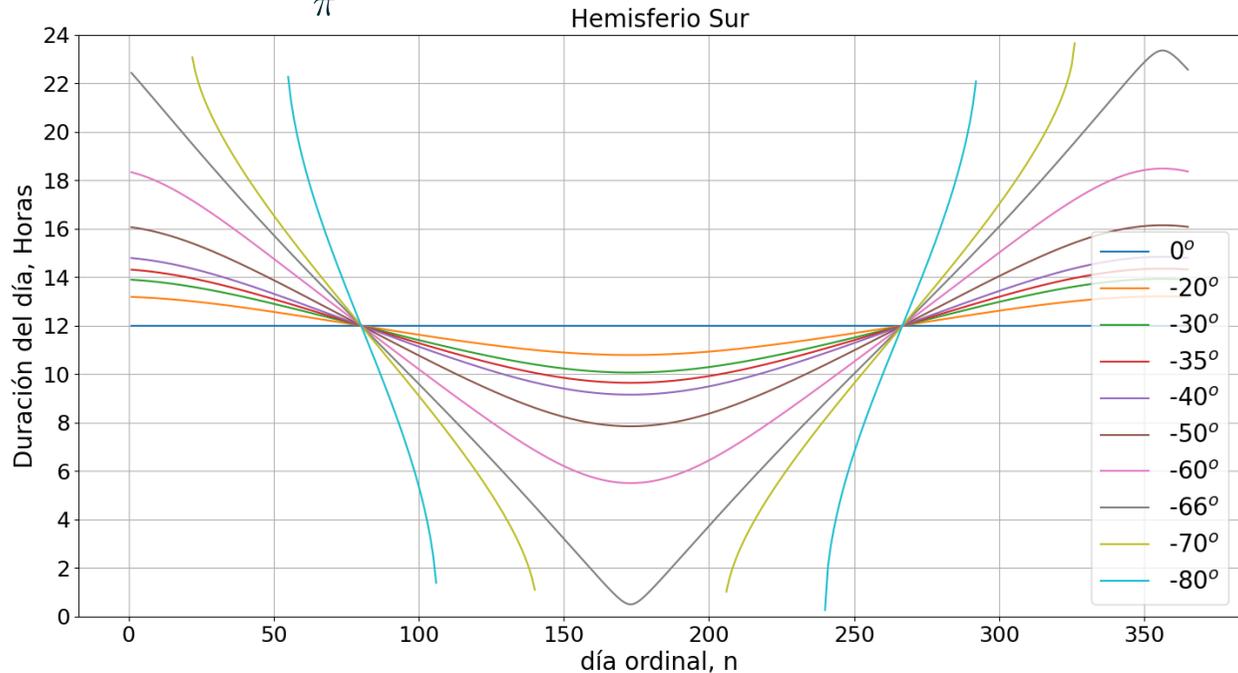
Algunas consideraciones - 1

- ω determina el tiempo solar aparente (reloj de sol). $T_s = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi}\right)$

- ω es por convención es negativo en am y positivo en pm

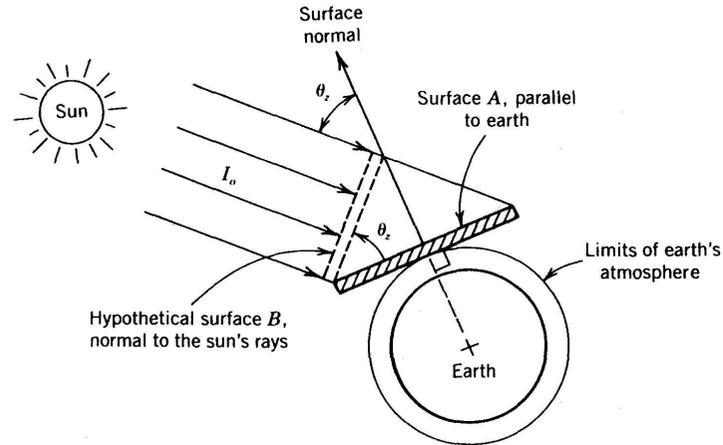
-si se impone ángulo cenital = 90° se tiene el ángulo horario en el amanecer atardecer. $\cos \omega_s = \pm(-\tan \delta \tan \phi)$

-con ω_s se calcula la duración de las horas de luz en función de la lat. y el día del año.
$$N(\phi, n) = \frac{12}{\pi} \times 2\omega_s$$



Algunas consideraciones - 2

Conocer el ángulo cenital, θ_z , permite calcular la irradiancia en un plano horizontal en TOA



irradiancia (W/m^2) $G_{oh} = G_{sc} F_n \cos \theta_z$

irradiación horaria
(Wh/m^2)

$$I_{oh} = I_{sc} F_n \cos \theta_z$$

θ_z debe calcularse en
el centro del intervalo

$$I_{sc} = 1361 \text{Wh}/\text{m}^2$$

irradiación diaria
(Wh/m^2 o MJ/m^2)
(sin demostrar)

$$H_{oh} = \frac{24}{\pi} I_{sc} F_n (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi)$$

