

INTRODUCCIÓN A LA GEOMETRÍA SOLAR

ING. MARÍA CELESTE GARDEY MERINO



Facultad Regional Mendoza
Universidad Tecnológica Nacional

VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN SOLAR RECIBIDA POR UNA SUPERFICIES

Un objeto recibe mayor cantidad de radiación cuando:

El ángulo de incidencia es de 90°

El sol se encuentra en el punto más alto de su trayectoria (mediodía solar)

Es verano, ya que la radiación recorre menos distancia para llegar a la superficie.

Cuando está despejado y hay pocas partículas en suspensión.

El lugar se encuentra más cerca del Ecuador, es decir tiene una latitud menor.



DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA SOLAR PARA UN DISPOSITIVO

La radiación solar no ha sido medida por mucho tiempo, o se le ha prestado muy poca atención. Tenemos escasos valores de radiación solar medidos.

¿Cómo se puede determinar?

Conociendo:

Valor promedio medido en la superficie terrestre (Depende de la disponibilidad de datos medidos)

Radiación a tope de atmósfera (Se puede calcular utilizando geometría solar)



VALORES DE RADIACIÓN SOLAR MEDIDOS PARA MENDOZA

LOCALIDAD: Mendoza (Observatorio)

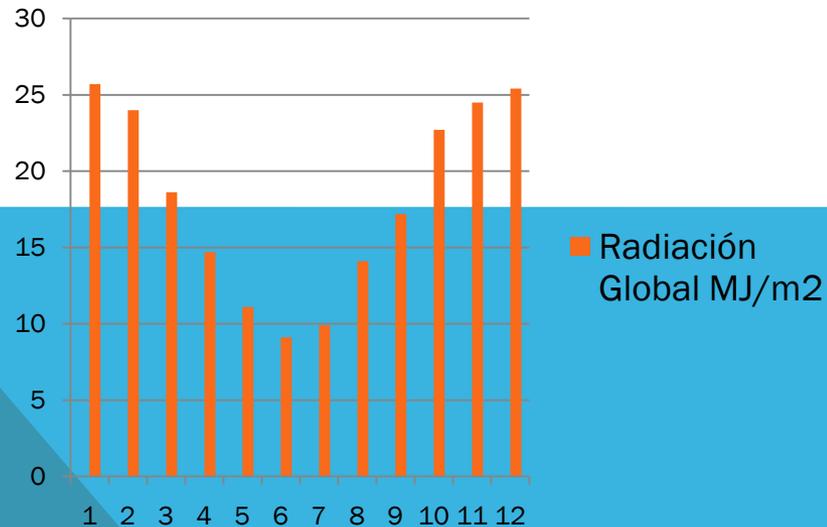
Latitud 32.85 S

Longitud: 68.85 O

Altitud: 823 msnm

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
HGLO	25,7	24	18,6	14,7	11,1	9,1	9,9	14,1	17,2	22,7	24,5	25,4	18,08
HDIF	10,5	9	8,9	6,8	5,3	4,8	5	5,4	7,8	8,4	10,5	10,9	7,78

HGLO: Radiación solar global sobre superficie horizontal



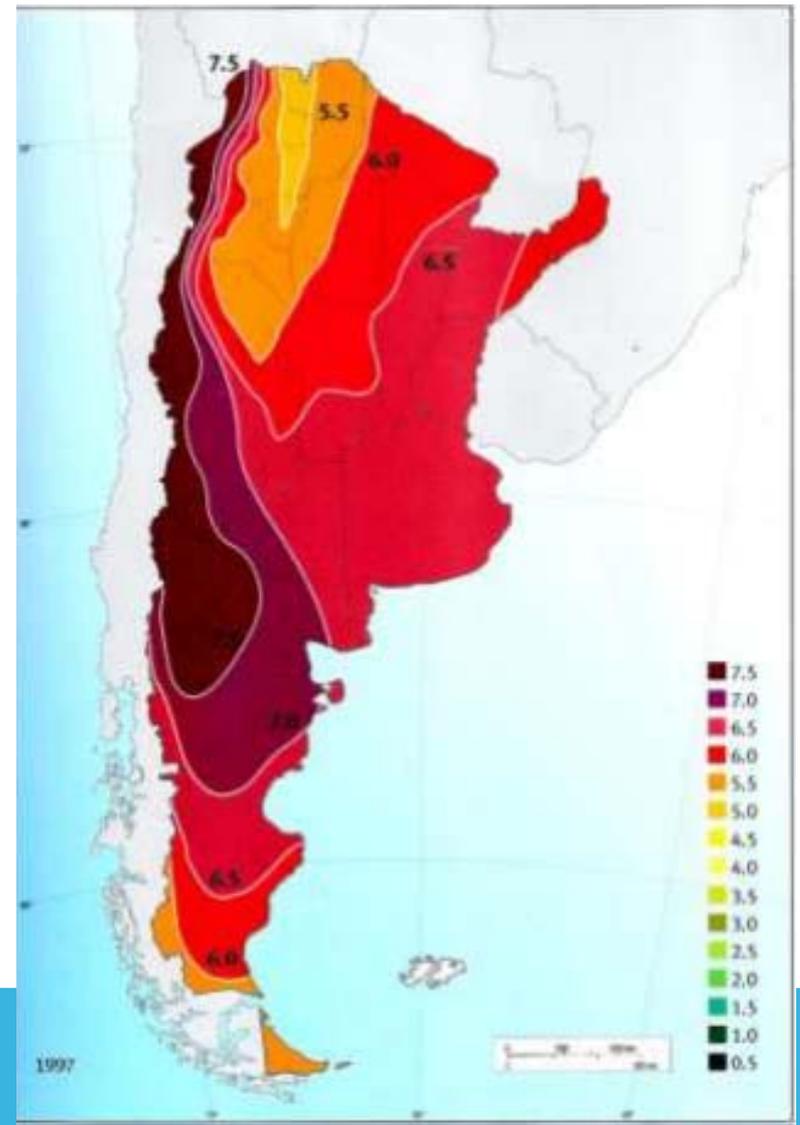
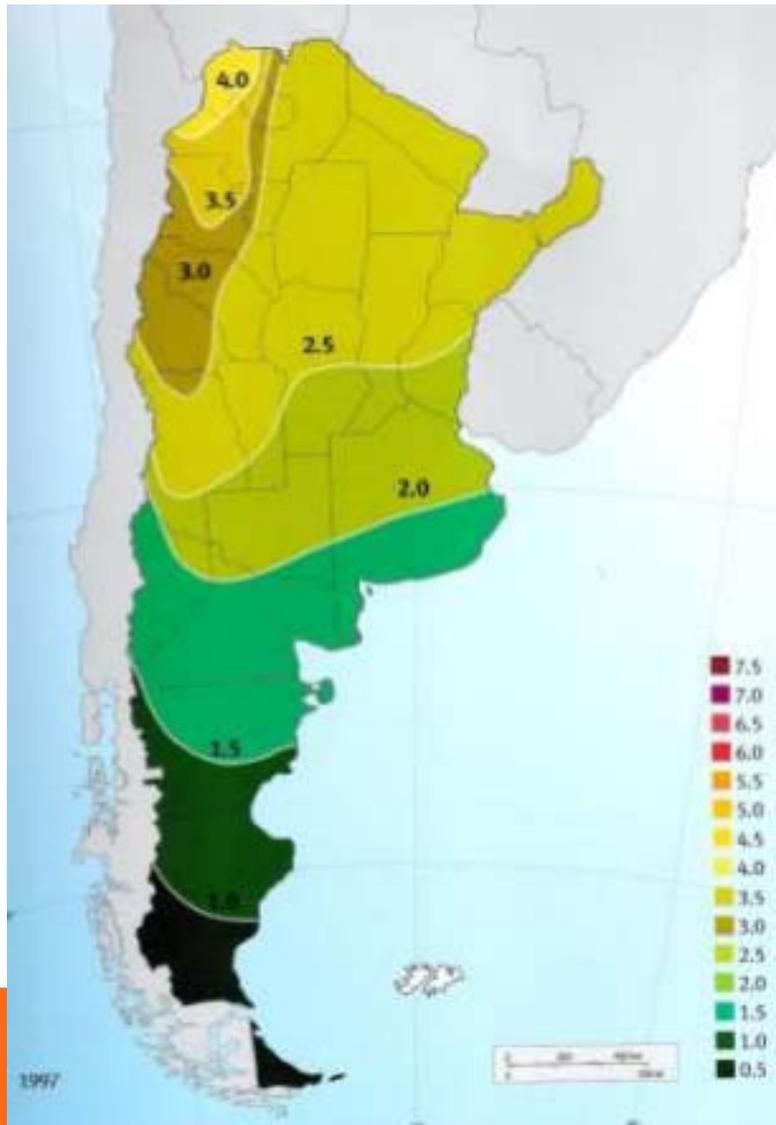
ATLAS SOLAR DE LA REPÚBLICA ARGENTINA

Consiste en Mapas de Radiación elaborados a partir de la radiación a tope de atmósfera y datos promedios medidos, para la Argentina y para todos los meses de año.

Los autores de este trabajo son los Dres. Hugo Grossi Gallegos y Raúl Righini del Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) de la Universidad Nacional de Luján (UNLu)

Publicado en el 2007 y distribuido gratuitamente a instituciones educativas.





Irradiación Solar Global Diaria (Kw-h/m² correspondiente a los meses de Julio y Enero.
 Fuente: Atlas de Energía Solar de la República Argentina. Dres Hugo Grossi Gallegos y Raúl Righini 2007

RADIACIÓN A TOPE DE ATMÓSFERA VALOR MEDIO MENSUAL

$$\overline{H}_o = (24 / \pi) 3600 I_{sc} \left[1 + 0.33 \cos(360^\circ (\overline{n}_d - 2) / 365) \right] \\ \times \left[\cos \phi \cos \overline{\delta} \sin \overline{\omega}_s + \overline{\omega}_s (\pi / 180^\circ) \sin \phi \sin \overline{\delta} \right]$$

\overline{n}_d Día Juliano medio mensual

Latitud

$\overline{\omega}_s$ Valor medio del ángulo de salida del sol

I_{sc} Constante solar

$\overline{\delta}$ Declinación media mensual

DÍA JULIANO

DÍA JULIANO MEDIO MENSUAL

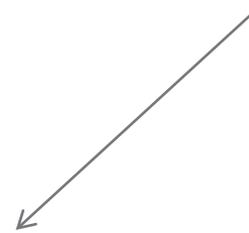
$$\overline{n_d}$$

Es el número de día juliano característico para cada mes.