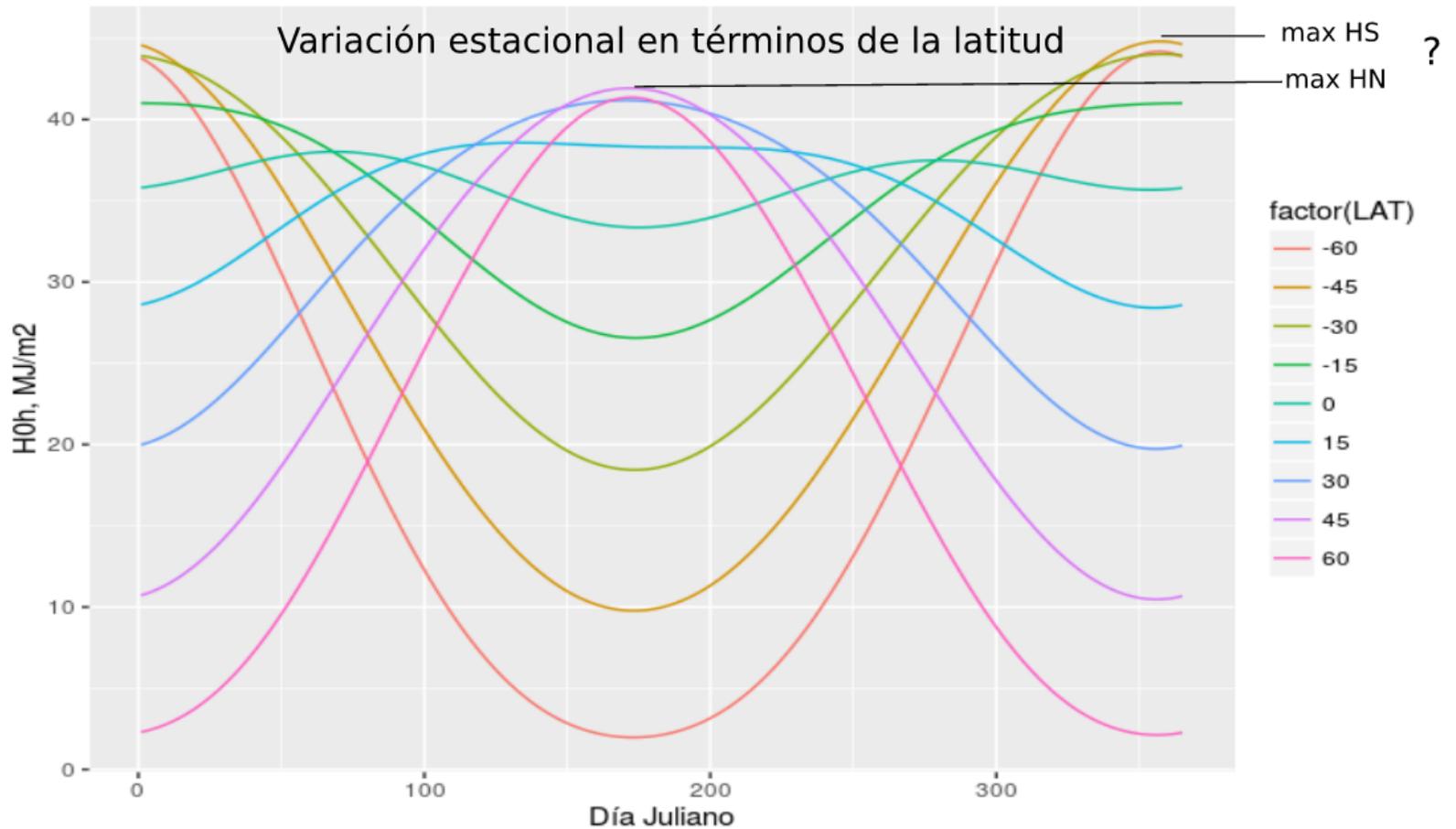
valores del orden de $\sim 37 \text{MJ}/\text{m}^2$ o $10 \text{kWh}/\text{m}^2$

aproximadamente la mitad llega a la superficie terrestre por el efecto de la atmósfera

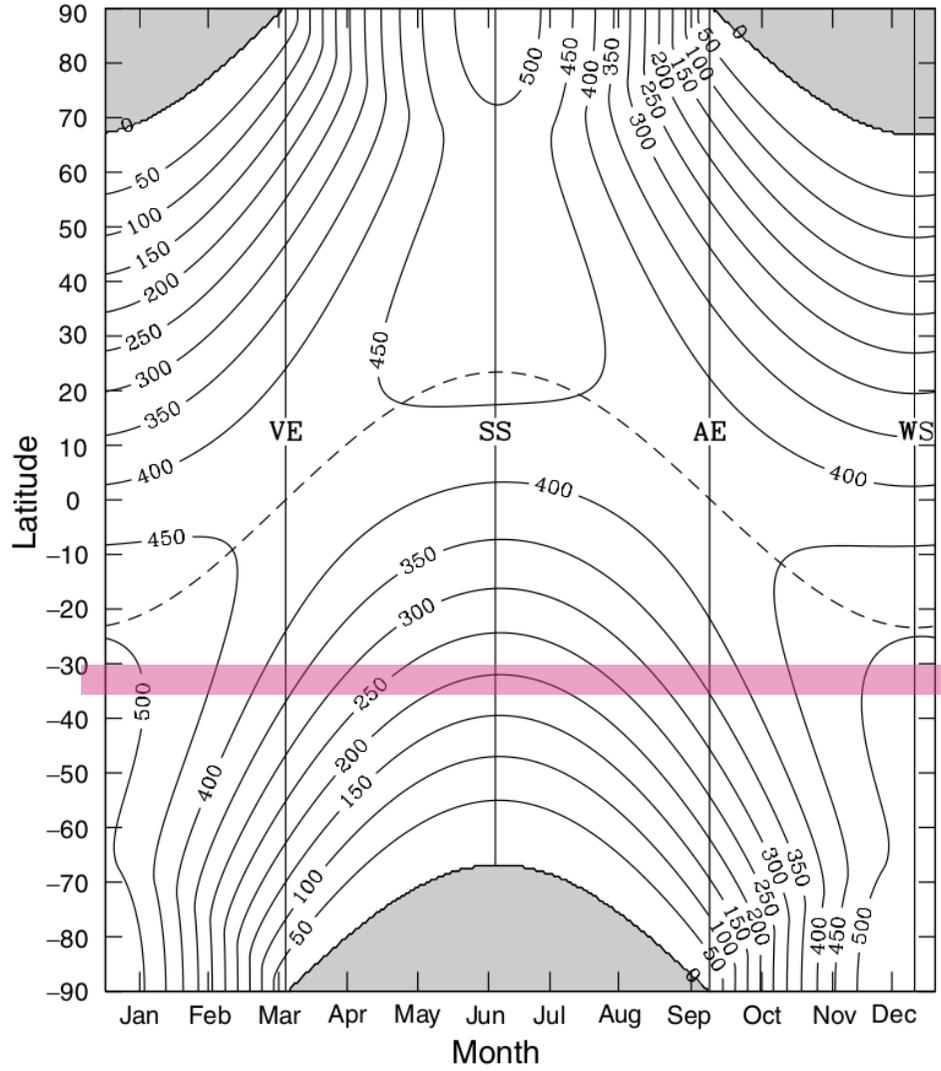
Algunas consideraciones - 2

Irradiación diaria horizontal (TOA)

Variación estacional en términos de la latitud



Algunas consideraciones - 2



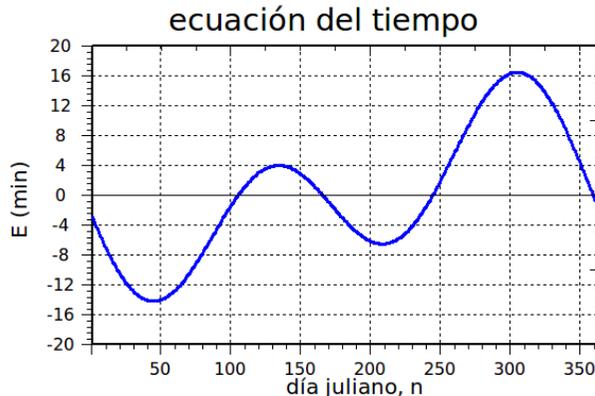
Uruguay

Tiempo estándar y tiempo solar

La Tierra no rota a velocidad constante, y la duración de los días difiere en minutos.

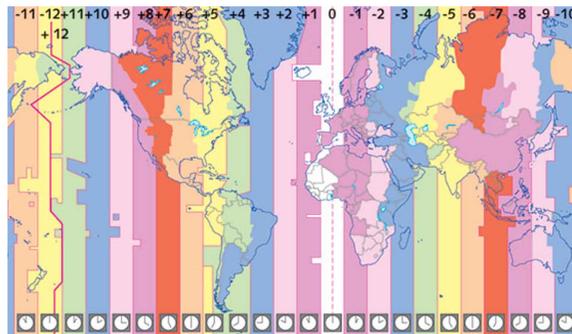
T_0 es el **tiempo solar medio** (si $d\omega/dt = 15^\circ/\text{hora} = \text{cte.}$). La diferencia entre el tiempo solar aparente y el tiempo solar medio se denomina **ecuación del tiempo E**.

$$E = T_s - T_0$$



Tiempo estándar: es el que mide el reloj (asociado a una región horaria)

$$T_{UTC} = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right) - \frac{L_0 - L_{UTC}}{15^\circ} - \frac{E}{60min}$$



Es un tema delicado. Se recomienda leer las notas del curso FRS

http://les.edu.uy/FRS/notas/FRS_notas_v4-0_R2_2020.pdf

y ver el video de divulgación:

<https://www.youtube.com/watch?v=IJhgZBn-LHg>

Altura solar y ángulo acimutal

Por último, es conveniente definir dos ángulos medidos desde el sistema de referencia del observador

Altura Solar:

ángulo complementario del ángulo cenital

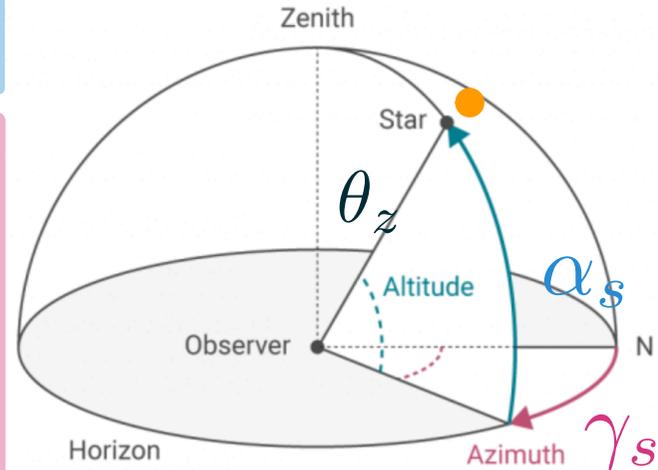
$$\sin \alpha_s = \cos \theta_z$$

Ángulo acimutal:

ángulo entre la proyección en el plano del observador de la dir. Tierra-Sol y la dir. Norte.

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega}{\cos \alpha_s}$$

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s}$$



Observaciones:

- γ_s es cero al mediodía solar, y su signo depende de la convención utilizada
- la variación de γ_s no ocurre a tasa constante
- cuando se calcula γ_s hay que tener claro en que cuadrante se está trabajando

Energía Solar Térmica - 2020

constante solar

movimiento aparente del Sol

diagrama solar

efecto de la atmósfera (muuy resumido)

espectro solar

Diagrama solar

Variando ω entre $-\omega_s$ y ω_s para un día n dado es posible generar la trayectoria aparente del Sol en un plano denominado Diagrama Solar.