DÍA JULIANO

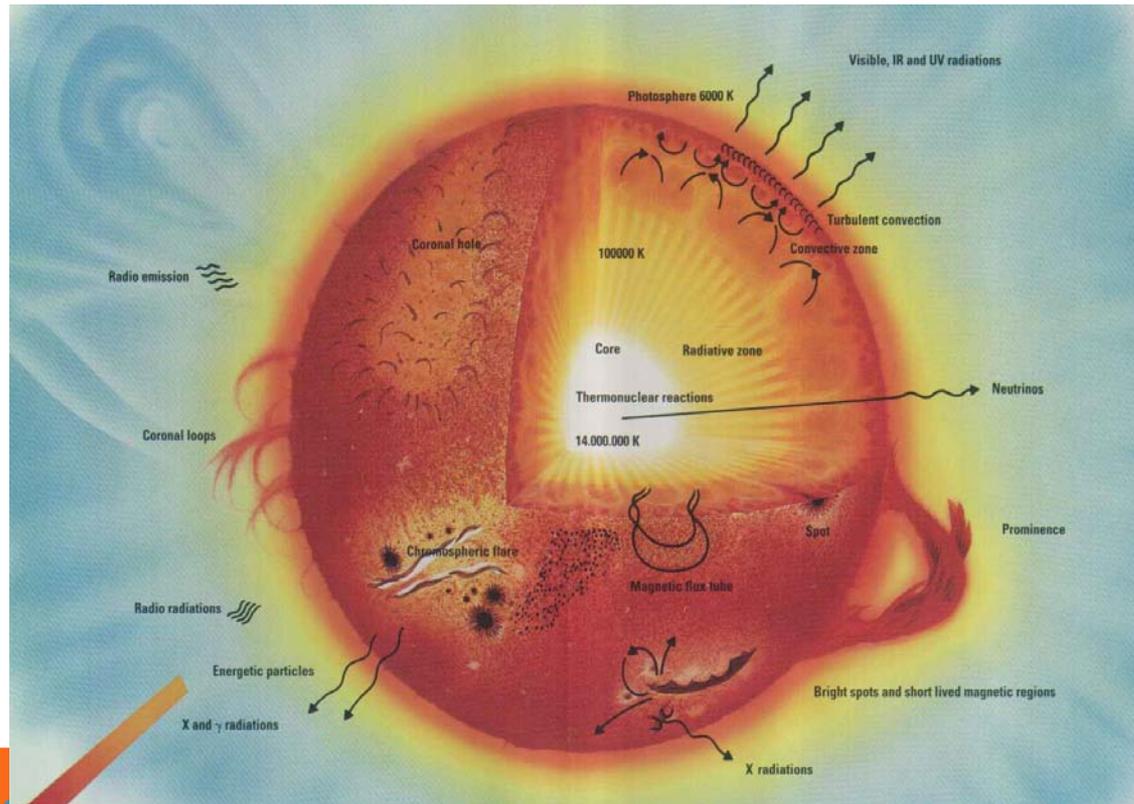
Días acumulados	Día medio
0	17,1
31	47,2
59	76
90	105,5
120	134,6
151	160,8
181	197,9
212	226,9
243	256,3
273	285,6
304	315,9
334	343,3

Día Juliano promedio para cada mes



CONSTANTE SOLAR

ORIGEN DE LA RADIACIÓN SOLAR



REACCIÓN NUCLEAR



EL SOL EN NÚMEROS

Masa del sol: $2 \cdot 10^{30}$ kg.

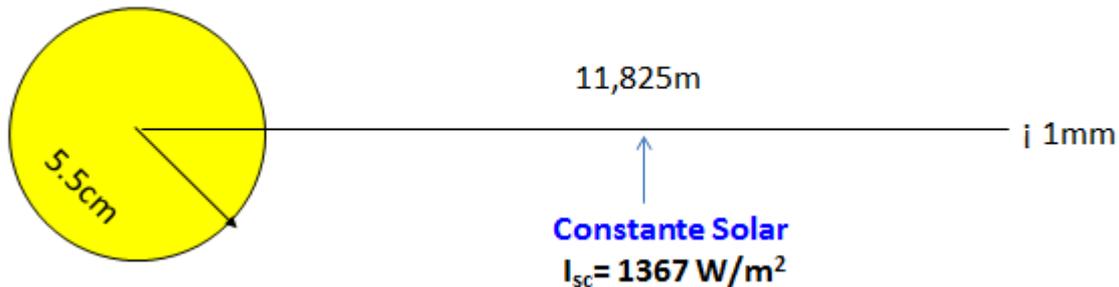
Temperaturas en el núcleo del sol: $4 \cdot 10^7$ K

Temperaturas en la superficie del sol: $6 \cdot 10^3$ K

Distancia Tierra - Sol : 1.496×10^{11} m

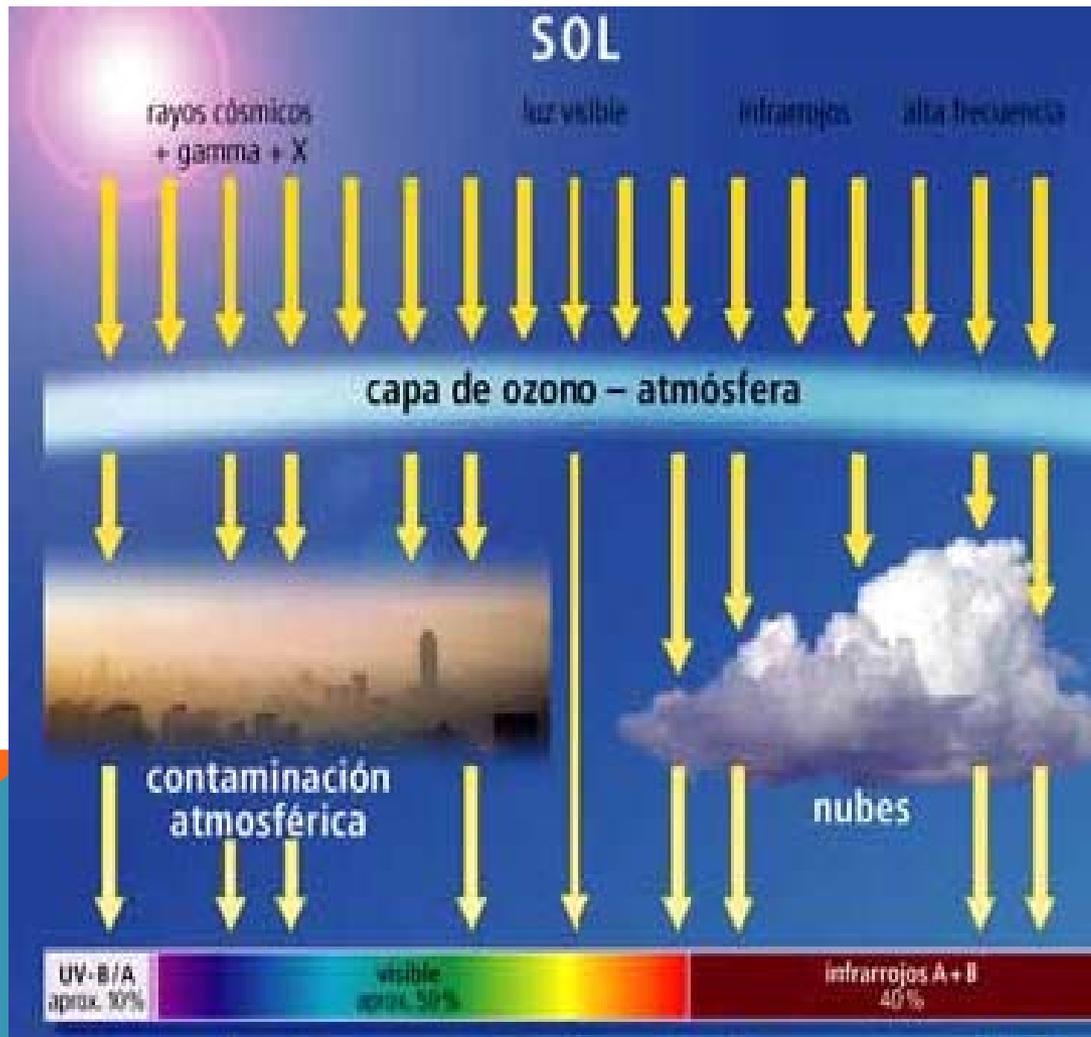
Radio del Sol: 6.96×10^8 m

Analogía: cabeza de alfiler (1mm) a una distancia de 11,825m de una esfera 5.5 cm de radio.