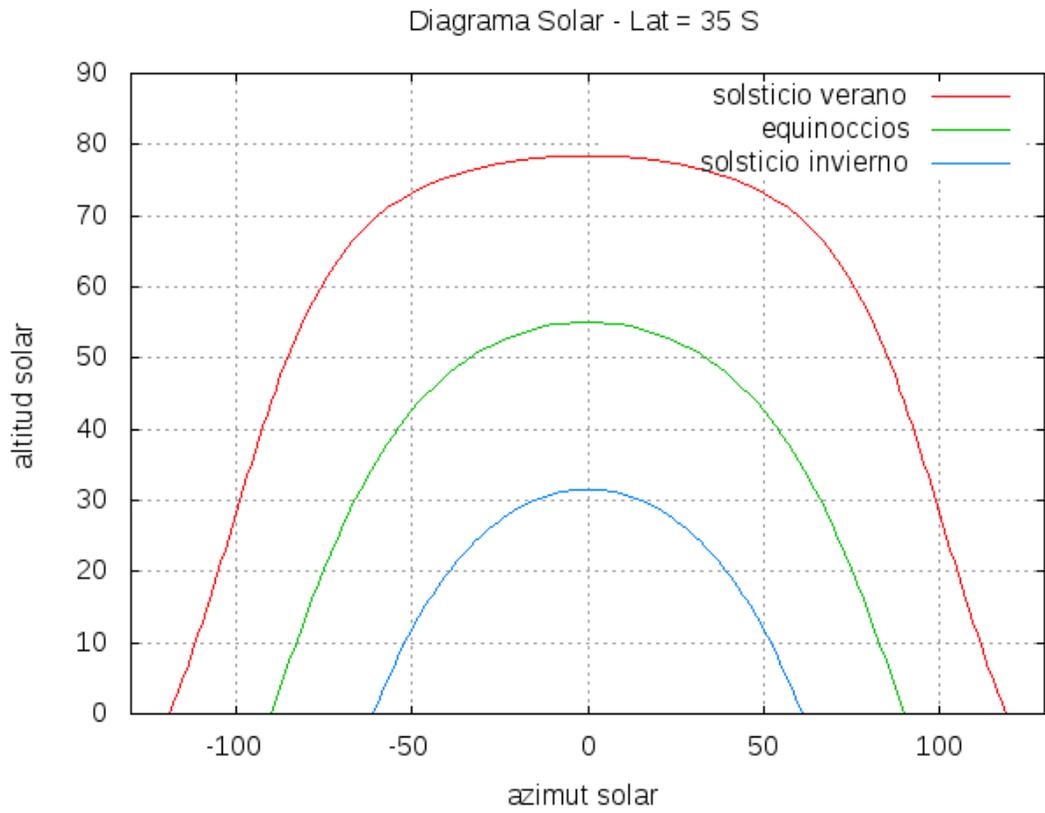
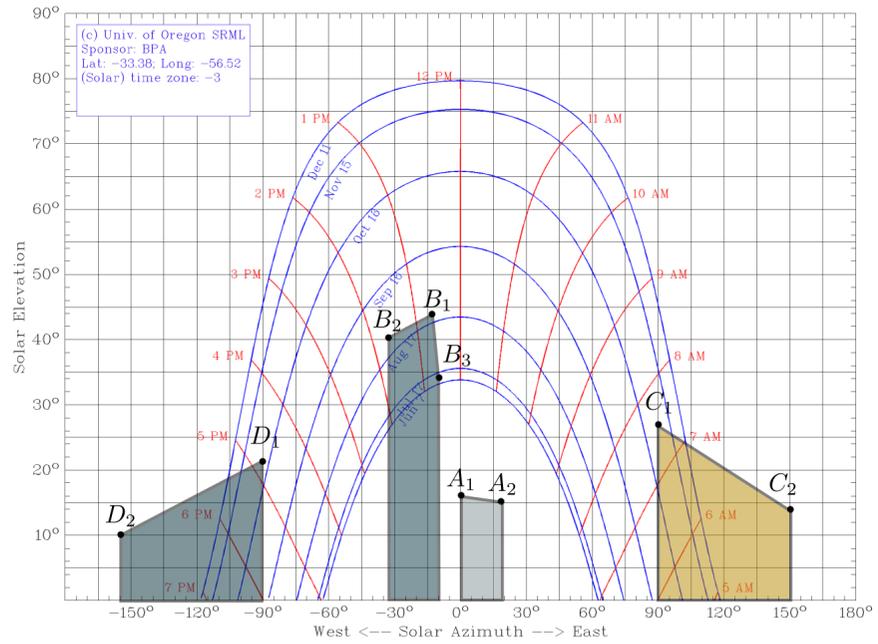
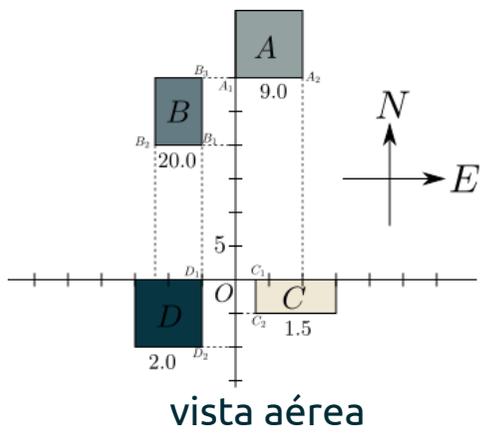
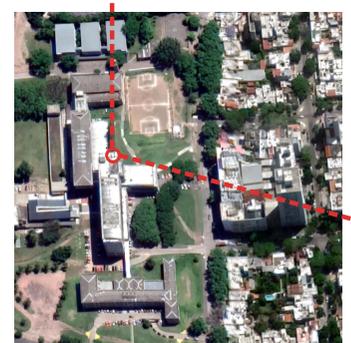
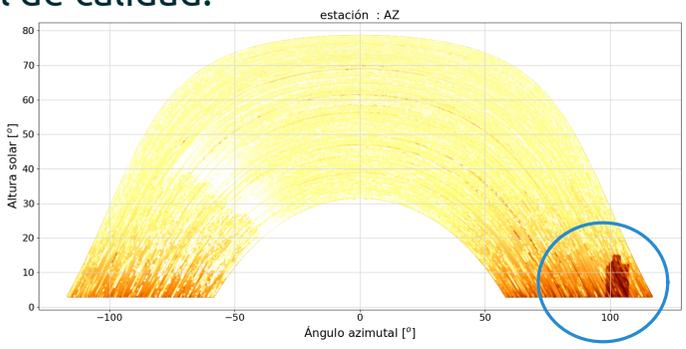


Diagrama solar: aplicaciones

Planificación:



Control de calidad:



Energía Solar Térmica - 2020

constante solar

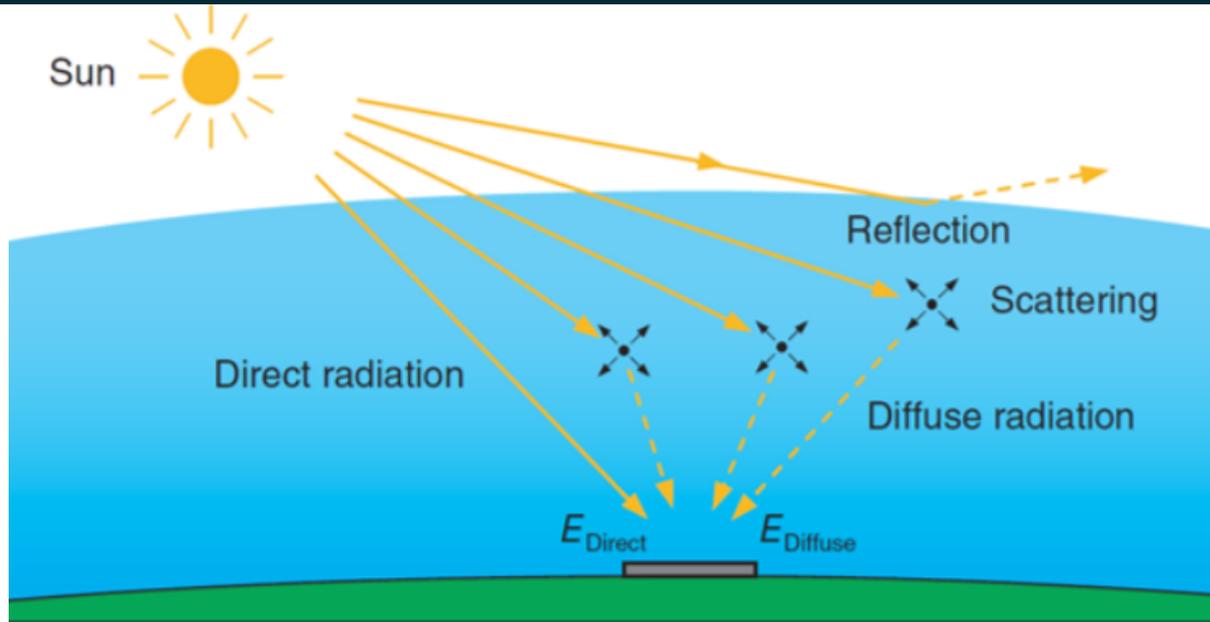
movimiento aparente del Sol

diagrama solar

efecto de la atmósfera (muuy resumido)

espectro solar

Efecto de la atmósfera



irradiancia solar global o hemisférica: G (W/m^2)

irradiancia incidente en un plano dado,
proveniente de un ángulo sólido de 2π sobre la superficie.

irradiancia solar global horizontal: G_h (W/m^2)

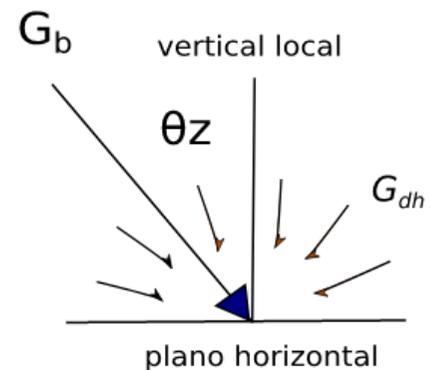
irradiancia solar hemisférica sobre un plano horizontal

irradiancia solar difusa: G_d (W/m^2)

irradiancia hemisférica global menos irradiancia directa.

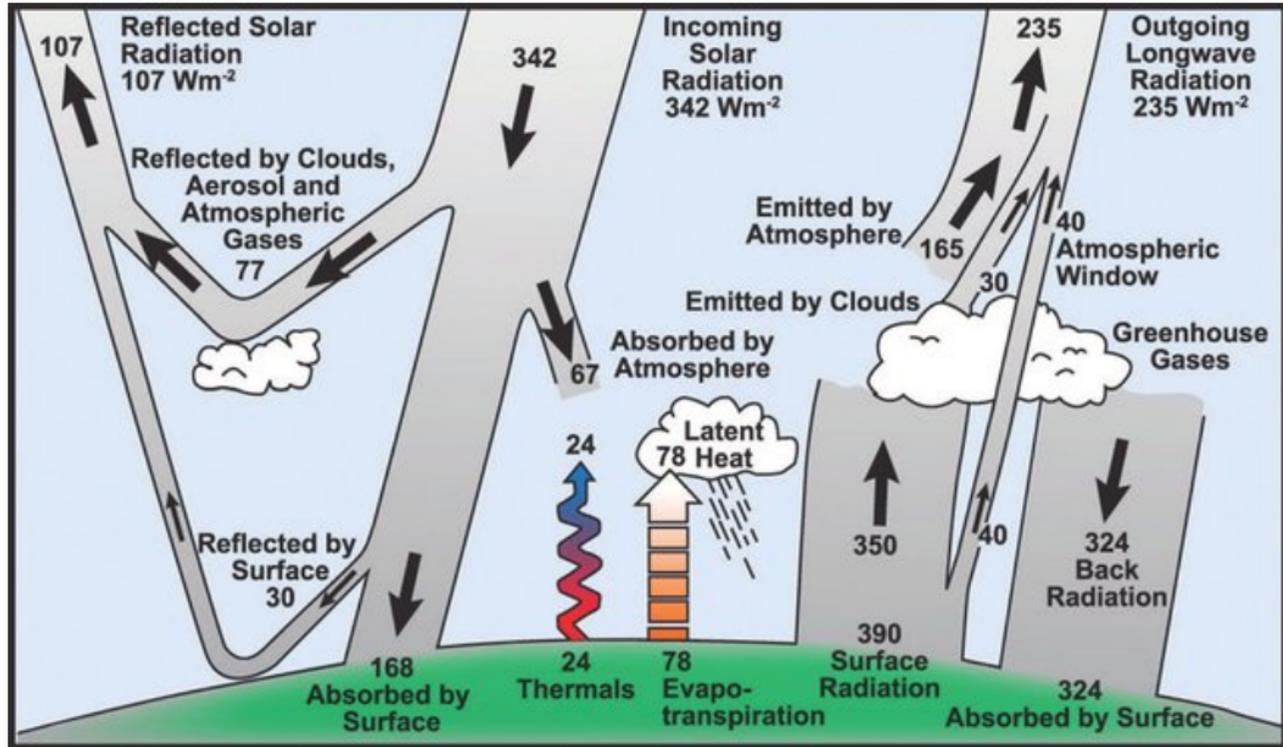
irradiancia solar directa: G_b (W/m^2)

irradiancia solar recibida en un plano normal a la línea Tierra-Sol
desde un pequeño ángulo sólido en torno a la línea Tierra Sol.



Efecto de la atmósfera

Balance radiativo promedio



Aspectos relevantes

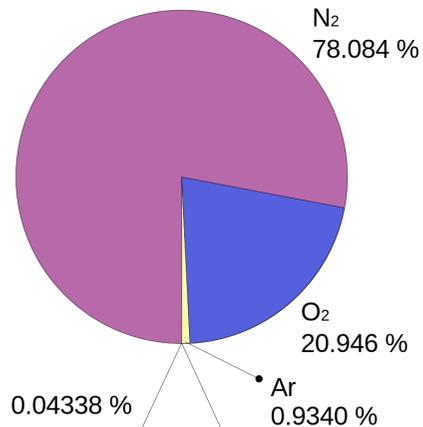
- geometría solar
- reflexión por nubosidad
- scattering molecular (Rayleigh)
- scattering de aerosoles
- absorción por aerosoles
- absorción por vapor de agua
- absorción por Ozono
- abs. por mezcla de otros gases

Composición de la atmósfera

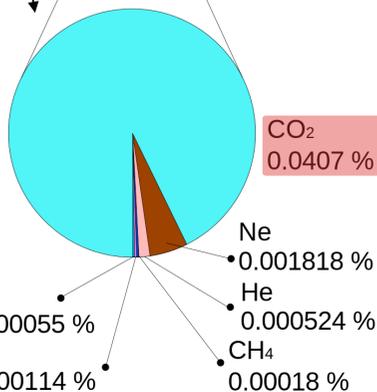
Composición estable

estable hasta unos 60 km

99.96% N₂ y O₂



0.04338 %



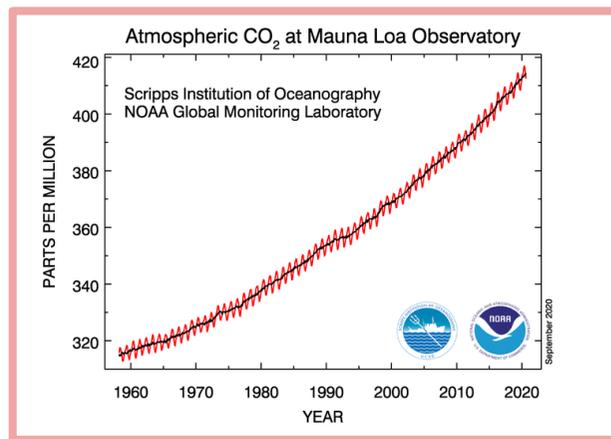
variable

vapor de agua (H₂O) 0-0.04 %

Ozono (O₃) 0-0.0012 %

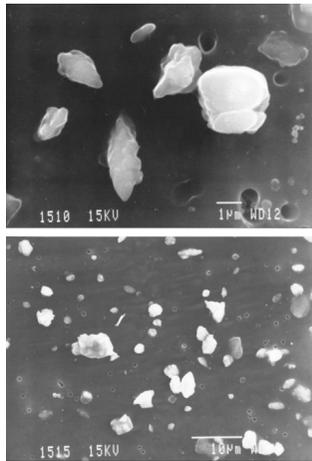
y en segunda instancia
dióxido de sulfuro, dióxido
de nitrógeno y amoníaco

importantes en procesos de absorción!



Composición de la atmósfera

además...



aerosoles
(gran diversidad en tamaño
20nm - 20 micras, forma, origen)
polvo, quemas, volcanes,
contaminación, etc...

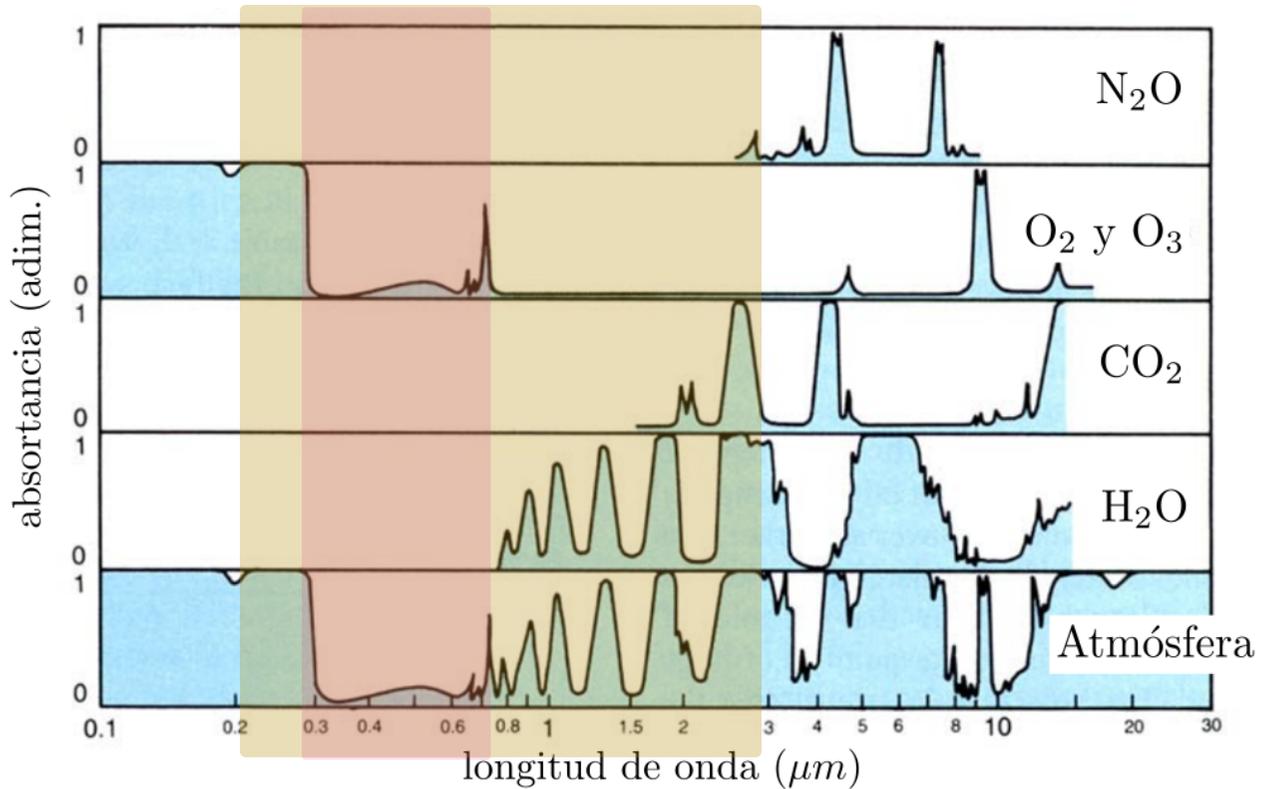
gotas de agua, partículas de hielo y nubes



todos ellos altamente variables en el espacio y el tiempo!