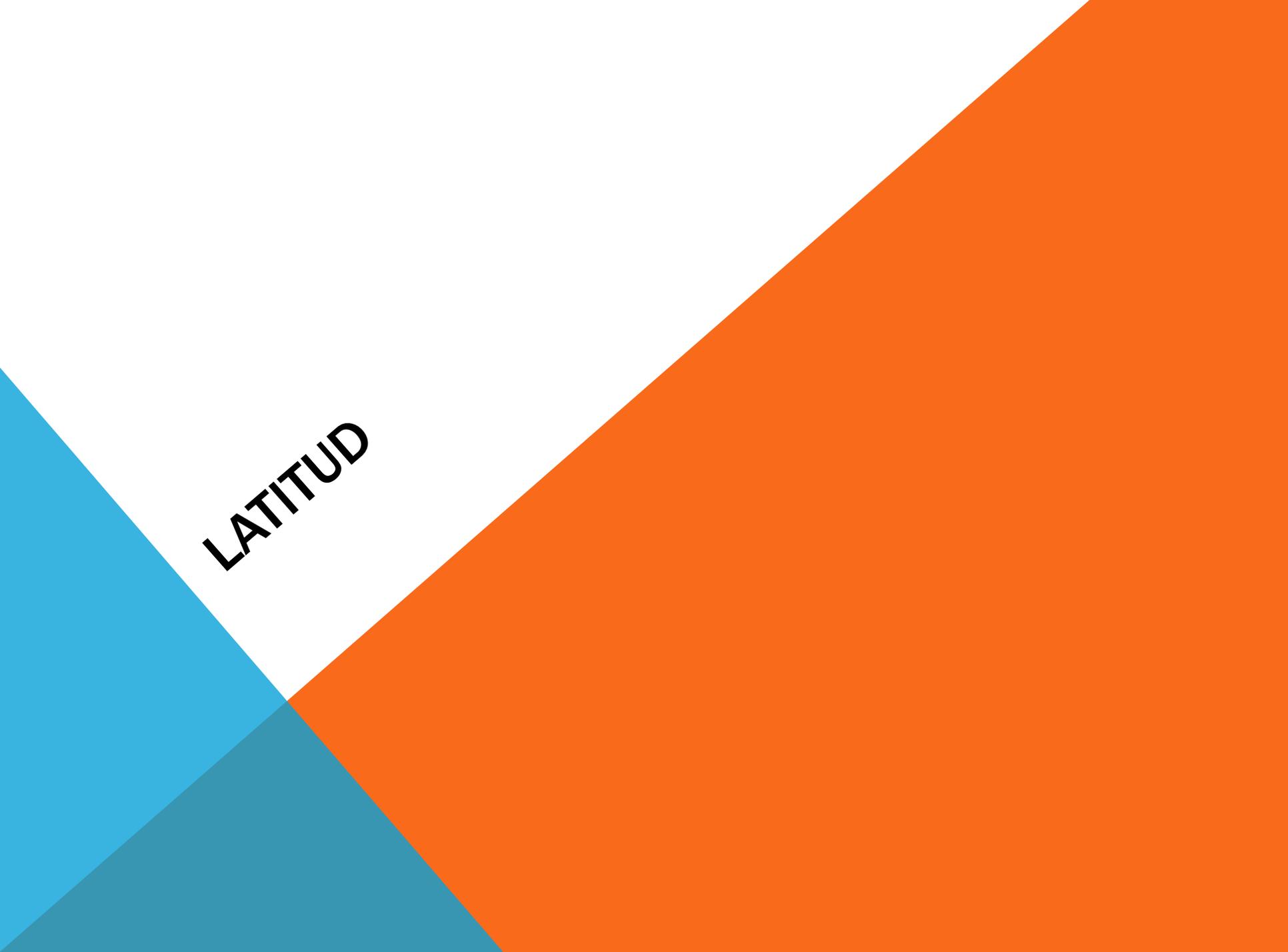


La constante solar es la energía proveniente del sol que, por unidad de tiempo, es recibida en la unidad de área por una superficie perpendicular a la radiación ubicada en el espacio a la Distancia media Sol-Tierra.

ESPECTRO SOLAR



Al llegar a la tierra :de 10^{-13} hasta 10 m (el 98% de ella está ubicada entre los 0.3mm y los 4 mm)



LATITUD

COORDENADAS TERRESTRES

Latitud: mide el ángulo entre cualquier punto y el **Ecuador**. (de 0 a +90° y 0 a-90)

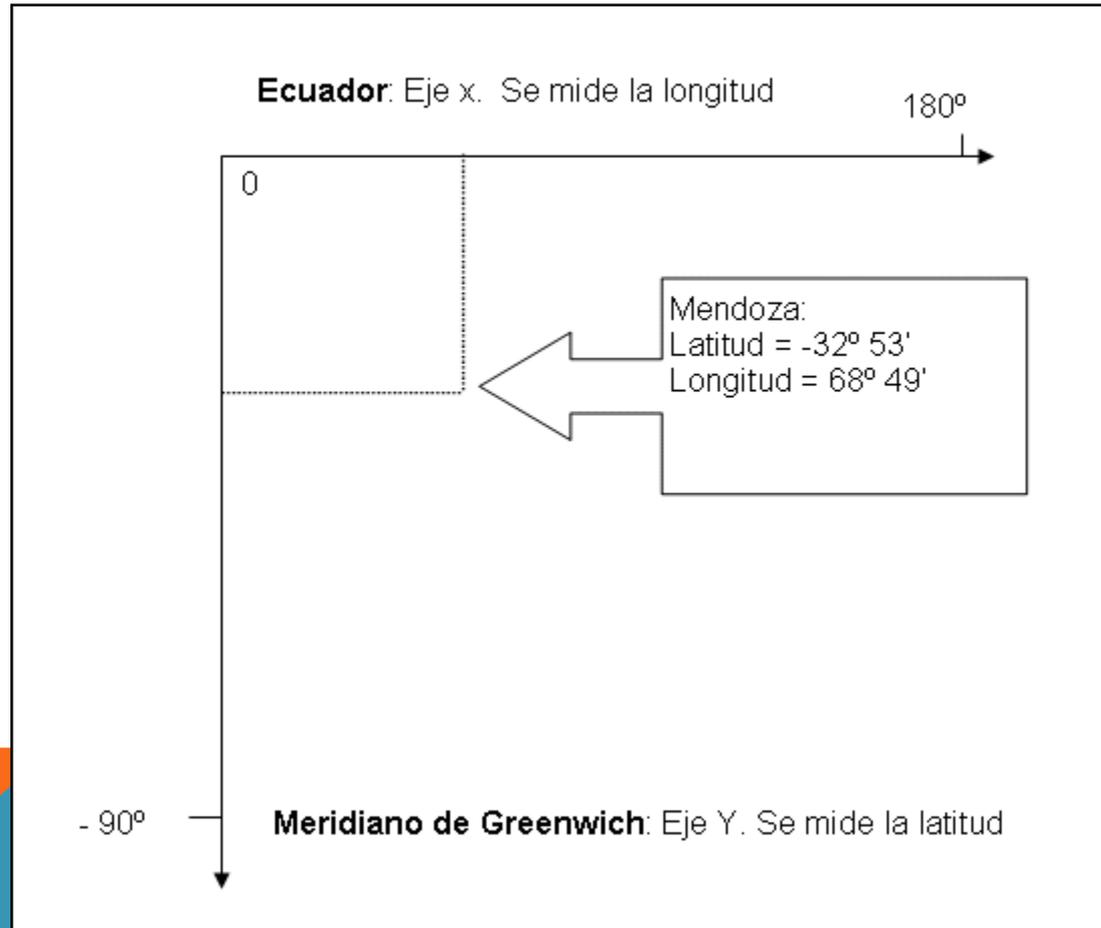
(Paralelos: Circunferencias de diferentes medidas, perpendiculares al eje terrestre. **Ecuador**)

Longitud: Mide el ángulo a lo largo del Ecuador desde cualquier punto de la Tierra.(de 0 a 360°)

(Meridianos: Circunferencias que tienen sus extremos en los polos. Meridiano de **Greenwich**)

COORDENADAS TERRESTRES

UBICACIÓN DE MENDOZA



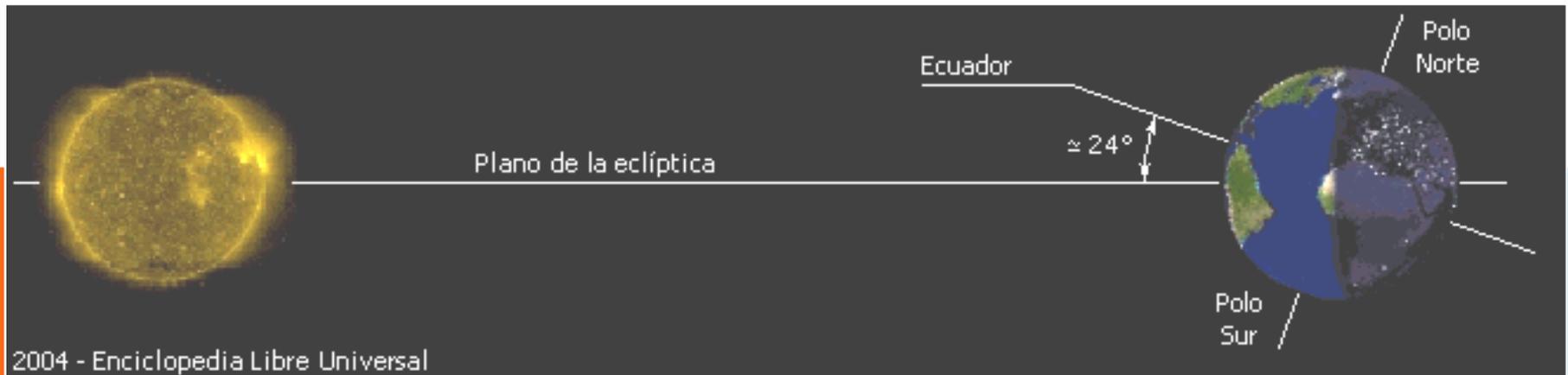
DECLINACIÓN SOLAR

DECLINACIÓN SOLAR

El plano del Ecuador forma un ángulo de $23^{\circ}27'$ con el plano de la eclíptica.

Definición: Ángulo que forman el vector tierra-sol y el plano ecuatorial.

Esta inclinación produce las 4 estaciones.



DECLINACIÓN SOLAR

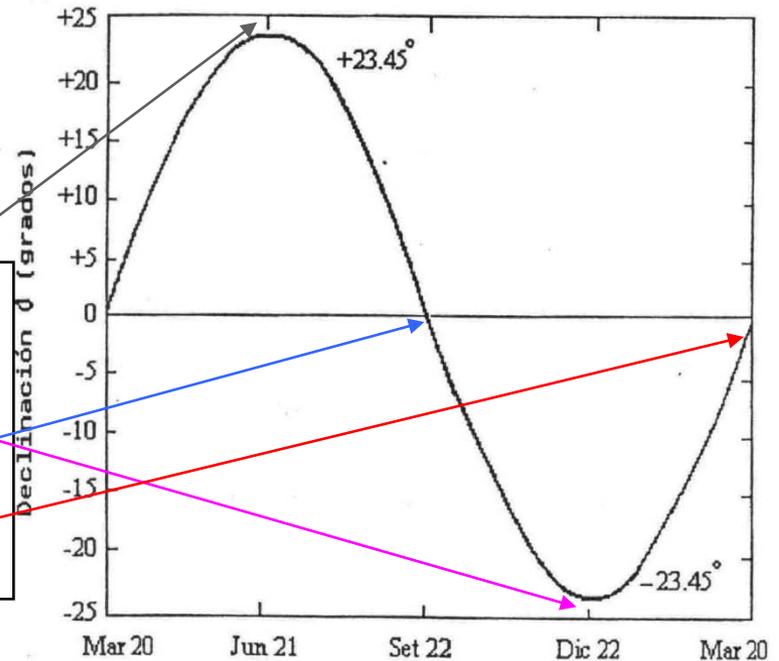
$$\delta = 23.45^\circ \operatorname{sen} \left[\frac{360^\circ (n + 284)}{365} \right]$$

22/06 => 23.45° SOLSTICIO

22/12 => -23.45° SOLSTICIO

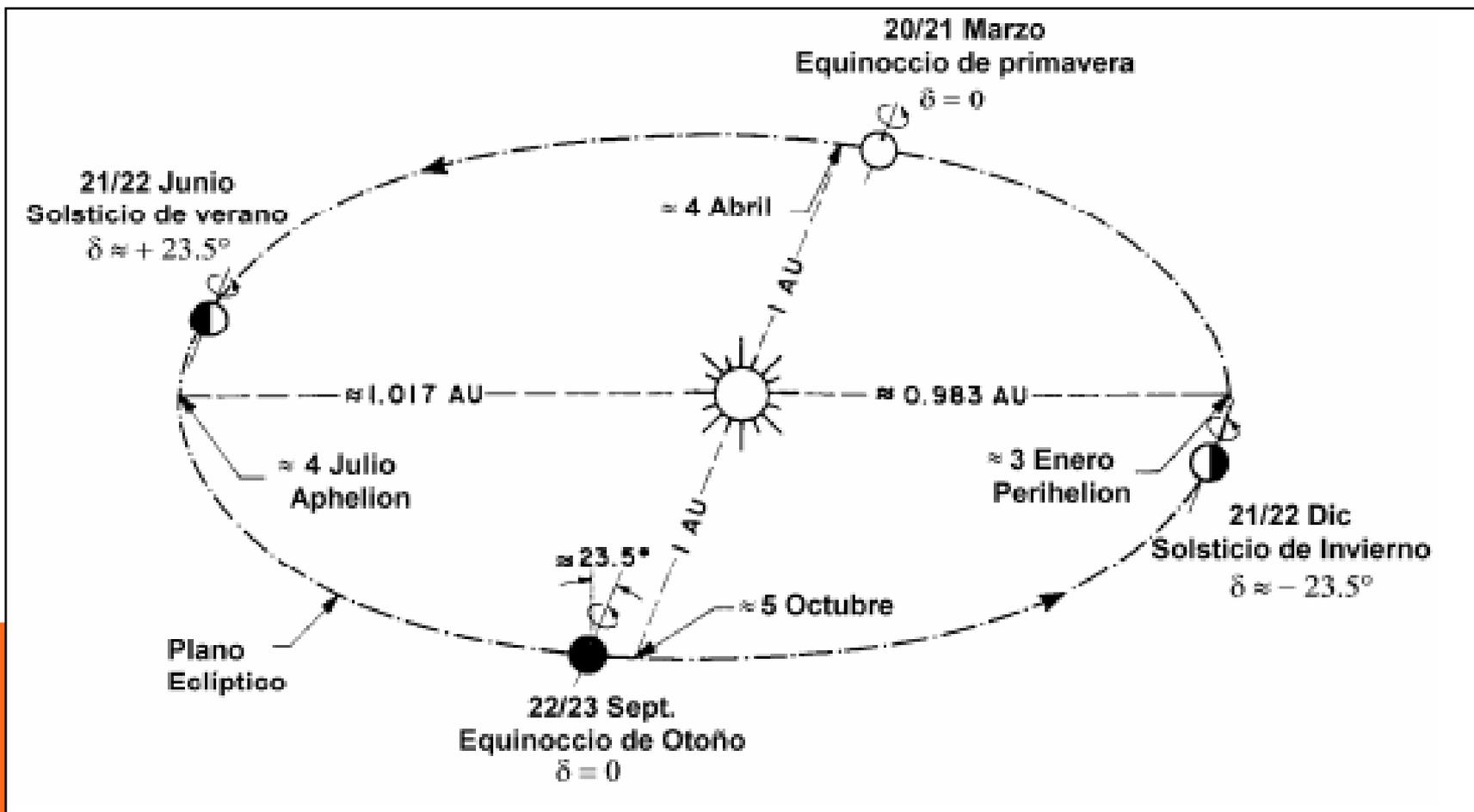
23/09 => 0° EQUINOCCIO

21/03 => 0° EQUINOCCIO



Ángulo que forman el vector tierra-sol y el plano ecuatorial

DECLINACIÓN



DECLINACIÓN MEDIA MENSUAL

$$\bar{\delta}$$

Valor medio mensual de la declinación, función del día medio mensual juliano calculado a partir de la siguiente fórmula:

$$\bar{\delta} = 23.45^\circ \operatorname{sen} \left[\frac{360^\circ (\bar{n}_d - 81)}{365} \right]$$

DECLINACIÓN VS. DÍA JULIANO

VALORES MEDIOS MENSUALES

Mes	Día Juliano	Declinación
	Medio mensual	Media mensual
	n_d	$\delta[^\circ]$
Enero	17,1	-20,9
Febrero	47,2	-12,9
Marzo	76,0	-2,0
Abril	105,5	9,6
Mayo	134,6	18,7
Junio	160,8	23,0
Julio	197,9	21,2
Agosto	226,9	13,8
Septiembre	256,3	2,9
Octubre	285,6	-8,7
Noviembre	315,9	-18,4
Diciembre	343,3	-23,0

ÁNGULO DE SALIDA DEL SOL

RELACIONES GEOMÉTRICAS EN RADIACIÓN SOLAR

Esfera celeste

Ángulos solares

Ángulo horario

Ángulo de incidencia

Salida y puesta del sol

Duración del día

ESFERA CELESTE

Esfera celeste es la esfera imaginaria con centro en la tierra y distancia indefinida desde ese centro.

El **sol** viaja a través de esta esfera, así como otros objetos celestes.

La posición del **sol** en la **esfera celeste** se especifica a través de **ángulos** con respecto a un observador sobre la Tierra.

ESFERA CELESTE

Si se observa un astro cualquiera , el sol, la luna, una estrella, por ejemplo, durante un cierto tiempo, se comprueba que todos ellos se mueven describiendo circunferencias alrededor de una recta ideal que se denomina *eje del mundo*.

Los puntos de intersección del eje del mundo con la esfera celeste se denominan *polos celestes*. El que corresponde al hemisferio norte se llama *polo celeste norte o boreal* y el que corresponde al hemisferio sur, *polo celeste sur o austral*.

El círculo máximo perpendicular al eje del mundo se llama *ecuador celeste*.

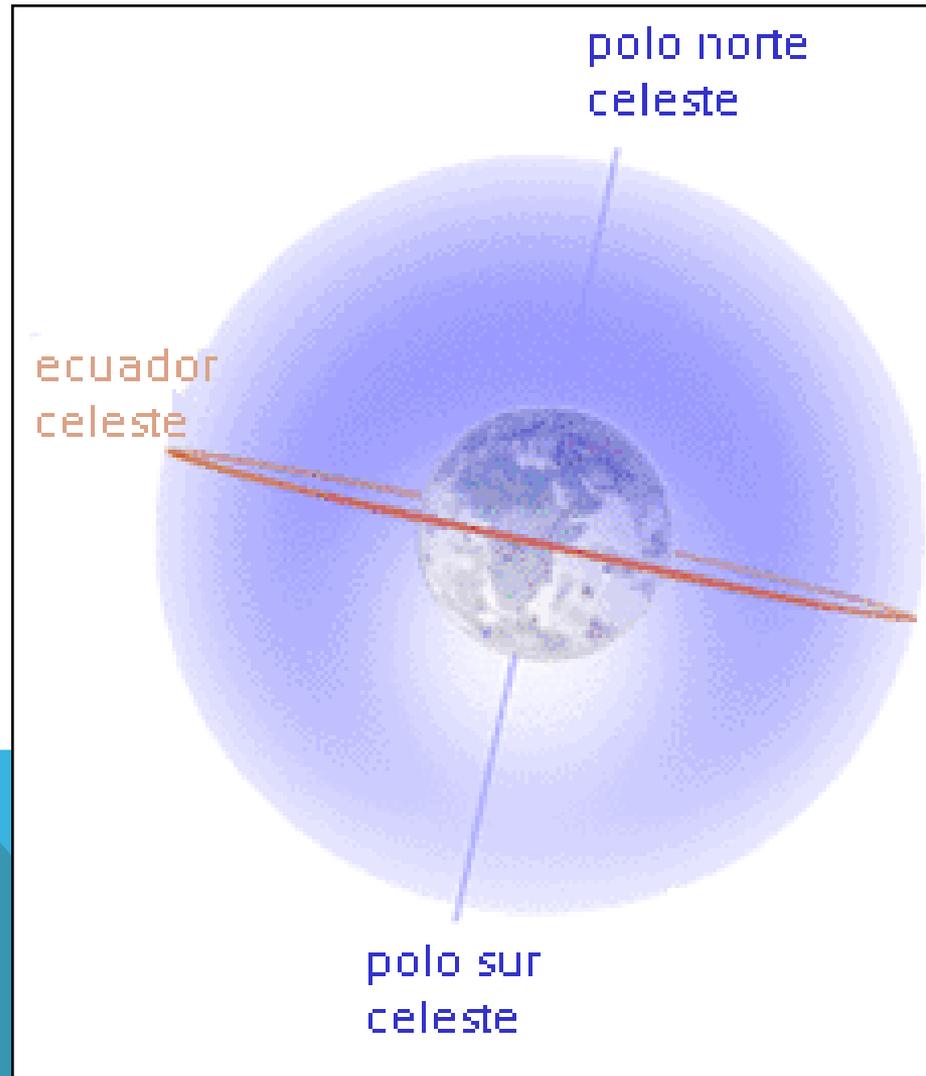
ESFERA CELESTE

Se llama *vertical* de un lugar a la dirección del hilo de la plomada , o sea la dirección de la fuerza de la gravedad en dicho punto. Prolongada indefinidamente intercepta a la esfera celeste en dos puntos diametralmente opuestos, Z (cenit) y N (nadir).

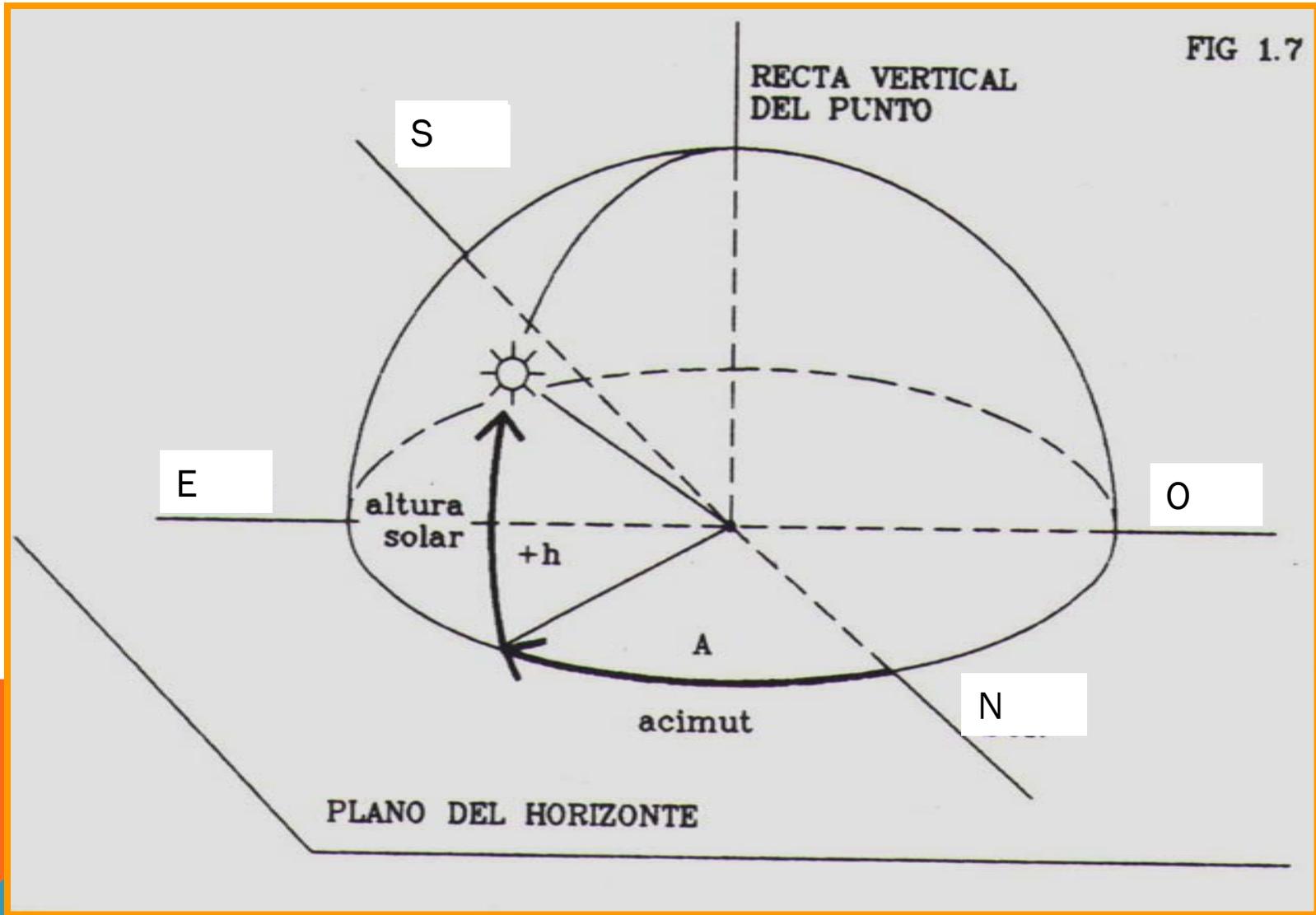
Se llama **horizonte** de un lugar al plano perpendicular a la vertical del lugar que pasa por el centro de la esfera celeste.

La vertical, el horizonte y el meridiano del lugar permiten representar la esfera celeste referida a un lugar determinado de la Tierra.

ESFERA CELESTE

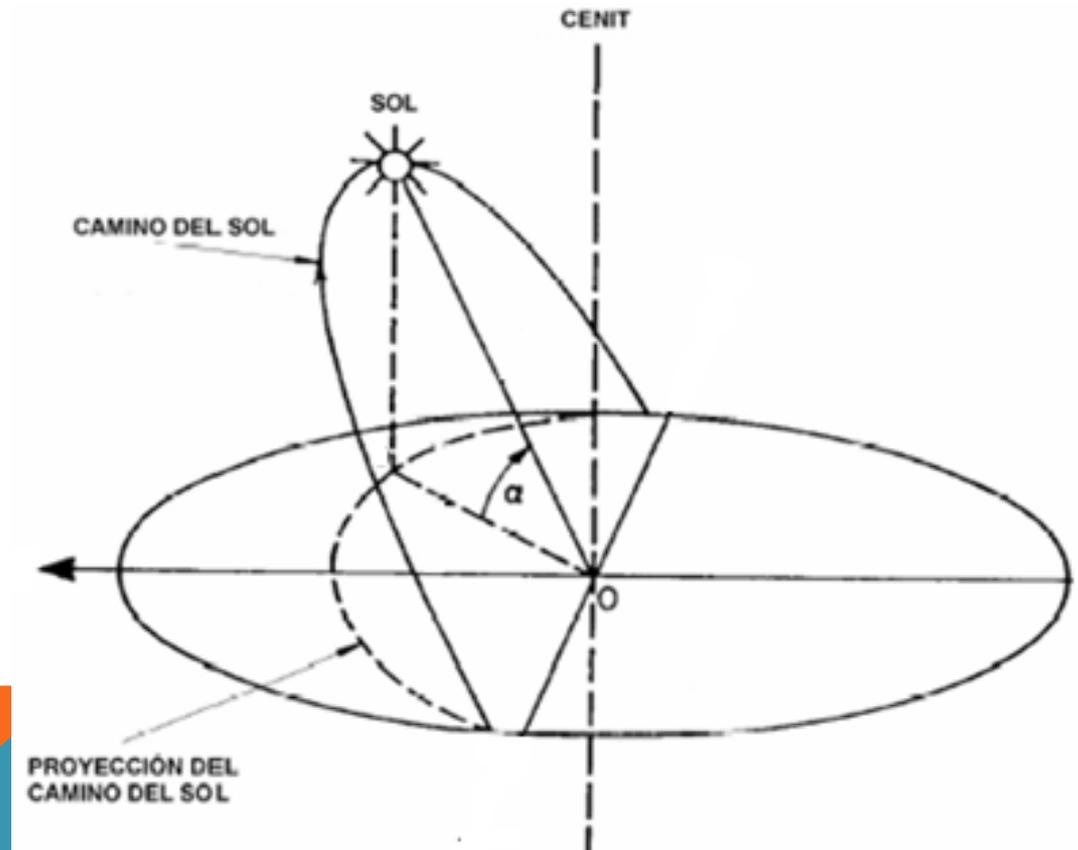


ÁNGULOS SOLARES



ALTURA SOLAR: A

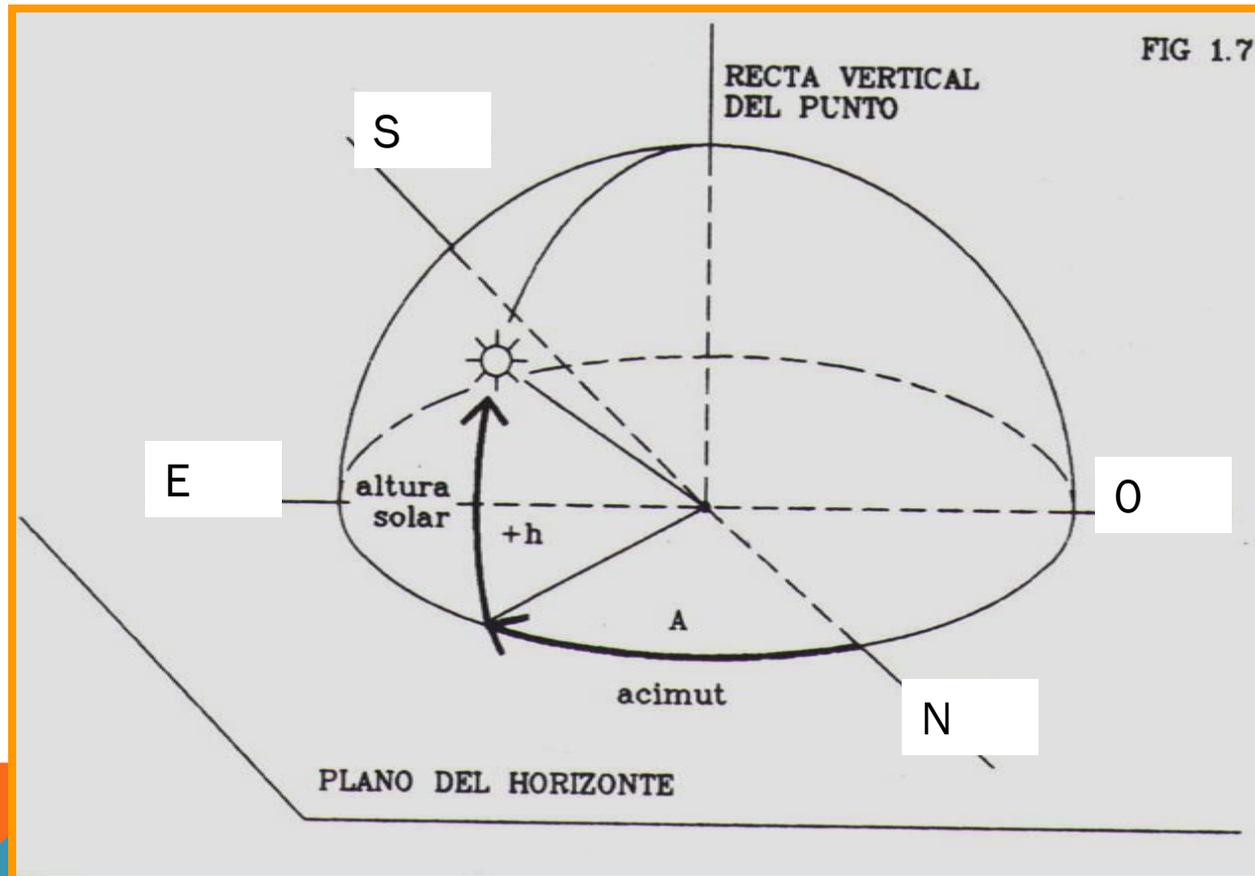
Altura solar: ¿cuánto subo para mirar el sol ?
La altura solar está entre 0 y 90°



Altitud solar (α) es la medida de la distancia angular desde el horizonte

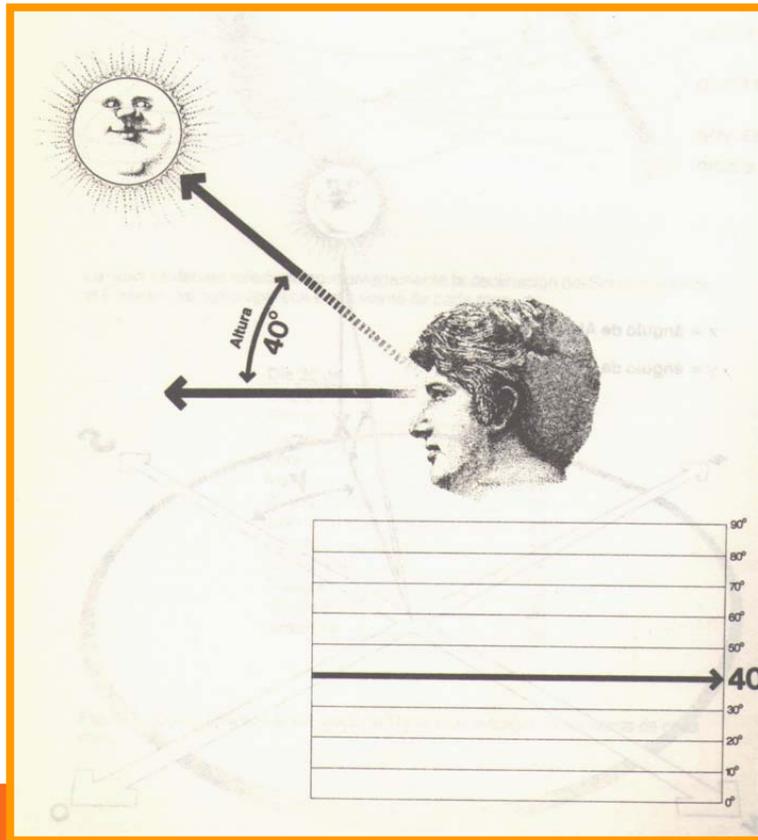
ACIMUT SOLAR: Ψ

¿Cuánto giro respecto al norte para observar el sol?
Mide el apartamiento de la dirección norte en el hemisferio sur.



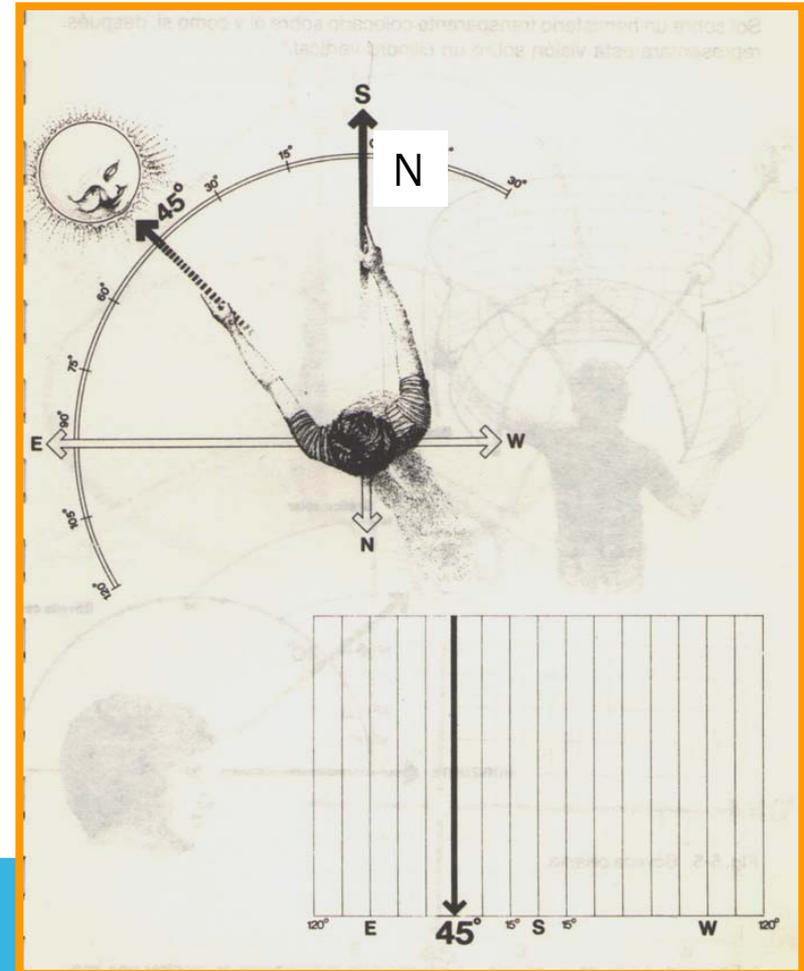
Su origen se encuentra mirando hacia el Norte en el hemisferio Sur
contándose como positivo hacia el Este (sentido horario)

ALTURA SOLAR Y ÁNGULO ACIMUTAL DEL SOL



¿Cuánto subo ?

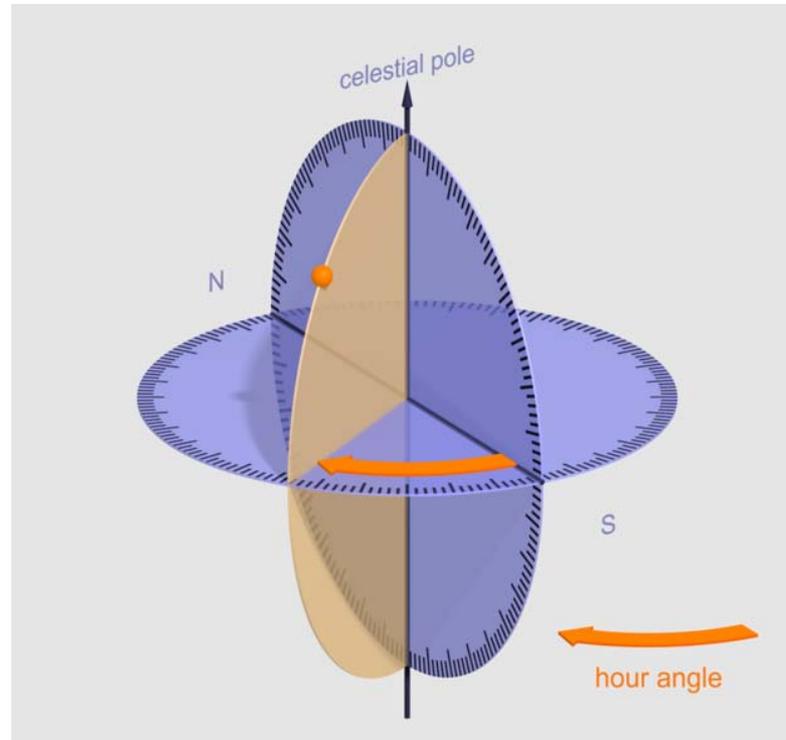
Altura solar



¿Cuánto giro respecto al norte?

Ángulo azimutal

ÁNGULO HORARIO



Es el arco de ecuador contado desde el punto de intersección del ecuador con el meridiano del observador hasta el círculo horario del astro, en sentido horario. Aunque se podría medir en grados, para su medida se usa la hora, unidad que equivale a 15° .

ÁNGULO HORARIO

$$\omega = \pm 15^{\circ/h} (12 - t_s)$$

Varía entre 0° y ± 180 .

Se mide desde el mediodía solar, ($\omega=0^{\circ}$), momento en que el sol cruza el meridiano del lugar.

Es positivo antes del mediodía solar y negativo después, en el hemisferio sur.

t_s (horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ω_s ($^{\circ}$)	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15	0

t_s (horas)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ω_s ($^{\circ}$)	-15	-30	-45	-60	-75	-90	-105	-120	-135	-150	-165	-180

¿A QUÉ HORA TENGO LA MÁXIMA RADIACIÓN?

Cuando el sol se encuentra en el punto más alto de su trayectoria ,es decir cuando ω es igual a cero o al mediodía solar.

$$\omega = \pm 15^{\circ/h} (12 - t_s) = 0$$
$$t_s = 12hs$$

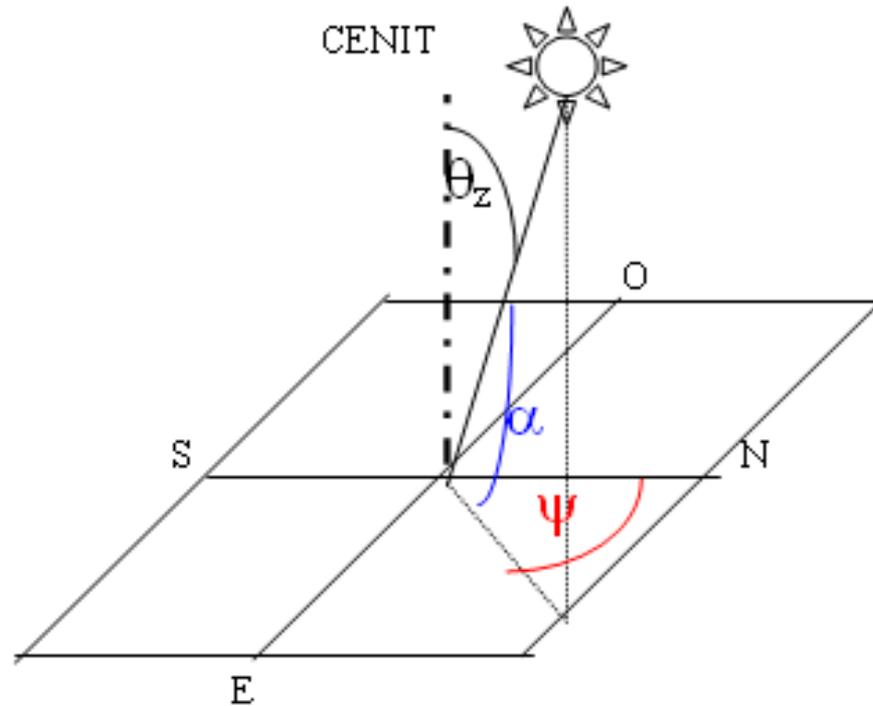
La hora de máxima radiación el 1de enero (n=1)
Mendoza ($\phi = -32.83$; $L_{obs} = 68.82$) si $\Delta = 0$ y $L_{of} = 45$

$$t_{of} = t_s - \Delta - (1^{hora} / 15^{\circ}) x (L_{of} - L_{obs}) - E$$

$$t_{of} = 12 - 0 - (1/15) x (45 - 68.82) - (0.062) = 13.65$$

A las 13:39

TODOS LOS ÁNGULOS SOLARES: RESPECTO DE UN PLANO HORIZONTAL



$$\theta_z + \alpha = 90^\circ$$

Ángulo cenital: ángulo entre la línea del cenit y una línea dirigida hacia el sol

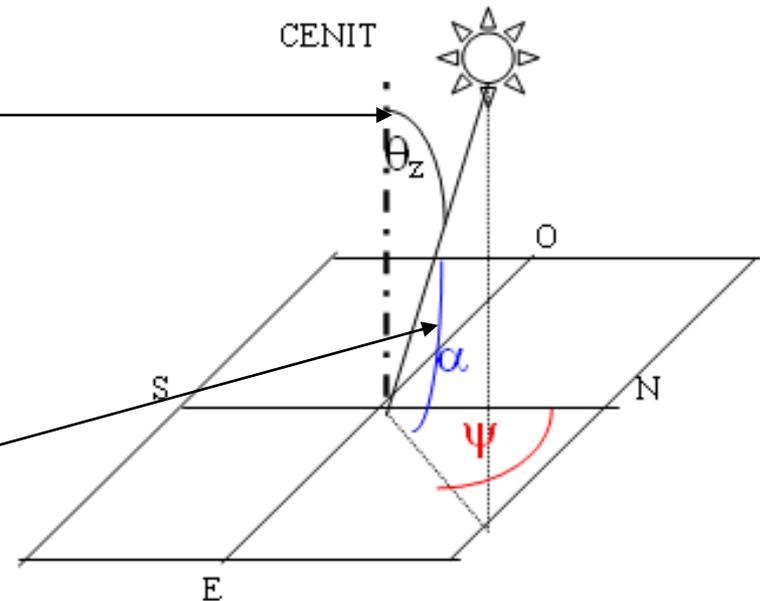
RELACIÓN CON LA IRRADIANCIA SOLAR

$$I_{on} = I_{sc} [1 + 0,33 \cos 360 (n-2) / 365] \cos \theta_z$$

$$\cos \theta_z = \text{sen} \delta \text{sen} \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \text{sen} \alpha$$

A medida que el ángulo cenital disminuye la irradiancia aumenta

A medida que la altura solar aumenta la irradiancia aumenta



REPASO :ÁNGULOS SOLARES

Respecto de un observador sobre la tierra

¿Cuánto subo?



Altitud solar (α)

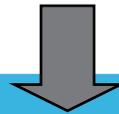
¿Cuánto giro ?



Acimut solar (ψ)

Respecto del cenit

Cenit: Posición del sol en el mediodía solar.



Ángulo cenital (θ_z)

El ángulo cenital (θ_z) es la distancia angular desde el cenit a una línea dirigida al sol.

SALIDA Y PUESTA DEL SOL

De la fórmula del ángulo de incidencia para un plano horizontal:

$$\cos \theta_z = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \operatorname{sen} \alpha$$

$$\text{Si } \theta_z = 90^\circ$$

$$\omega_s = \arccos(-\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta)$$

VALOR MEDIO MENSUAL DEL ÁNGULO HORARIO

Para un valor de declinación medio en un lugar ubicado a una latitud ϕ , se determina un valor de ángulo solar de salida del sol ω_s medio para el mes, deseado, a partir de la siguiente fórmula:

$$\bar{\omega}_s = \arccos(-\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \bar{\delta})$$

RADIACIÓN A TOPE DE ATMÓSFERA VALOR MEDIO MENSUAL

$$\overline{H}_o = (24 / \pi) 3600 I_{sc} \left[1 + 0.33 \cos(360^\circ (\overline{n}_d - 2) / 365) \right] \\ \times \left[\cos \phi \cos \overline{\delta} \sin \overline{\omega}_s + \overline{\omega}_s (\pi / 180^\circ) \sin \phi \sin \overline{\delta} \right]$$

\overline{n}_d Día Juliano medio mensual

Latitud

$\overline{\omega}_s$ Valor medio del ángulo de salida del sol

I_{sc} Constante solar

$\overline{\delta}$ Declinación media mensual

CONCLUSIONES

Para conocer la cantidad radiación que recibe un plano horizontal, es necesario conocer la radiación a tope de atmósfera y tener datos promedios medidos del lugar.

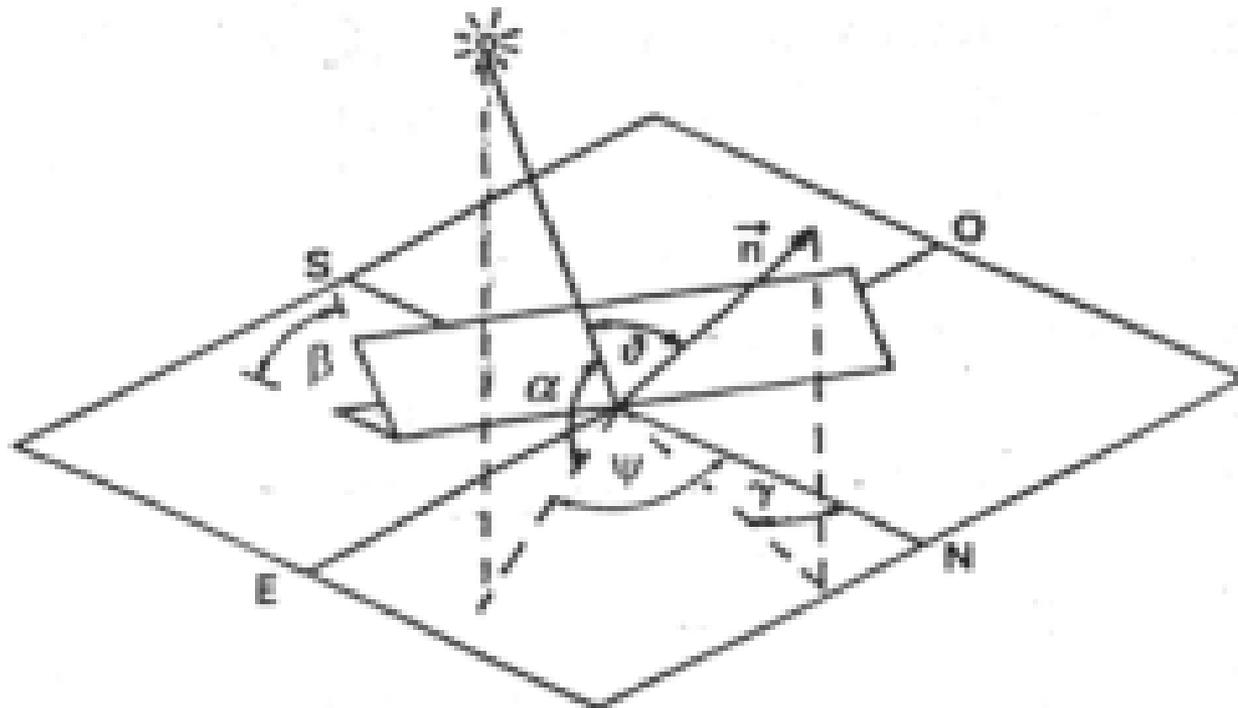
Los valores de radiación a tope de atmósfera pueden ser calculados utilizando la geometría solar, para cualquier lugar y momento del año.



DURACIÓN DEL DÍA

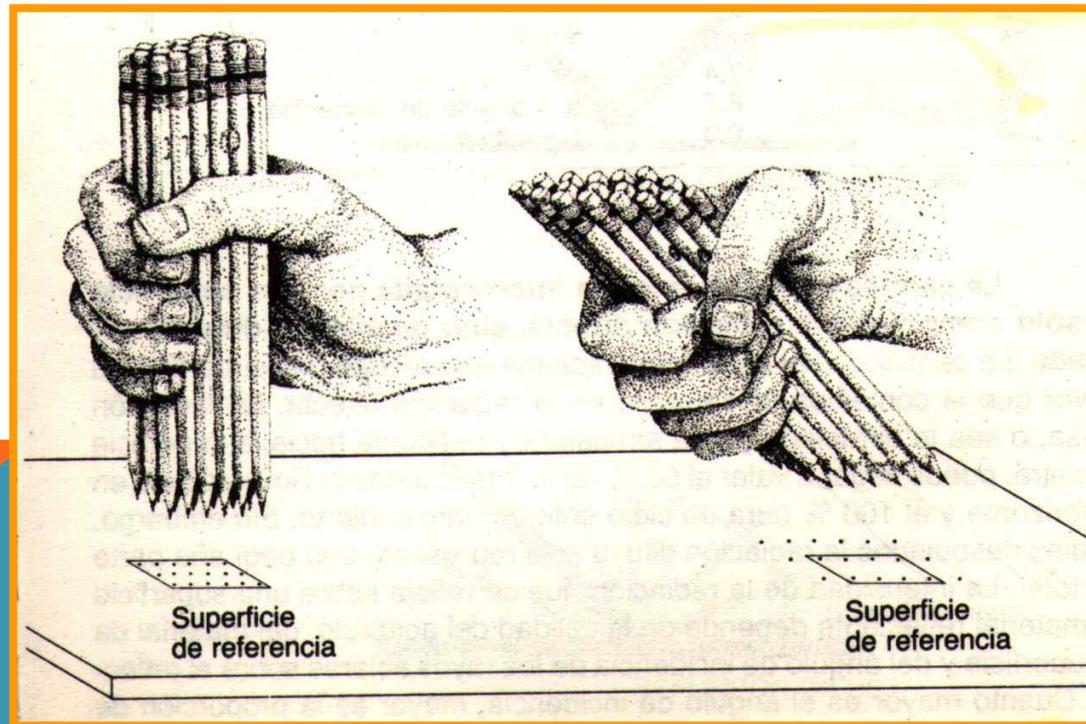
$$N = 2\omega_s / 15^\circ = (2/15) \arccos(-\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta)$$

ÁNGULOS SOLARES: RESPECTO DE UNA SUPERFICIE INCLINADA

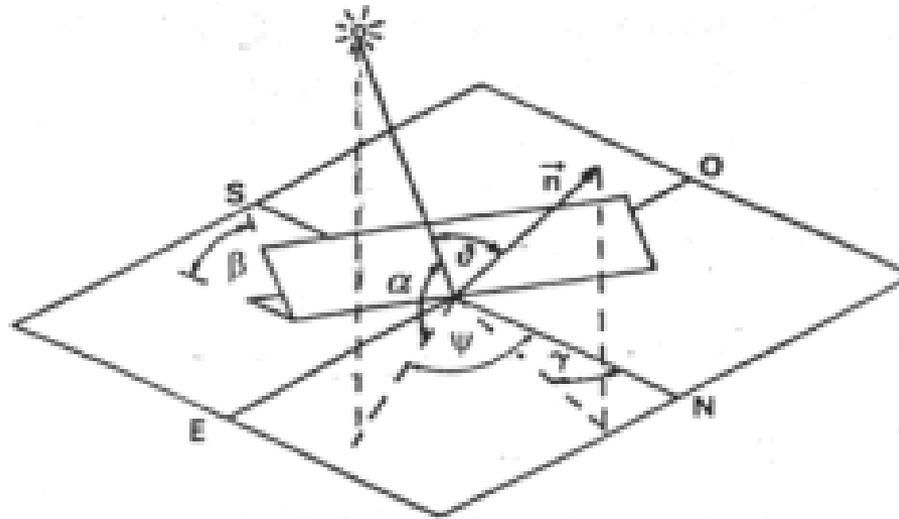


INCLINACIÓN DEL PLANO

Si se inclina la superficie que capta la radiación solar un valor igual a la latitud más 10° se optimiza la cantidad de radiación recibida. (para una inclinación fija)

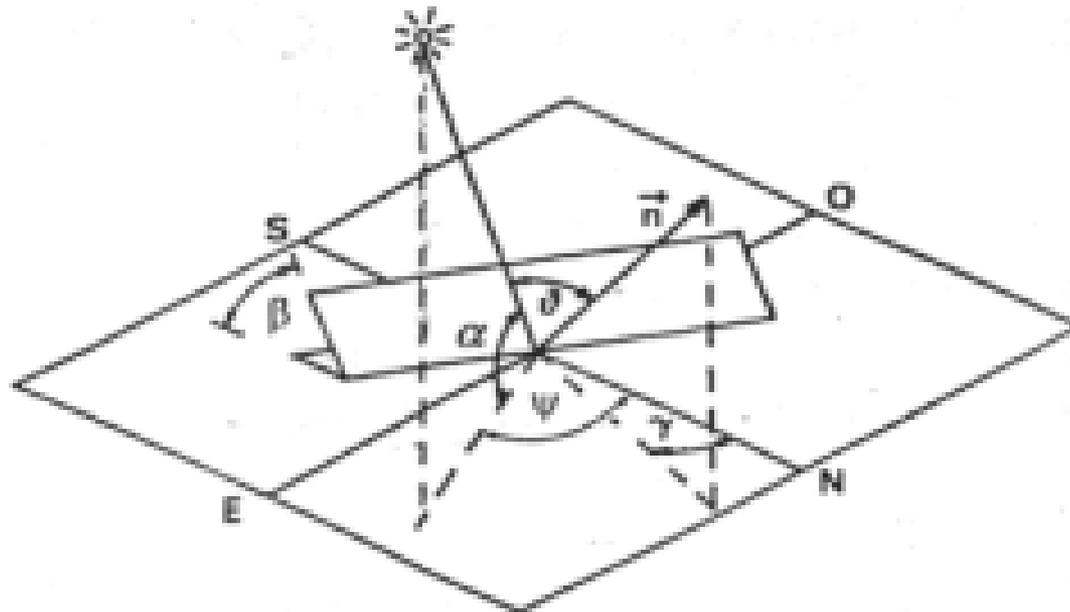


ÁNGULO DE INCLINACIÓN (β)



Ángulo de inclinación (β) sobre la horizontal, es medido desde la horizontal creciendo a medida que el extremo sur del plano se levanta hacia el Ecuador.

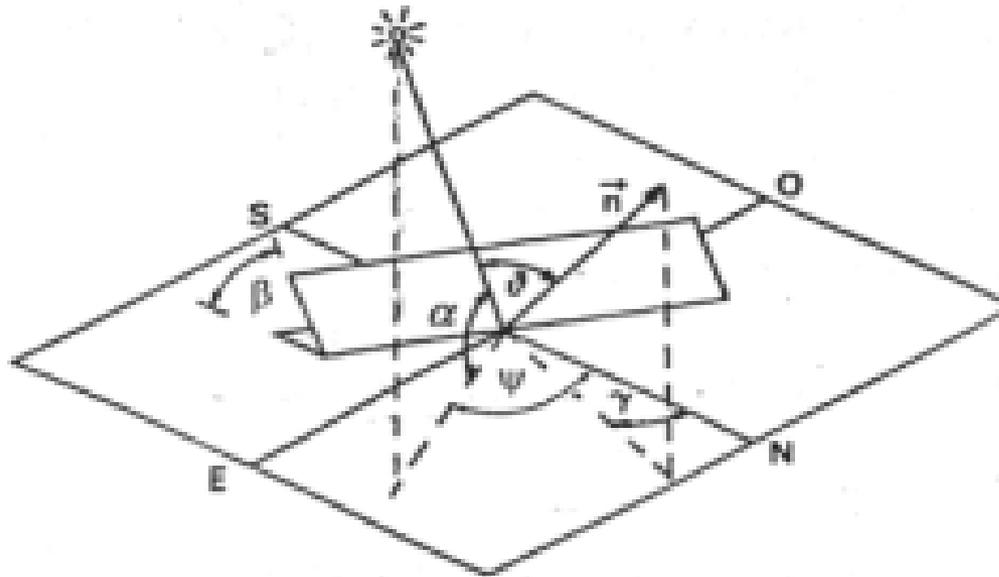
ÁNGULOS ACIMUTAL(Γ)



ÁNGULO DE INCIDENCIA SOLAR

El ángulo de incidencia solar (θ) se define como el ángulo entre la normal a la superficie plana y el rayo solar.

Mientras más pequeño es mayor intensidad de radiación incide sobre la superficie.



ÁNGULO DE INCIDENCIA: PLANO QUE MIRA AL NORTE

Si el plano mira hacia el norte $\gamma = 0$

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \text{sen}(\phi - \beta) \text{sen} \delta$$

El valor ideal de la inclinación es igual al valor de la latitud más 10° .

Comparación entre tres situaciones.

RADIACIÓN A TOPE DE ATMÓSFERA VALOR MEDIO MENSUAL

$$\overline{H}_o = (24 / \pi) 3600 I_{sc} \left[1 + 0.33 \cos(360^\circ (\overline{n}_d - 2) / 365) \right] \\ \times \left[\cos \phi \cos \overline{\delta} \sin \overline{\omega}_s + \overline{\omega}_s (\pi / 180^\circ) \sin \phi \sin \overline{\delta} \right]$$

\overline{n}_d Día Juliano medio mensual

Latitud

$\overline{\omega}_s$ Valor medio del ángulo de salida del sol

I_{sc} Constante solar

$\overline{\delta}$ Declinación media mensual

VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN SOLAR RECIBIDA POR UNA SUPERFICIES

Un objeto recibe mayor cantidad de radiación cuando:

El ángulo cenital o de incidencia es de 90°

El sol se encuentra en el punto más alto de su trayectoria (mediodía solar)

Es verano, ya que la radiación recorre menos distancia para llegar a la superficie.

Cuando está despejado y hay pocas partículas en suspensión.

El lugar se encuentra más cerca del Ecuador, es decir tiene una latitud menor.



VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN SOLAR RECIBIDA POR UNA SUPERFICIES

Orientación de la superficie(ángulo de 90°)

Momento del día(Mediodía solar)

Estación del año(Movimiento de la Tierra)

Estado meteorológico(Nubes)

Sombras producidas por objetos de grandes dimensiones(Edificios, montañas)

Coordenadas geográficas del lugar(Latitud y longitud)