Absorción

proceso selectivo (en términos de long. de onda):



ventana atmosférica

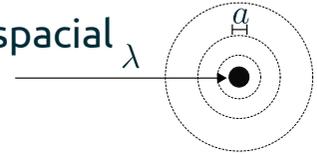
espectro solar

II - Interacción con la atmósfera

Scattering

se describe en términos de intensidad dispersada y distribución espacial

3 casos según x : $x = 2\pi a/\lambda$



$x \ll 1$: Rayleigh

moléculas de aire. Intensidad prop. a
(cielo azul)

$$\lambda^{-4} \quad \gamma \approx 4$$

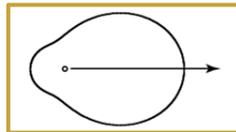
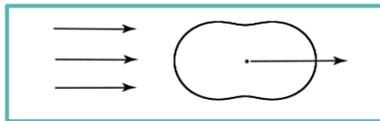
$x \sim 1$: Lorenz-Mie

aerosoles y vapor de agua
(atardeceres)

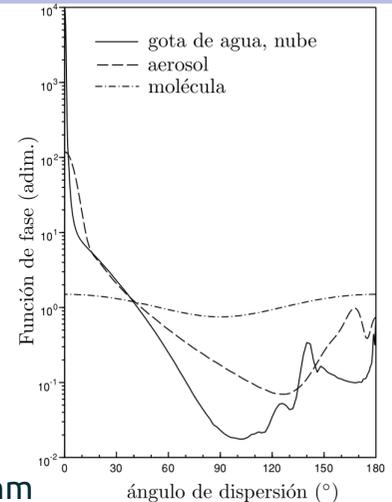
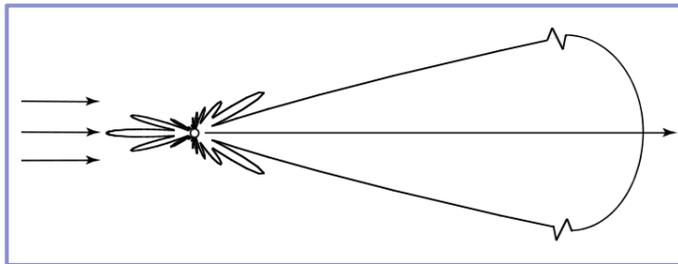
$x \gg 1$: dispersión no selectiva

partículas grandes en atm. baja, nubes, aerosoles
(nubes blancas, bruma, niebla)

patrón de dispersión



haz incidente



para haz de 500 nm

II - Interacción con la atmósfera

Scattering

Rayleigh



Mie + Rayleigh



Dispersión no selectiva



Energía Solar Térmica - 2020

constante solar

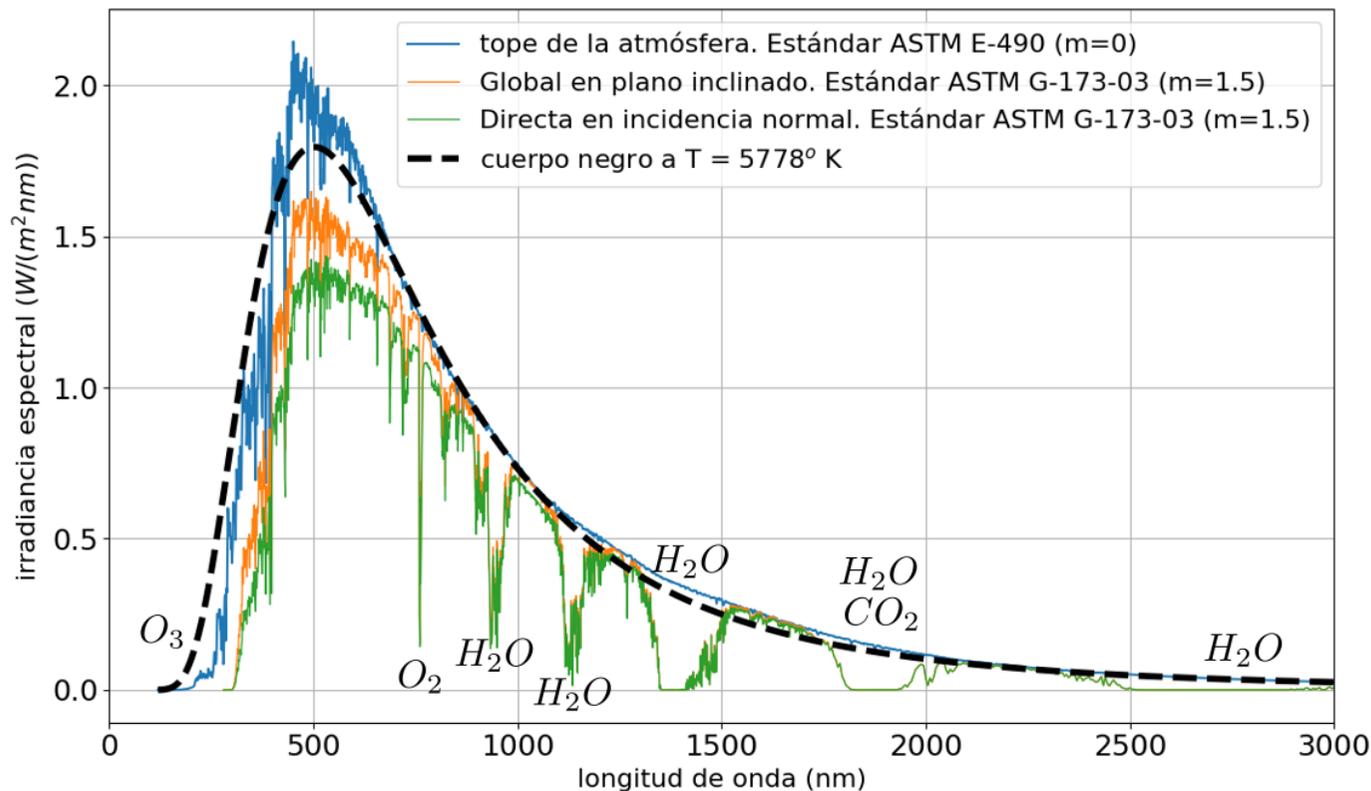
movimiento aparente del Sol

diagrama solar

efecto de la atmósfera (muuy resumido)

espectro solar

Irradiancia espectral

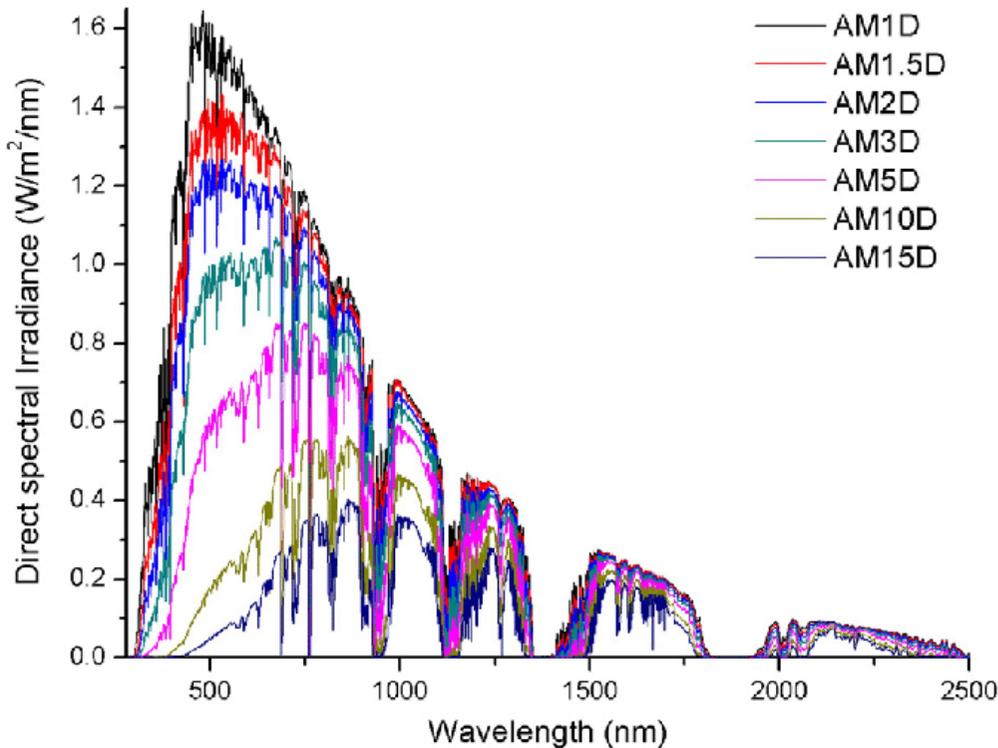


Espectros disponibles en:

<ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/SolarReferenceSpectrum>
<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>

<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>

Irradiancia espectral

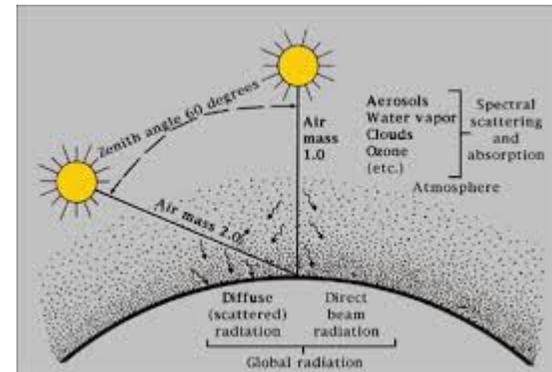


masa de aire (AM o m)

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

Young (1994):

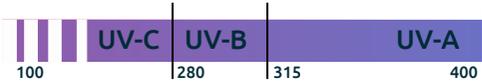
$$m = \frac{1,002432 \cos^2 \theta_z + 0,148386 \cos \theta_z + 0,0096467}{\cos^3 \theta_z + 0,149864 \cos^2 \theta_z + 0,0102963 \cos \theta_z + 0,000303978}$$



Irradiancia espectral

bandas espectrales importantes:

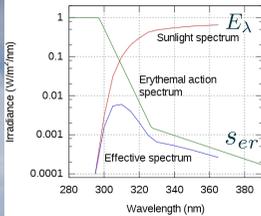
$$I_{\lambda_1, \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda}^{\downarrow} d\lambda$$



salud humana, degradación de materiales

fotosíntesis, iluminación natural

evapotranspiración, ciclo hidrológico



$$I_{UVE} = \int_{250}^{400} E_{\lambda} s_{er}(\lambda) d\lambda$$

$$UVI = I_{UVE} \times 40 m^2/W$$



.radiación solar de banda ancha (280 - 5000 nm):

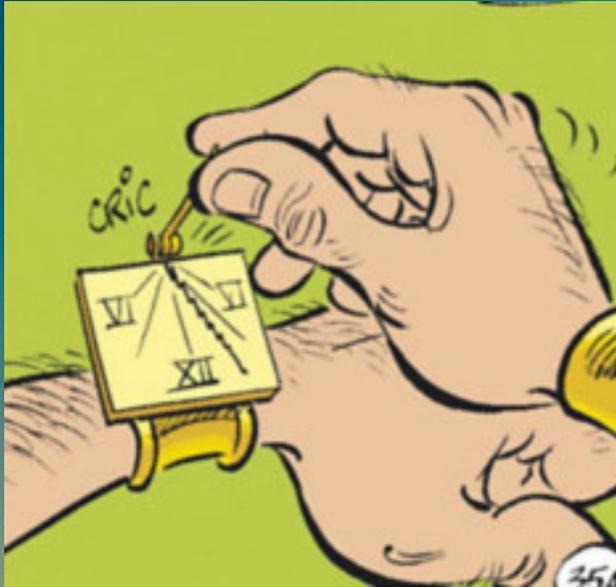
relevante balances energéticos
variable para sistemas de
aprovechamiento de energía solar



- irradiancia total en el plano horizontal a nivel de superficie se denota GHI o I_g
- variable solar más frecuentemente relevada

Energía Solar Térmica - 2020

FIN



hora de preguntas...

Agustín Laguarda

agu.laguarda@gmail.com



LES
LABORATORIO DE
ENERGÍA SOLAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY