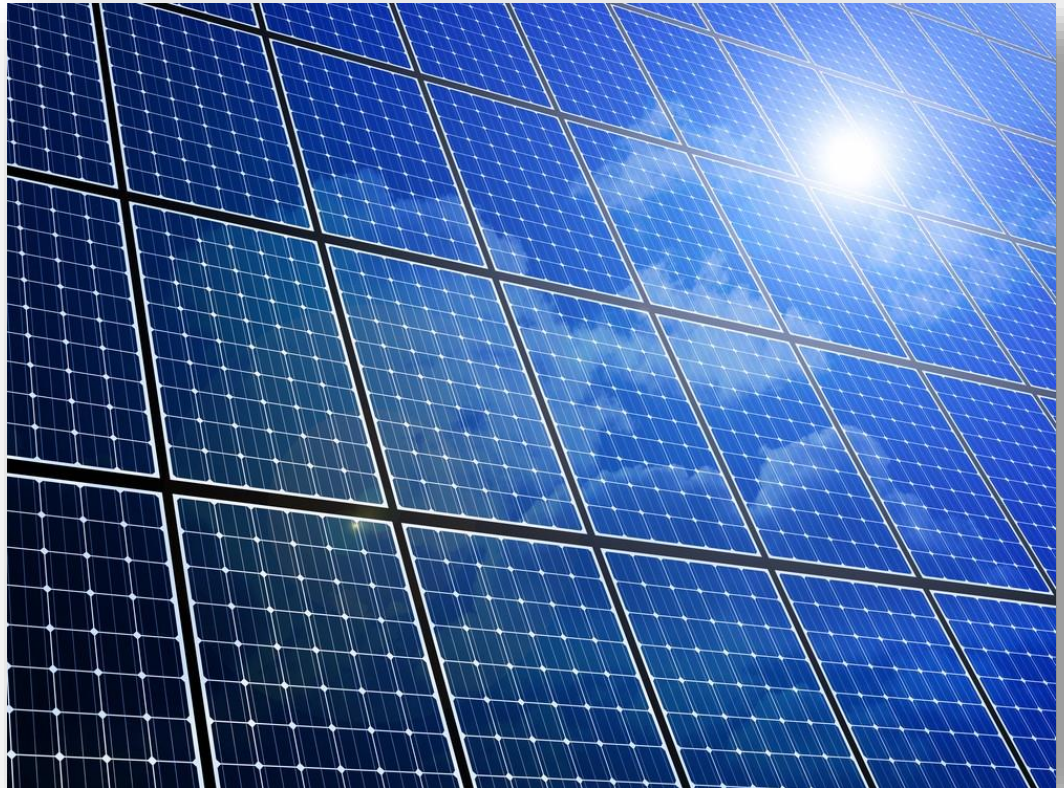


ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA –CURSO 2024

RECURSO SOLAR

Primera Clase

Ing. Diego Oroño
Ing. Gonzalo Hermida



Objetivos

- Posicionamiento del Sol
- Ubicación de sombras en el diagrama solar
- Distancia entre paneles
- Inclinação óptima
- Estimación de irradiación sobre un plano inclinado a partir de valores en el plano horizontal



Temario



- Introducción
- Movimiento aparente solar
- Dimensionamiento
- Estimación de la irradiación solar incidente
- Medición



Temario

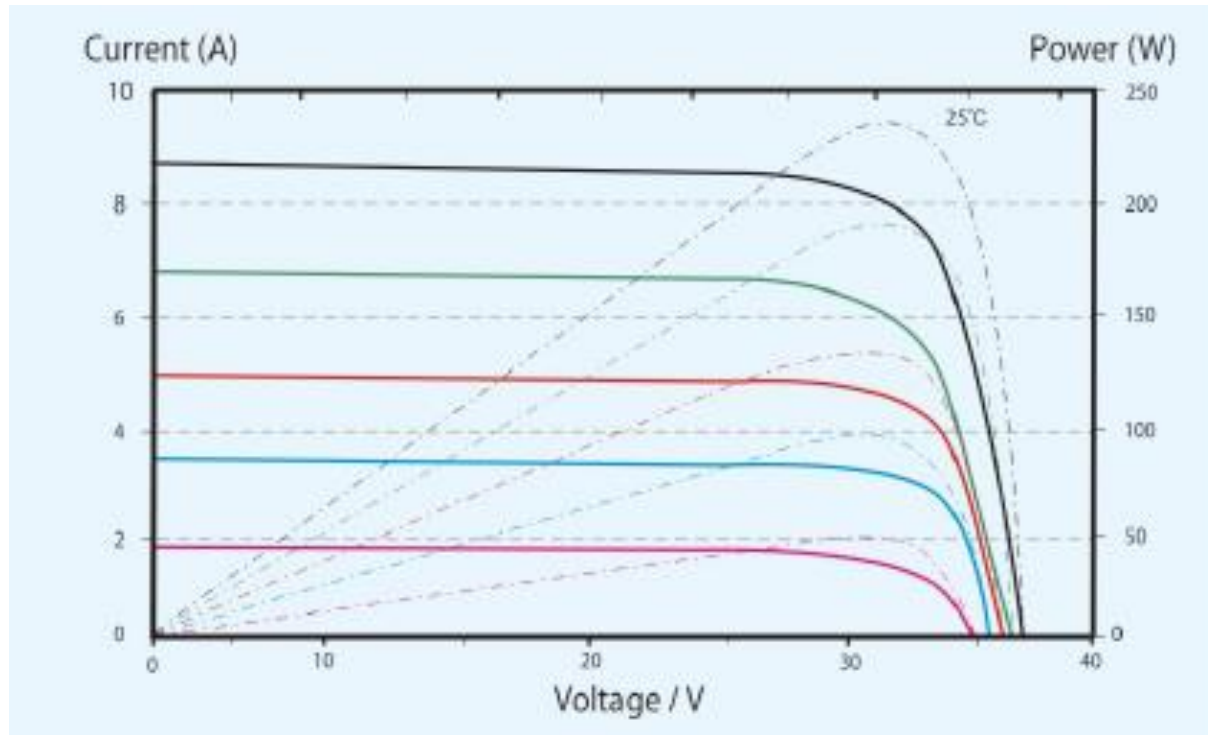


- Introducción
- Movimiento aparente solar
- Dimensionamiento
- Estimación de la irradiación solar incidente
- Medición



Generación Fotovoltaica

- $E_{GeneradaPV} = f(G_{Incidente}, \dots)$



- Curva IV y PV de módulo fotovoltaico



Características del Recurso Solar

Ventajas

- Inagotable.
- Libre de costo.
- Disponible.

Desventajas

- Intermitencia. Depende de la hora y las condiciones meteorológicas.
- Baja densidad de potencia ($\sim 1 \text{ kW/m}^2$ en días claros).

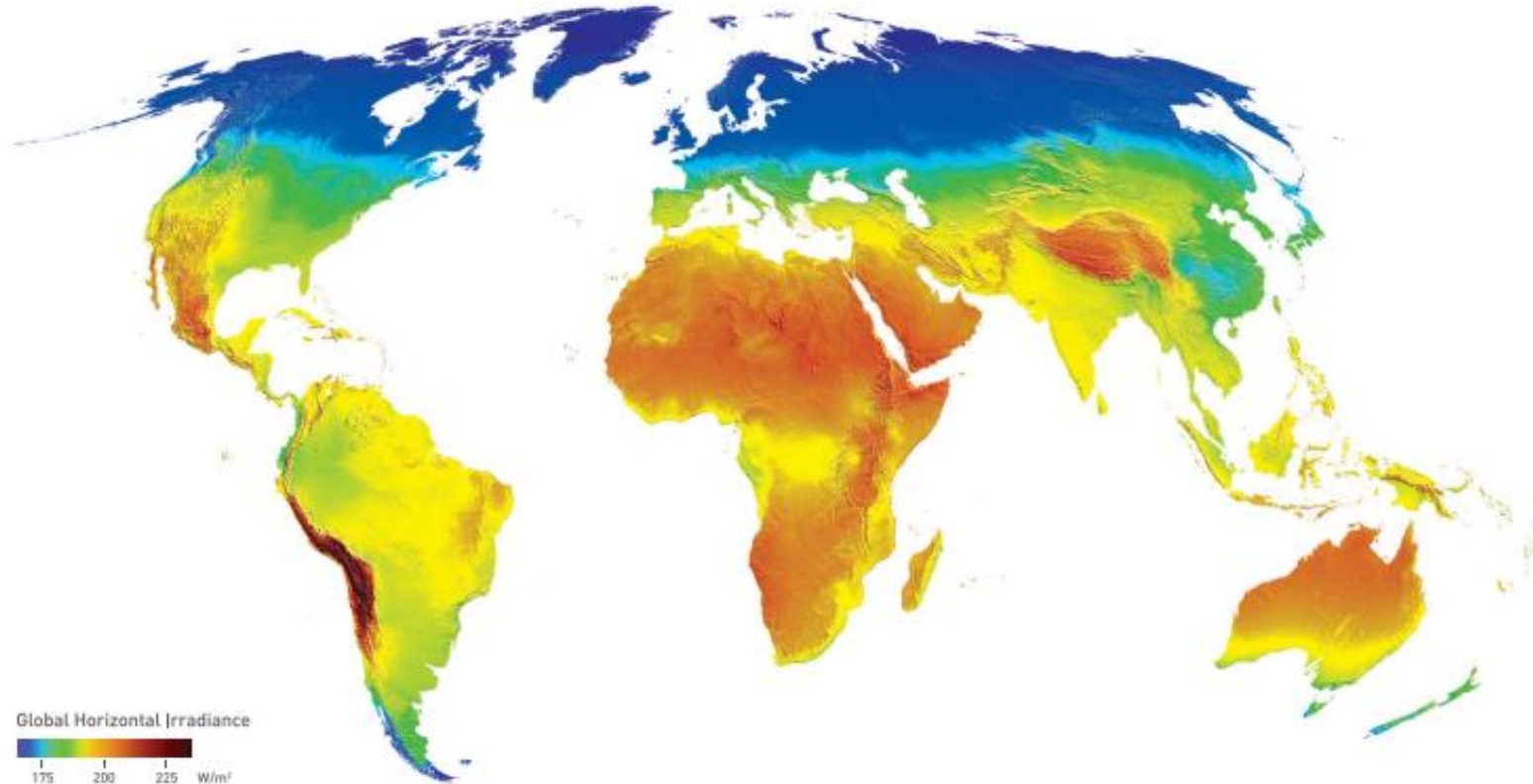
Variabilidad espacial



Global Mean Solar Irradiance

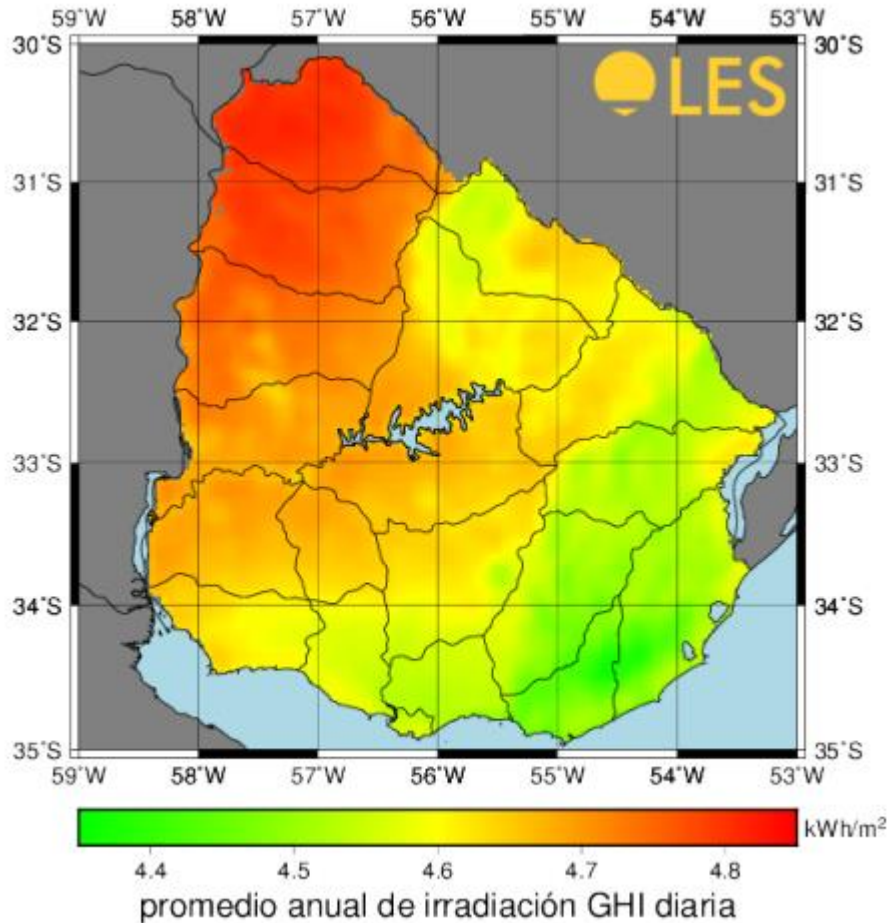


3TIER
by Vaisala



www.3tier.com | © 2014 3TIER by Vaisala

Variabilidad espacial



- Mapa solar Uruguayo

<http://les.edu.uy/>

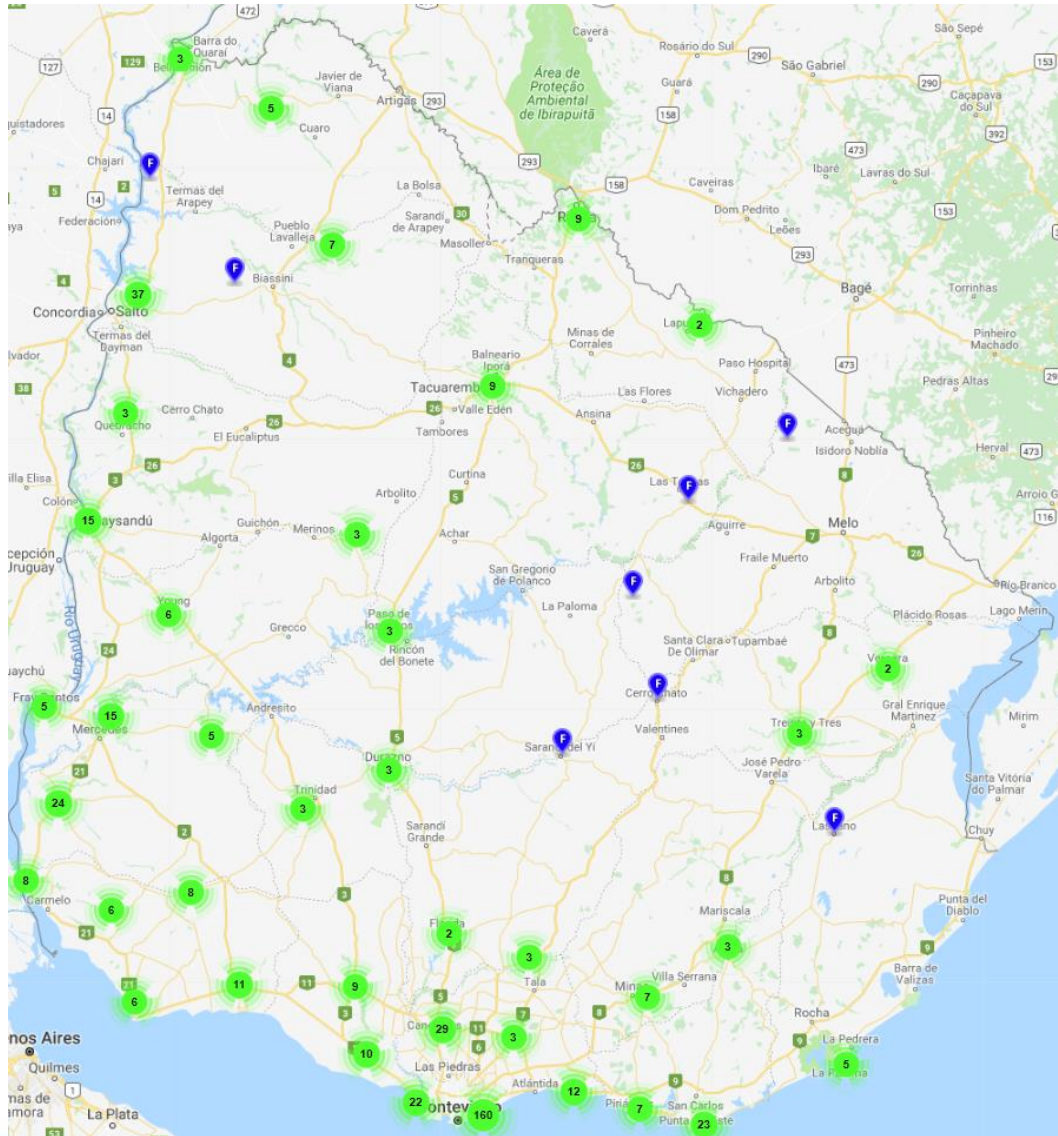
Variabilidad espacial



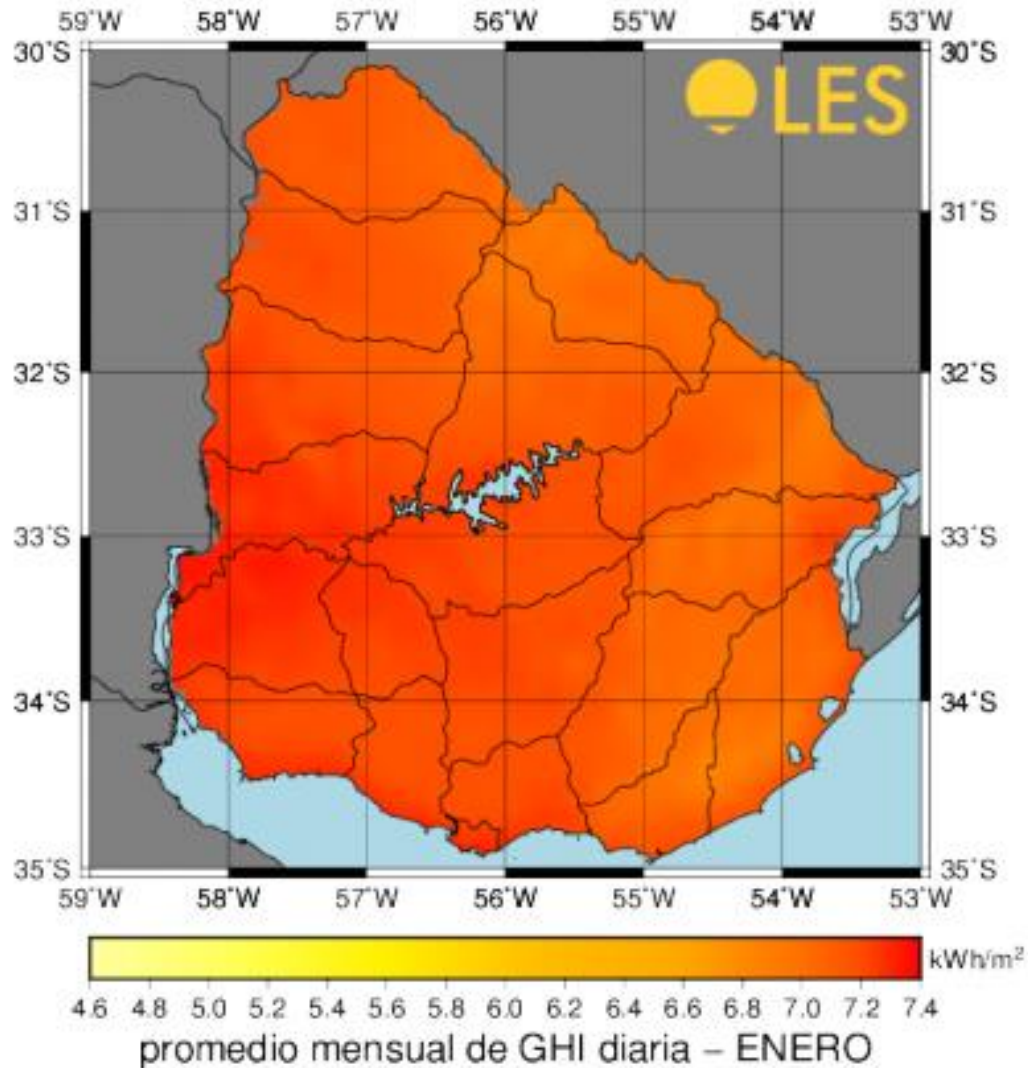
Generador	Potencia (MW)
ALTO CIELO	20.0
ARAPEY SOLAR	10.0
ASAHI	0.5
CASALCO	1.8
CERNEAL S.A.	1.0
CERROS DE VERA SOLAR	0.1
DEL LITORAL	16.0
DICANO	11.3
EL NARANJAL	50.0
FENIMA	9.5
GILPYN S.A.	1.0
HIKARI	0.3
LA JACINTA	50.0
MENAFRA SOLAR	20.0
NATELU	9.5
PARQUE ALBISU	10.0
PETILCORAN	9.5
PUNTA DEL TIGRE FOTOVOLTAICO	26.0
RADITON	8.0
VINGANO	1.0
YARNEL	9.5
TOTAL	264.8



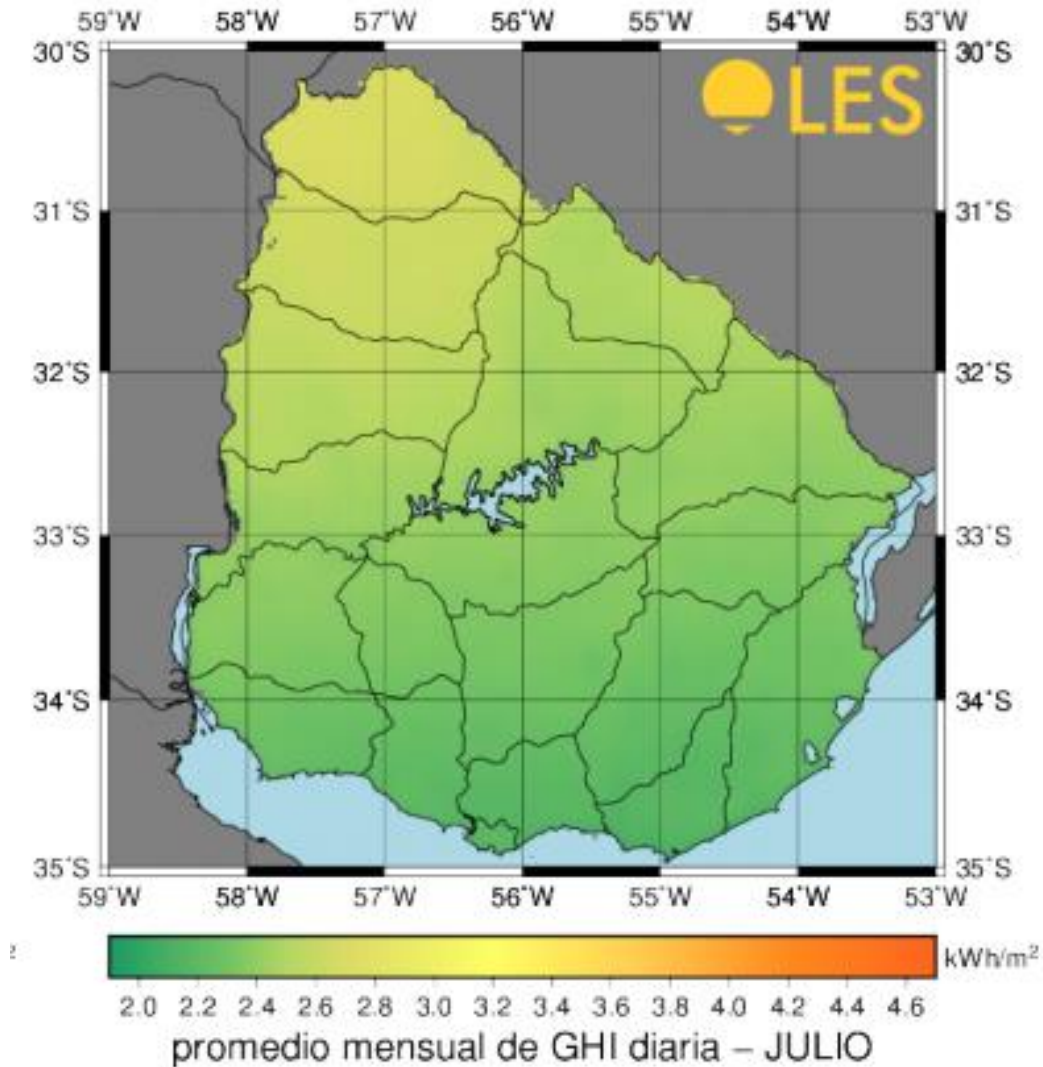
Variabilidad espacial

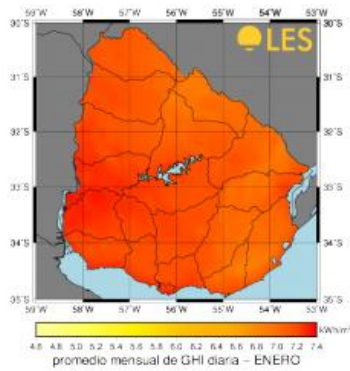


Variabilidad estacional

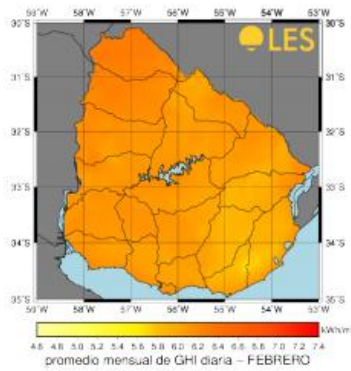


Variabilidad estacional

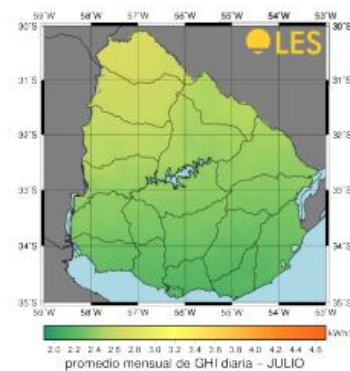




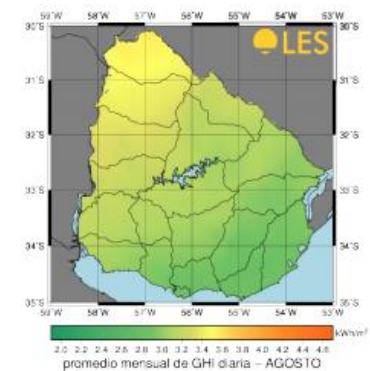
Enero.



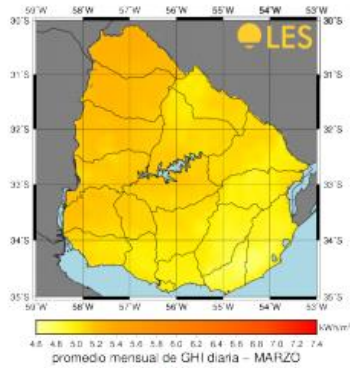
Febrero.



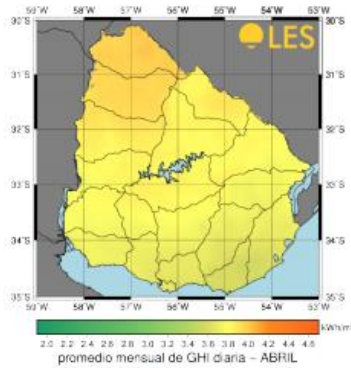
Julio.



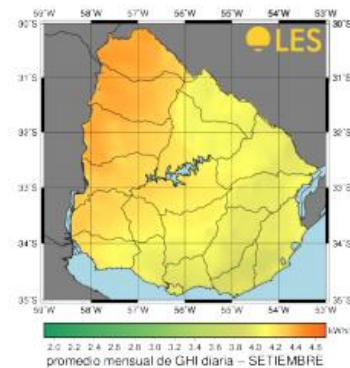
Agosto.



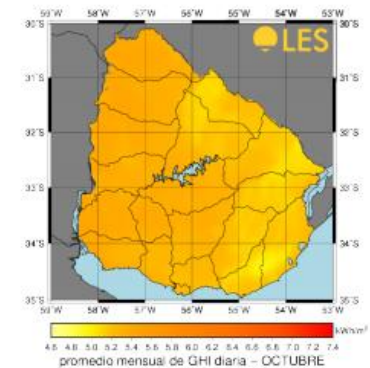
Marzo.



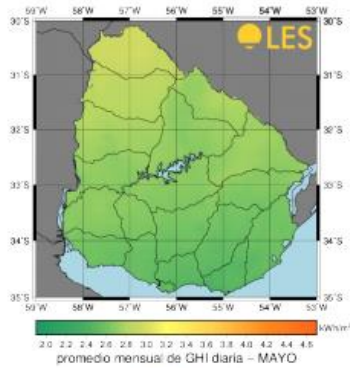
Abril.



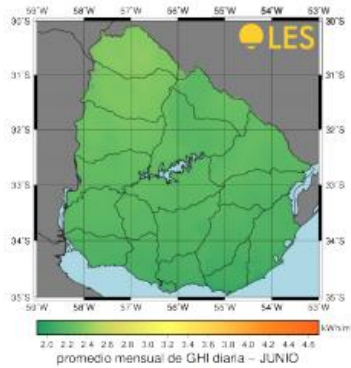
Setiembre.



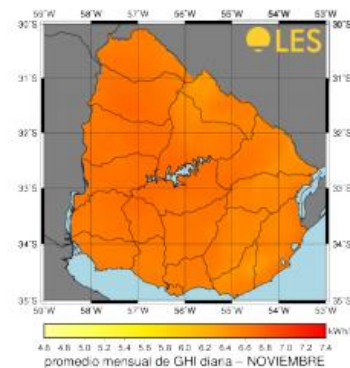
Octubre.



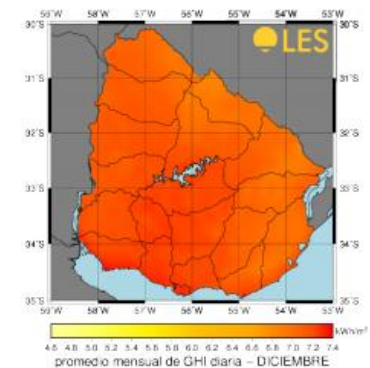
Mayo.



Junio.



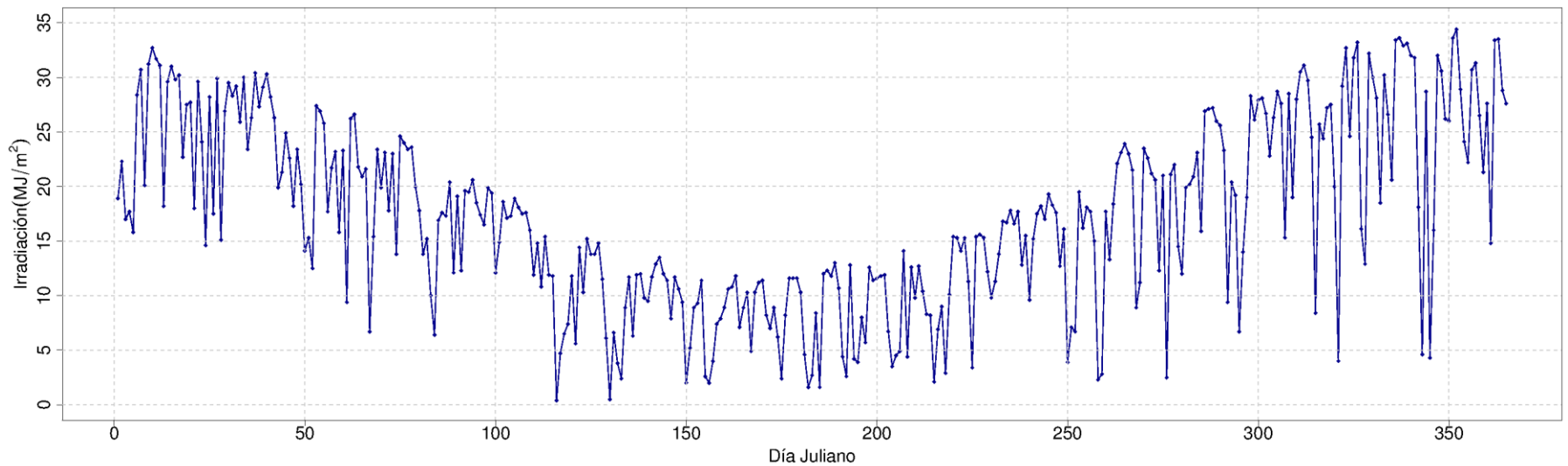
Noviembre.



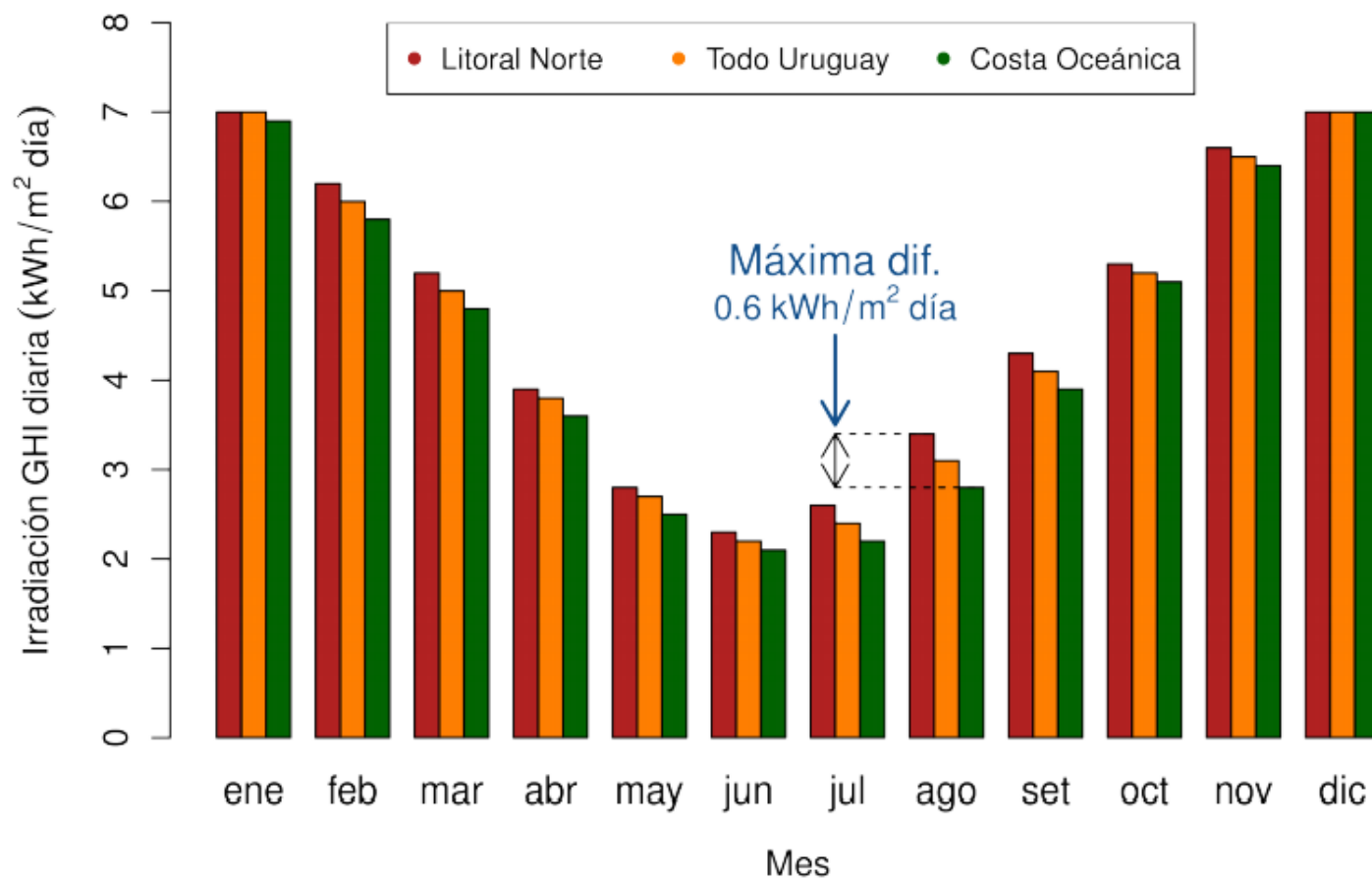
Diciembre.

Variabilidad temporal

Irradiación global en plano horizontal a escala diaria



Variabilidad temporal



Temario



- Introducción
- **Movimiento aparente solar**
- Dimensionamiento
- Estimación de la irradiación solar incidente
- Medición

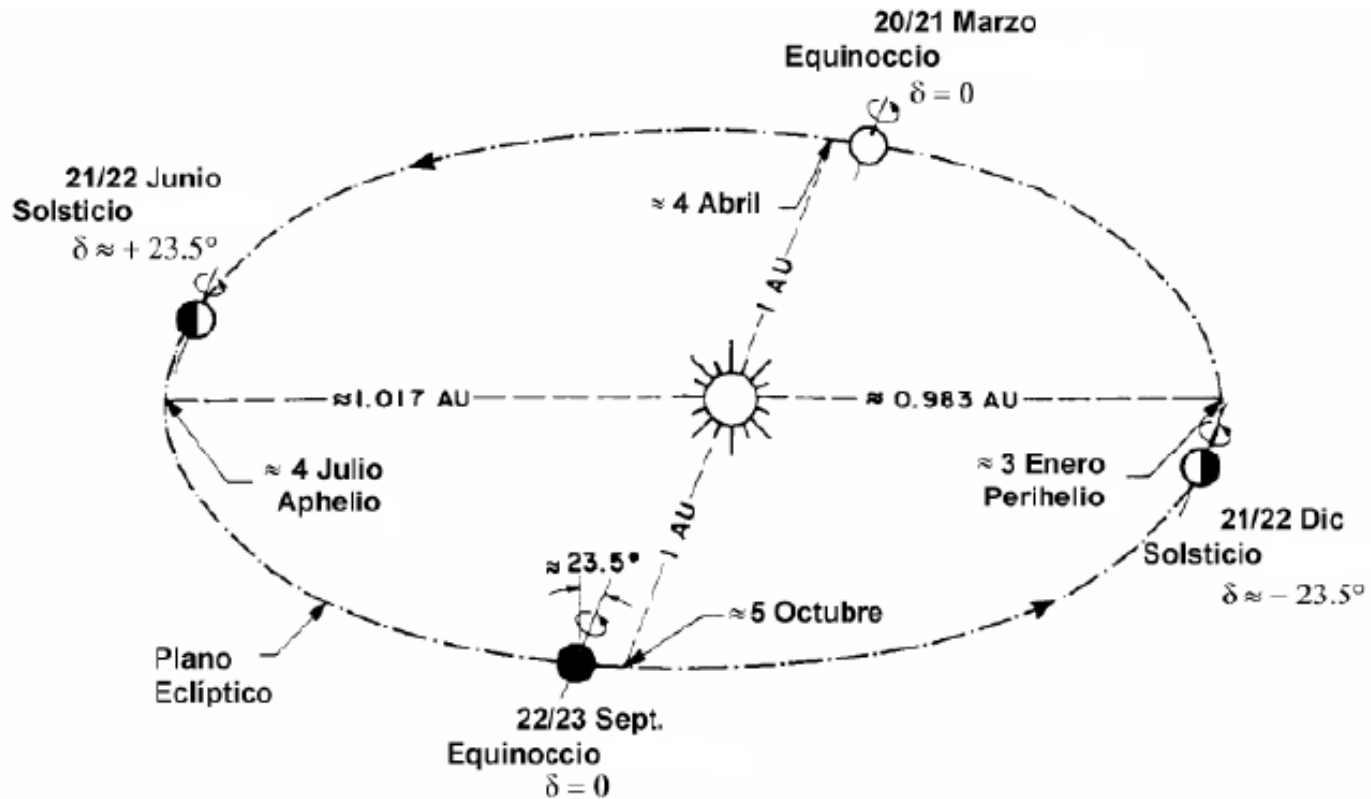


Movimiento aparente solar

- Orbita terrestre.
- Declinación Solar
- Ángulo Horario.
- Ángulo Cenital, Altura Solar y Acimut Solar.
- Inclinação y Orientación de la superficie.
- Angulo de incidencia en una superficie



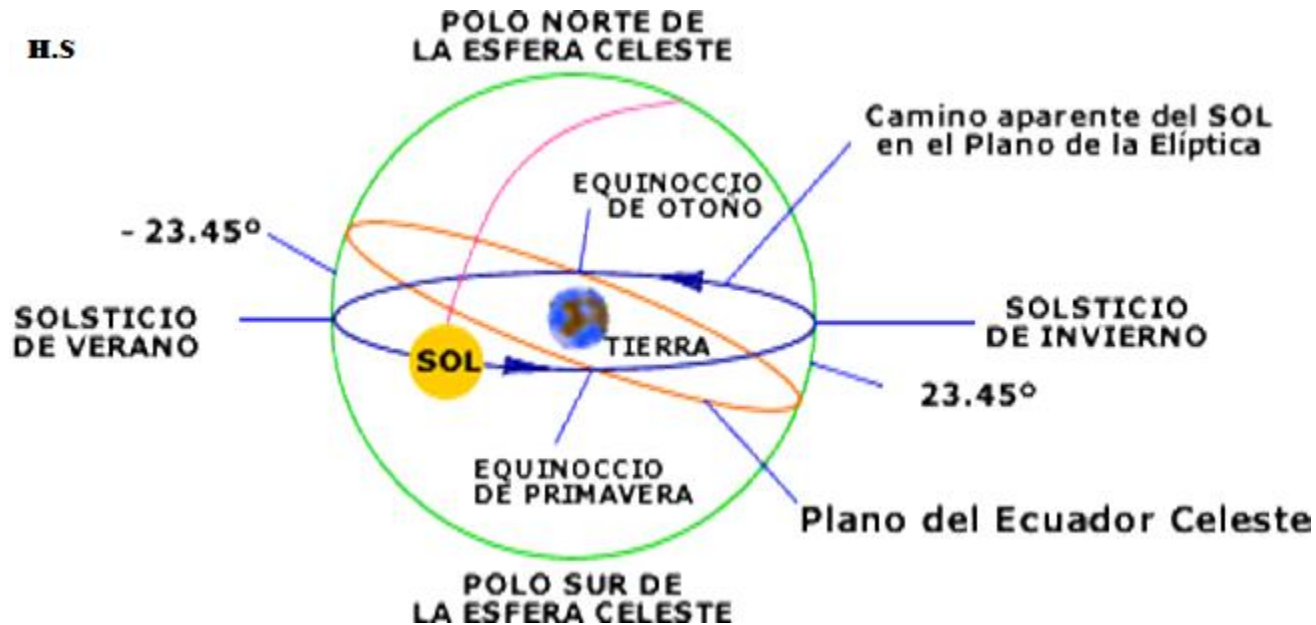
Excentricidad:



Eje de rotación de la Tierra forma un ángulo de 23.45° con la perpendicular al plano de la orbita.

Declinación Solar (δ):

- corresponde al ángulo que forma la línea Tierra-Sol con el plano ecuatorial a la Tierra. Este ángulo varía con el tiempo, alcanza un máximo de $\pm 23,45^\circ$ en los solsticios y es nulo en los equinoccios



Declinación Solar (δ):

Ecuación de Spencer para la Declinación Solar (más precisa):

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos(\Gamma) + 0,070257 \sin(\Gamma) - 0,006758 \cos(2\Gamma) \\ + 0,000907 \sin(2\Gamma) - 0,002697 \cos(3\Gamma) + 0,00148 \sin(3\Gamma)$$

Donde:

$$\Gamma \equiv 2\pi(n - 1)/365$$

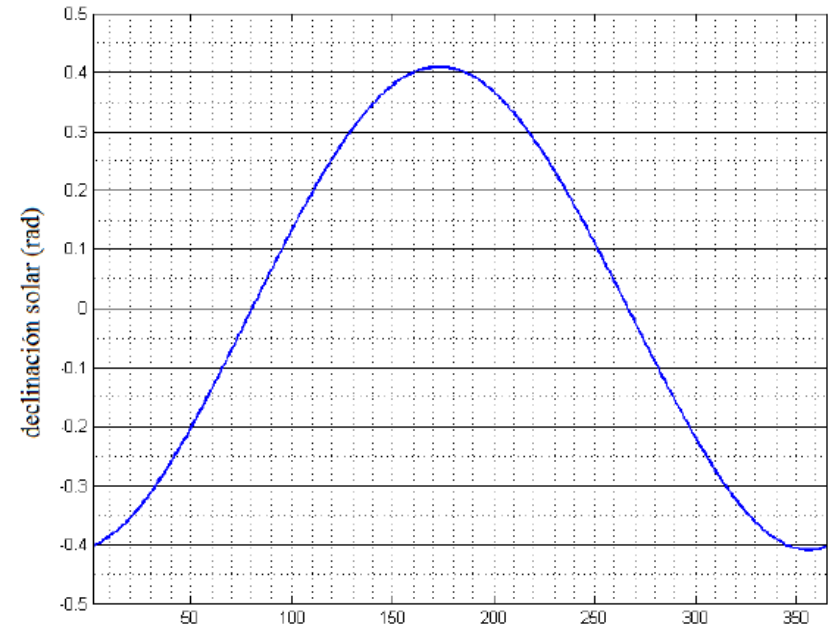
n – ordinal día

Ecuación de Cooper (menos precisa):

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

Donde:

$$\delta_0 = 23,45^\circ$$



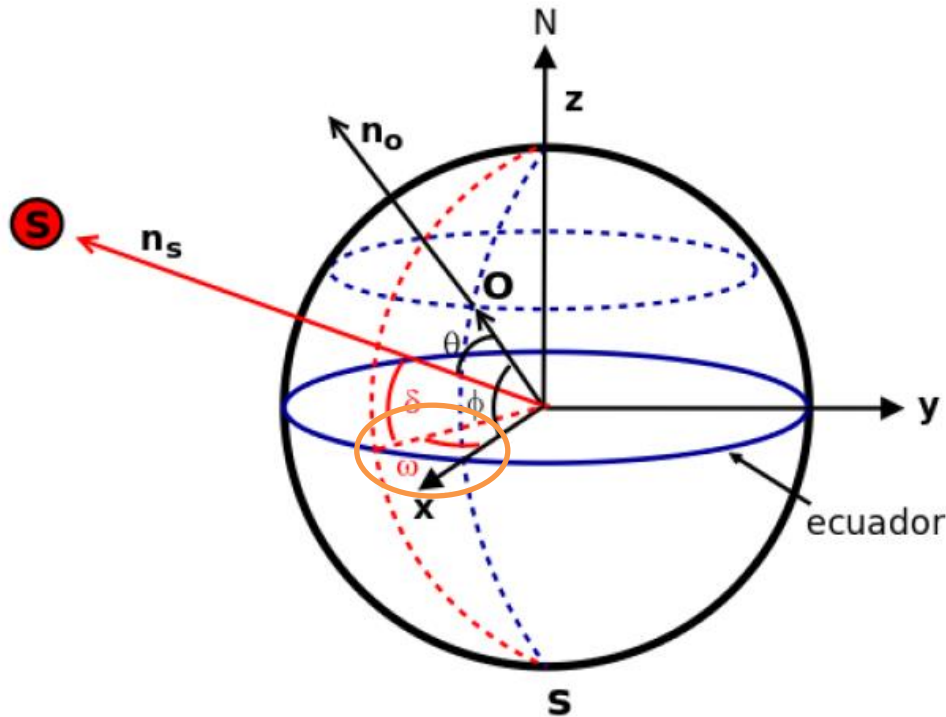
Ordinal día:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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

Ángulo Horario:

ω

Ángulo formado entre el meridiano que contiene a la línea Tierra-Sol y el meridiano del observador.



Convención de signos:

$\omega = 0$ en el mediodía solar

$\omega < 0$ en las mañanas

$\omega > 0$ en las tardes

Este ángulo varía a una tasa aproximada de 15 °/hora y define el Tiempo Solar

Tiempo Solar

Tiempo Solar:

$$t_S = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right)$$

NOTACIÓN:

Tiempo Solar - t_S

Tiempo Estándar - t_{UTC}

Tiempo Observador - t_O

Tiempo Estándar: es el principal estándar de tiempo por el cual el mundo regula los relojes y el tiempo.

Tiempo Observador: : tiempo corregido por Longitud del observador

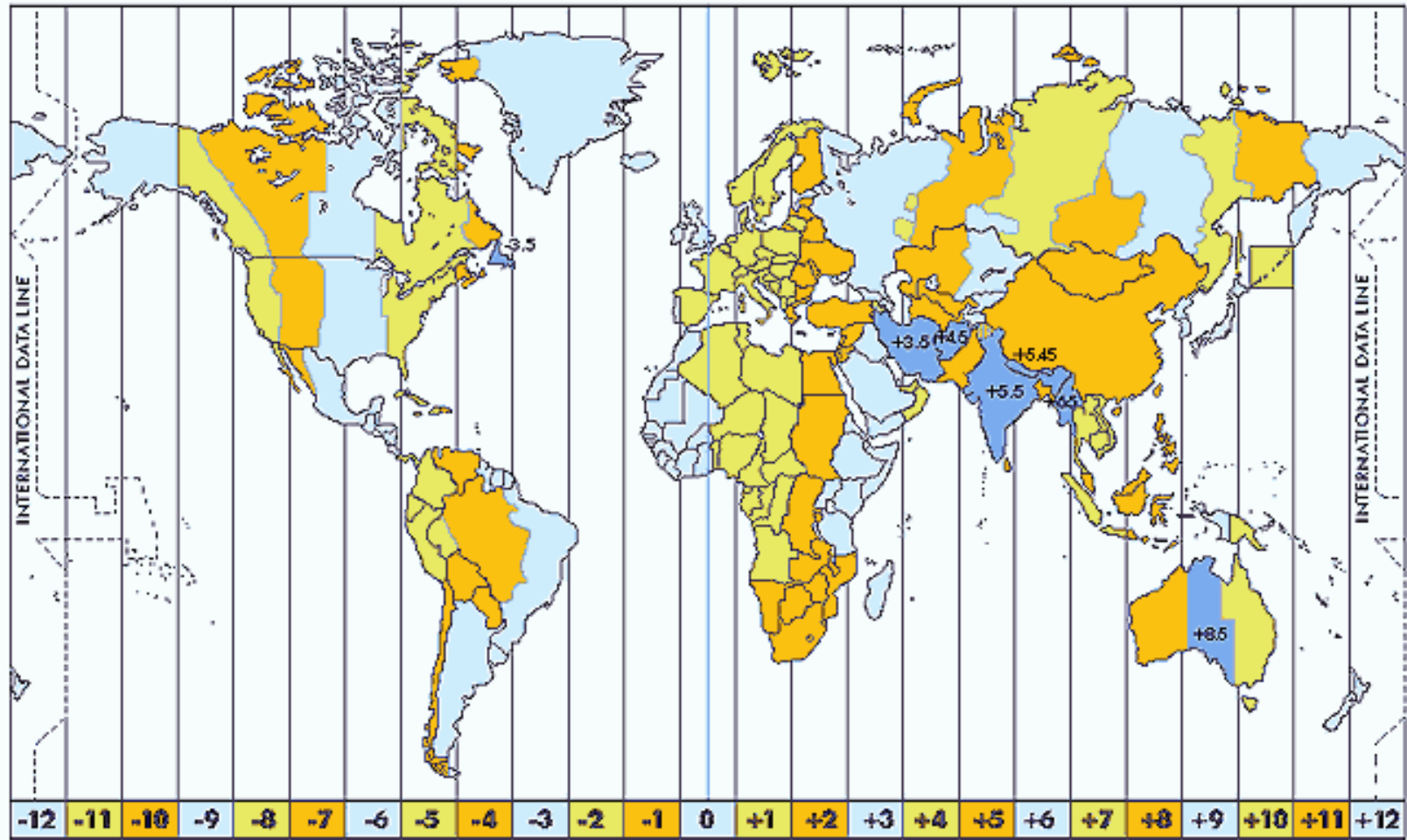
$$t_O = t_{UTC} + \frac{1}{15} (L_0 - L_{UTC})$$

$L_{UTC} = -45^\circ$ (para UTC -3)

L_0 : Longitud del lugar.

Tiempo Solar

Tiempo Estándar - t_{UTC}



Tiempo Solar

NOTACIÓN:

Tiempo Solar - t_S

Tiempo Observador - t_O

Tiempo Estándar - t_{UTC}

Ecuación del tiempo de Spencer:

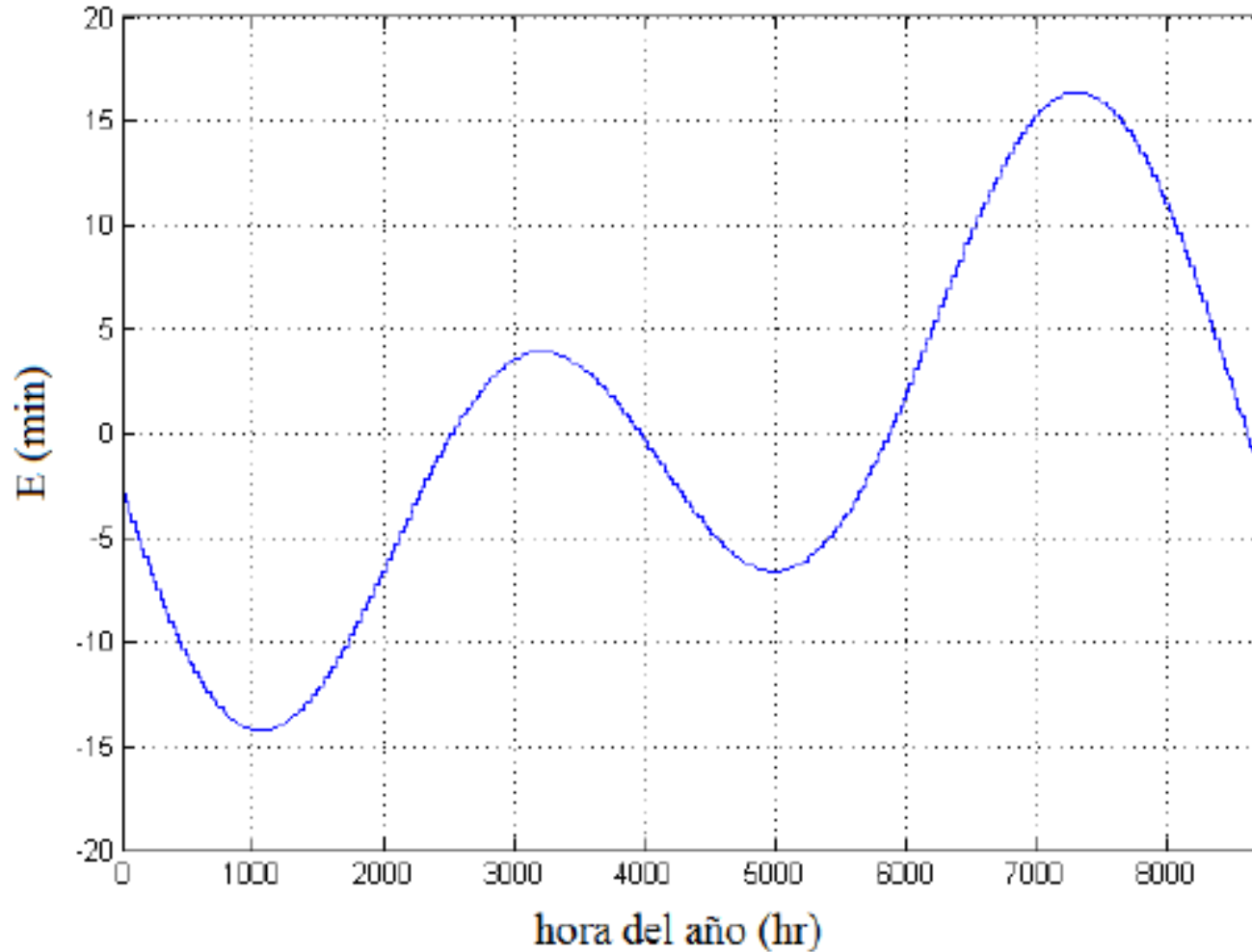
$$E = t_S - t_0$$

$$E \approx 229,18 \text{ min/rad} \times [0,000075 + 0,001868 \cos(\Gamma) - 0,032077 \sin(\Gamma) \\ - 0,014615 \cos(2\Gamma) - 0,04089 \sin(2\Gamma)]$$

$$\Gamma \equiv 2\pi(n - 1)/365$$



Tiempo Solar



Tiempo Solar

Entonces tenemos:

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

Despejando:

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

NOTACIÓN:

Tiempo Solar - t_S

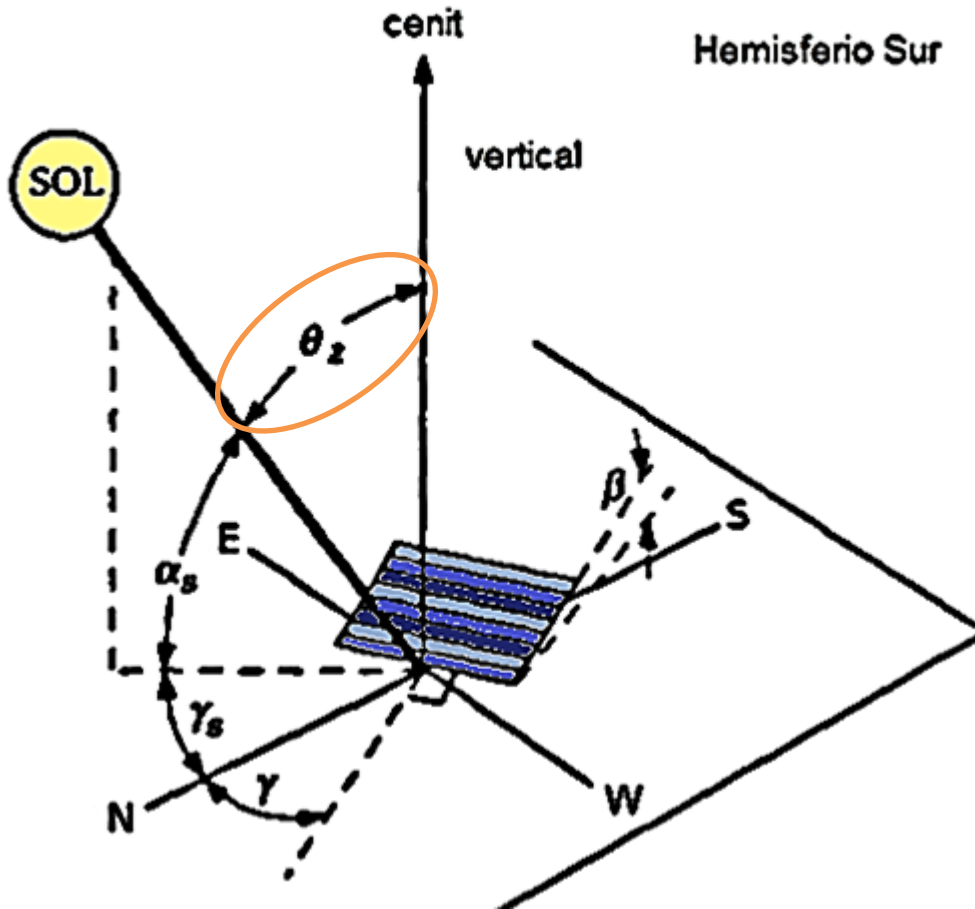
Tiempo Observador - t_O

Tiempo Estándar - t_{UTC}



Ángulo Cenital:

- θ_z
- formado por la línea Sol-Tierra y la vertical a la superficie del lugar.



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

Donde ϕ es la Latitud

fuelle: Solar engineering of thermal processes. John A. Duffie, William A. Beckman

Horas de Sol:

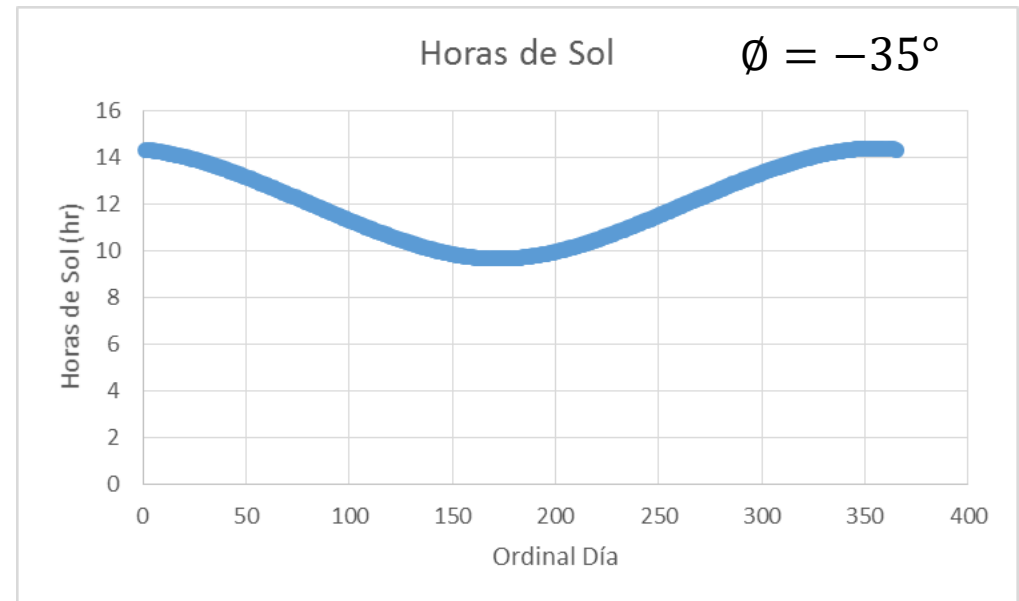
- Puesta o Salida de Sol: $\theta_z = \frac{\pi}{2}$;
- Despejando de la ecuación anterior, el Ángulo Horario para la puesta o salida de Sol es:

$$\omega_S = \pm \text{acos}(-\tan \delta \tan \phi)$$

- Horas de Sol:

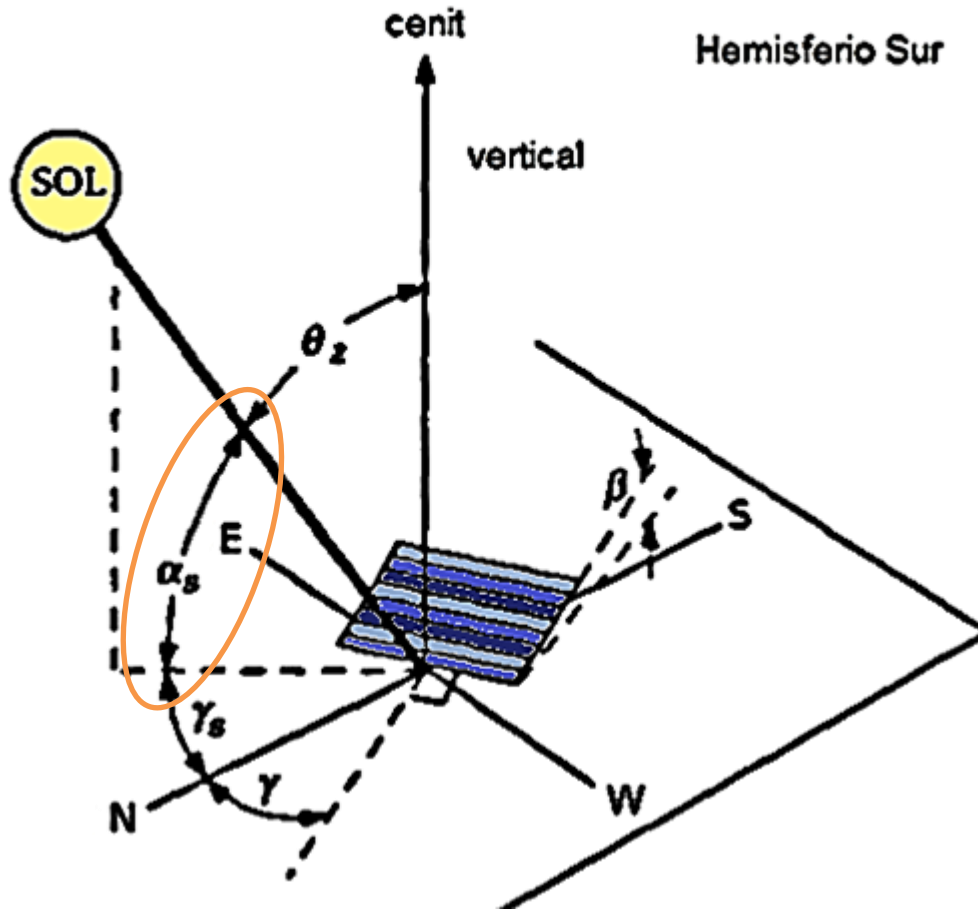
$$N_0 = 2 \times \omega_S \times \frac{24}{2\pi}$$

$$N_0 = \frac{24}{\pi} \text{acos}(-\tan \delta \tan \phi)$$



Altitud Solar:

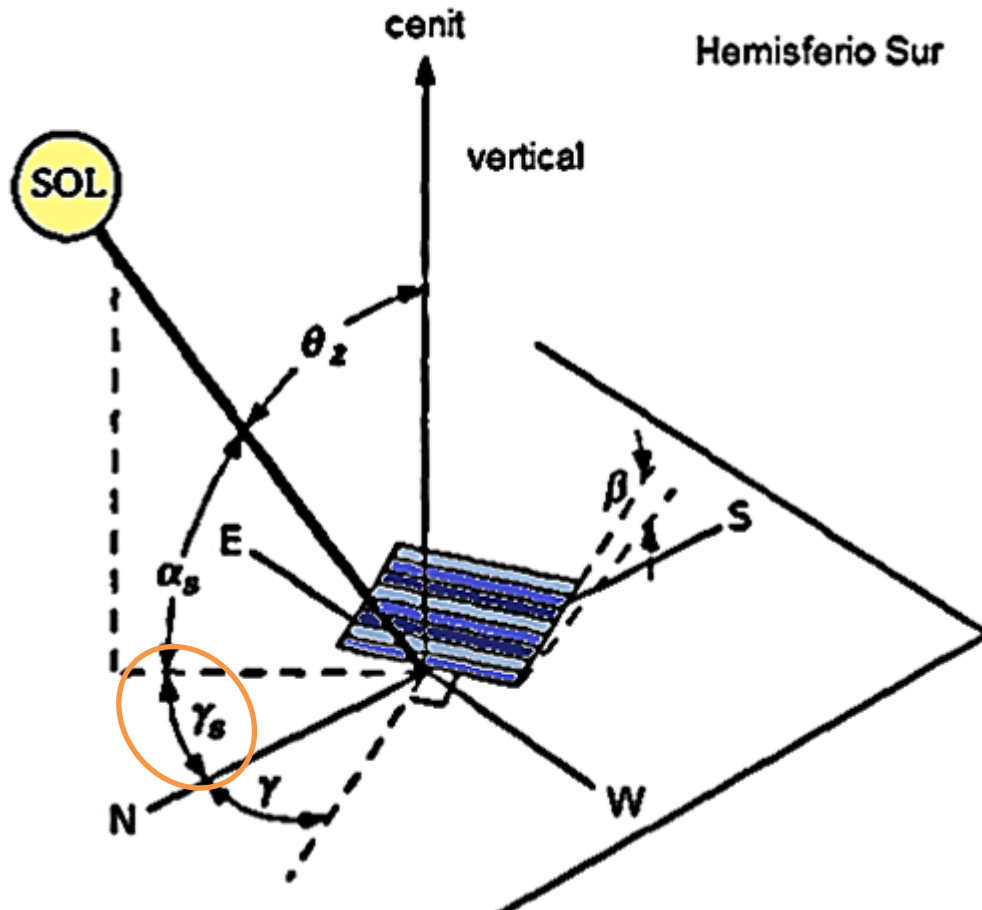
- α_s
- Es el complemento del ángulo cenital



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

$$\alpha_s = \frac{\pi}{2} - \theta_z$$

fuelle: Solar engineering of thermal processes. John A. Duffie, William A. Beckman



Acimut Solar:

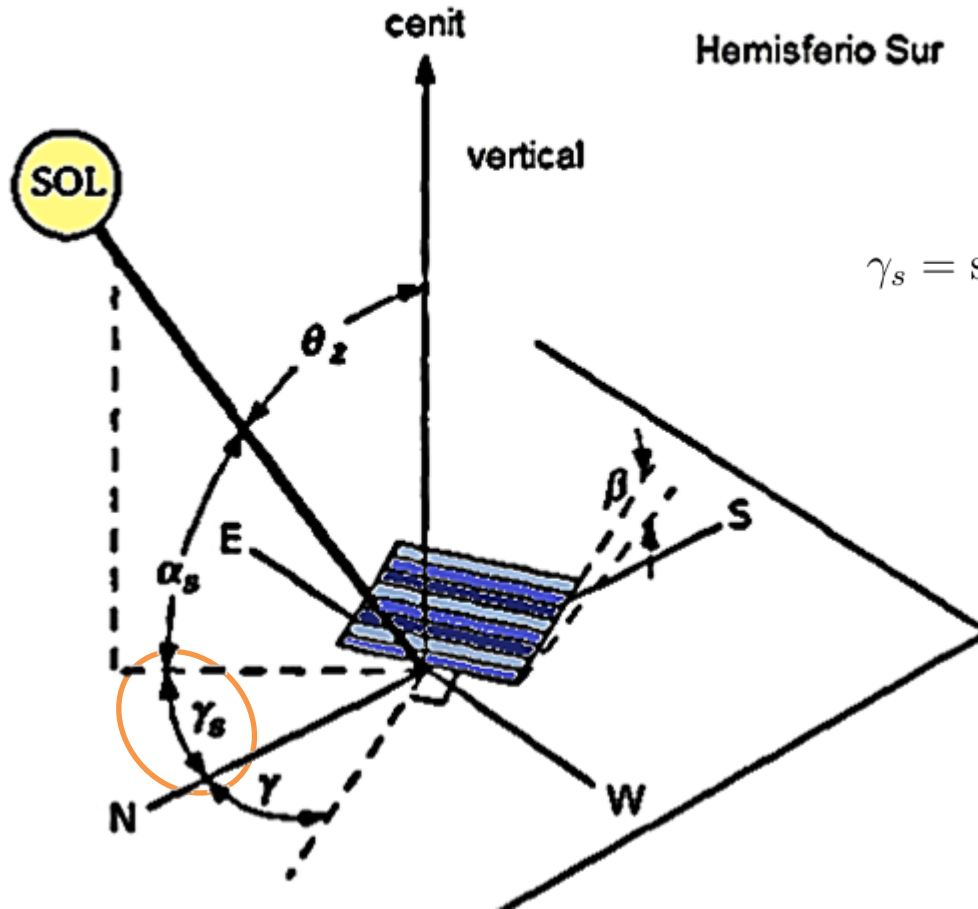
- γ_s
- es el ángulo que forma la proyección de la línea Tierra-Sol sobre el plano horizontal local, y el meridiano (línea N-S) del observador. Se refiere este ángulo al Norte ($\gamma_s = 0$ si la superficie se orienta al Norte) y se incrementa en sentido antihorario (Oeste).

Convención de signos igual a ω :

- $\gamma_s < 0$: Este (Mañanas)
- $\gamma_s > 0$: Oeste (Tardes)

fuelle: Solar engineering of thermal processes. John A. Duffie, William A. Beckman

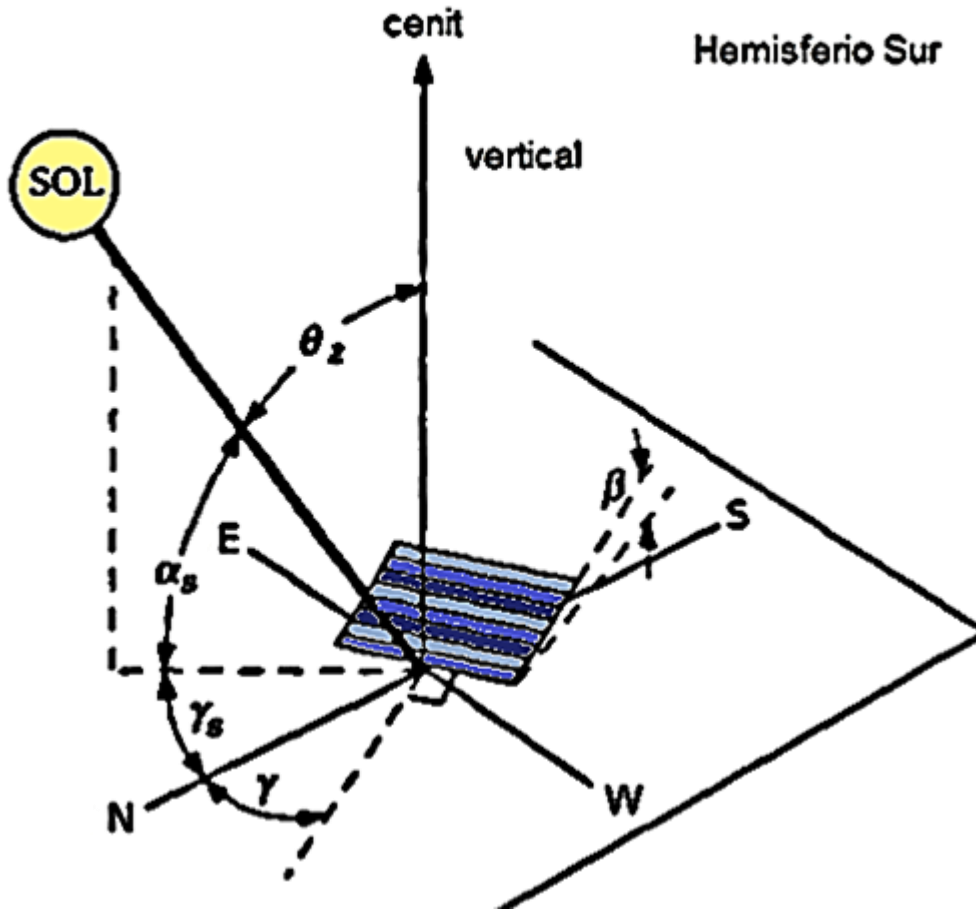
Acimut Solar:



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

Ángulos de la superficie:

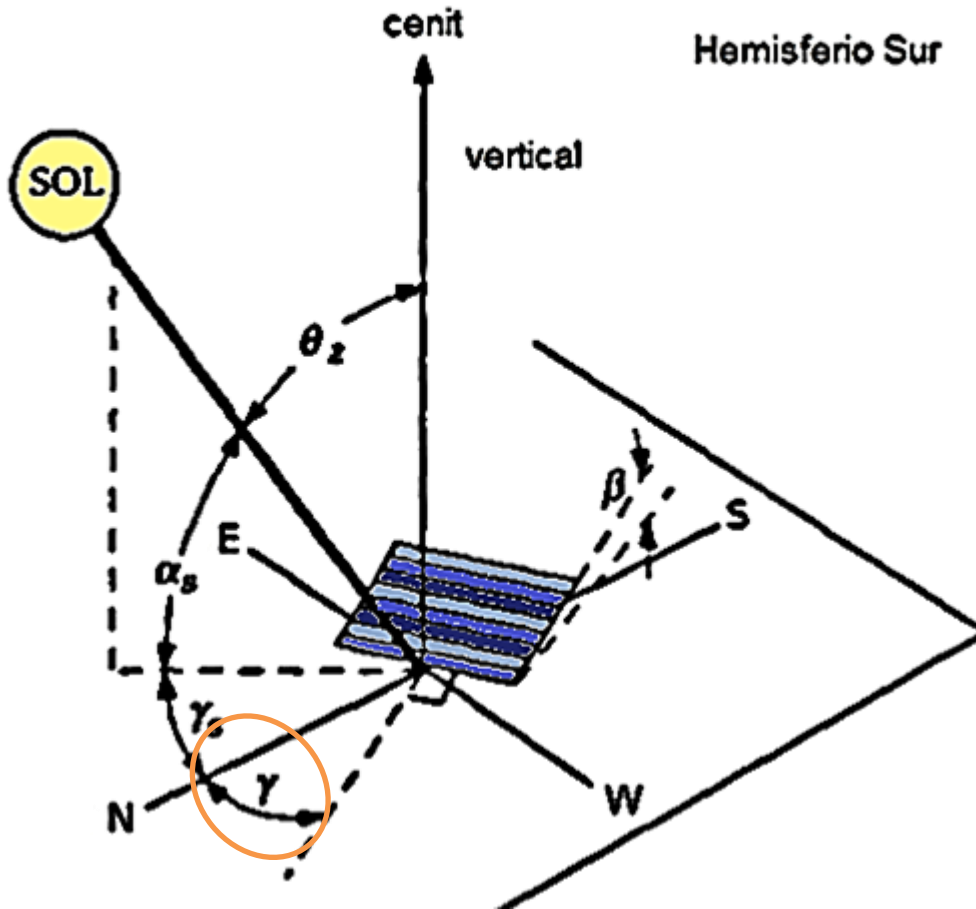
- Orientación: γ
- Inclinación: β



fuelle: Solar engineering of thermal processes. John A. Duffie, William A. Beckman

Orientación:

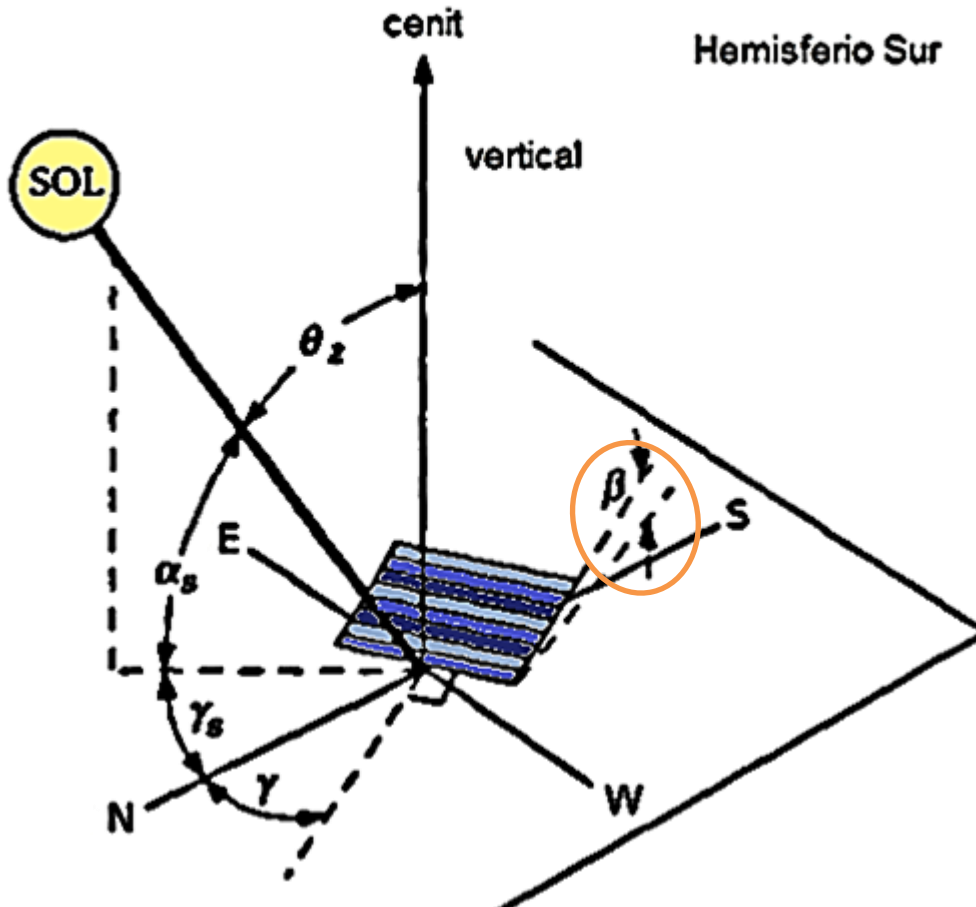
- γ
- es el ángulo que forma la proyección de la normal a la superficie de interés sobre el plano horizontal local, y el meridiano (línea N-S) del observador. Se refiere este ángulo al Norte ($\gamma = 0$ si la superficie se orienta al Norte) y se incrementa en sentido antihorario (Oeste).



fuelle: Solar engineering of thermal processes. John A. Duffie, William A. Beckman

Inclinación:

- β
- Ángulo formado entre la superficie y el plano horizontal



fuelle: Solar engineering of thermal processes. John A. Duffie, William A. Beckman

- Ángulo de Incidencia:

- Una vez definida la posición de la superficie, y conociendo la ubicación del Sol, se puede calcular el ángulo de incidencia que forma la línea Sol-Tierra con la normal a la superficie mediante la siguiente ecuación. Este ángulo se denota θ , y resulta importante a la hora de calcular la irradiación incidente sobre un plano inclinado.

$$\cos \theta = [(\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega) \cos \gamma + \cos \delta \sin \omega \sin \gamma] \sin \beta + [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega] \cos \beta$$



Diagrama Solar

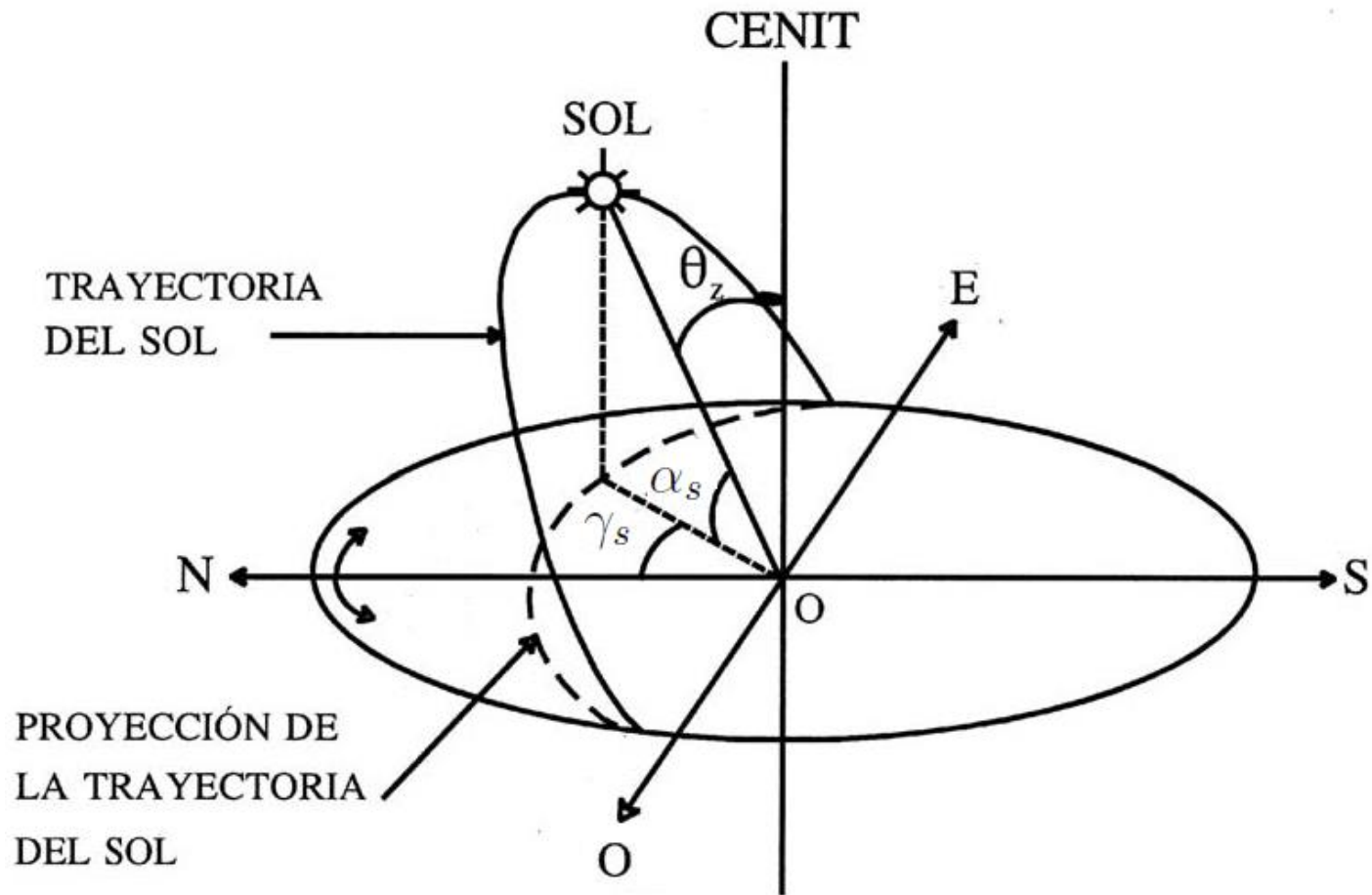


Diagrama Solar

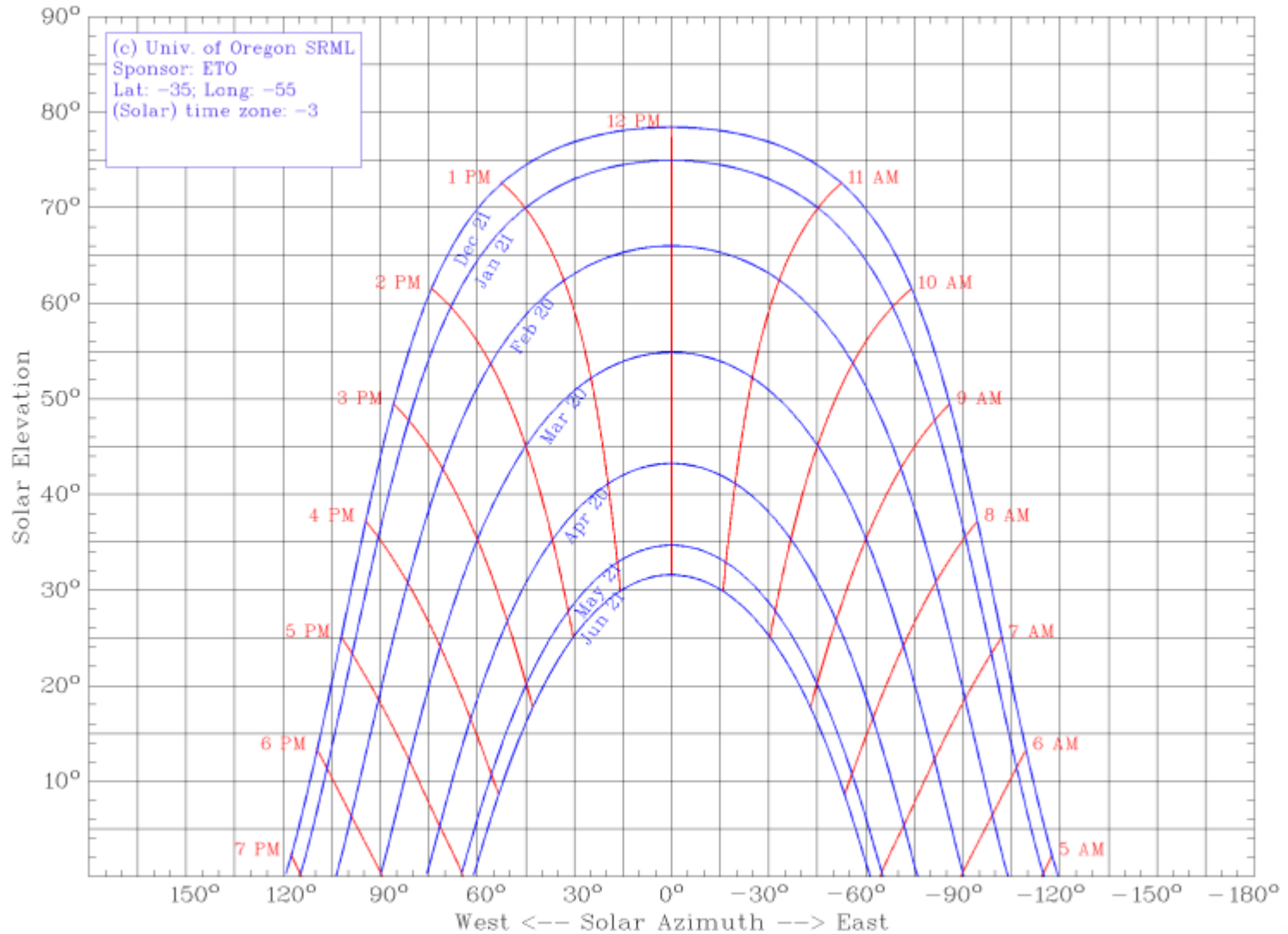


Diagrama Solar

- Ejemplo de sombra

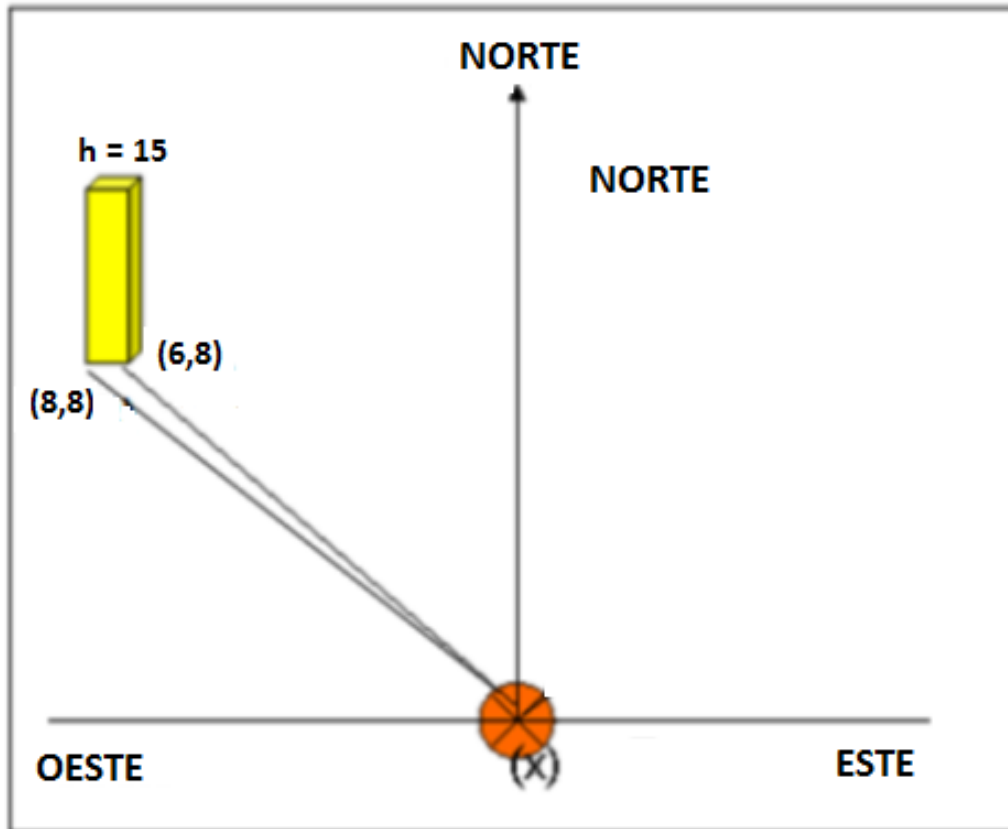
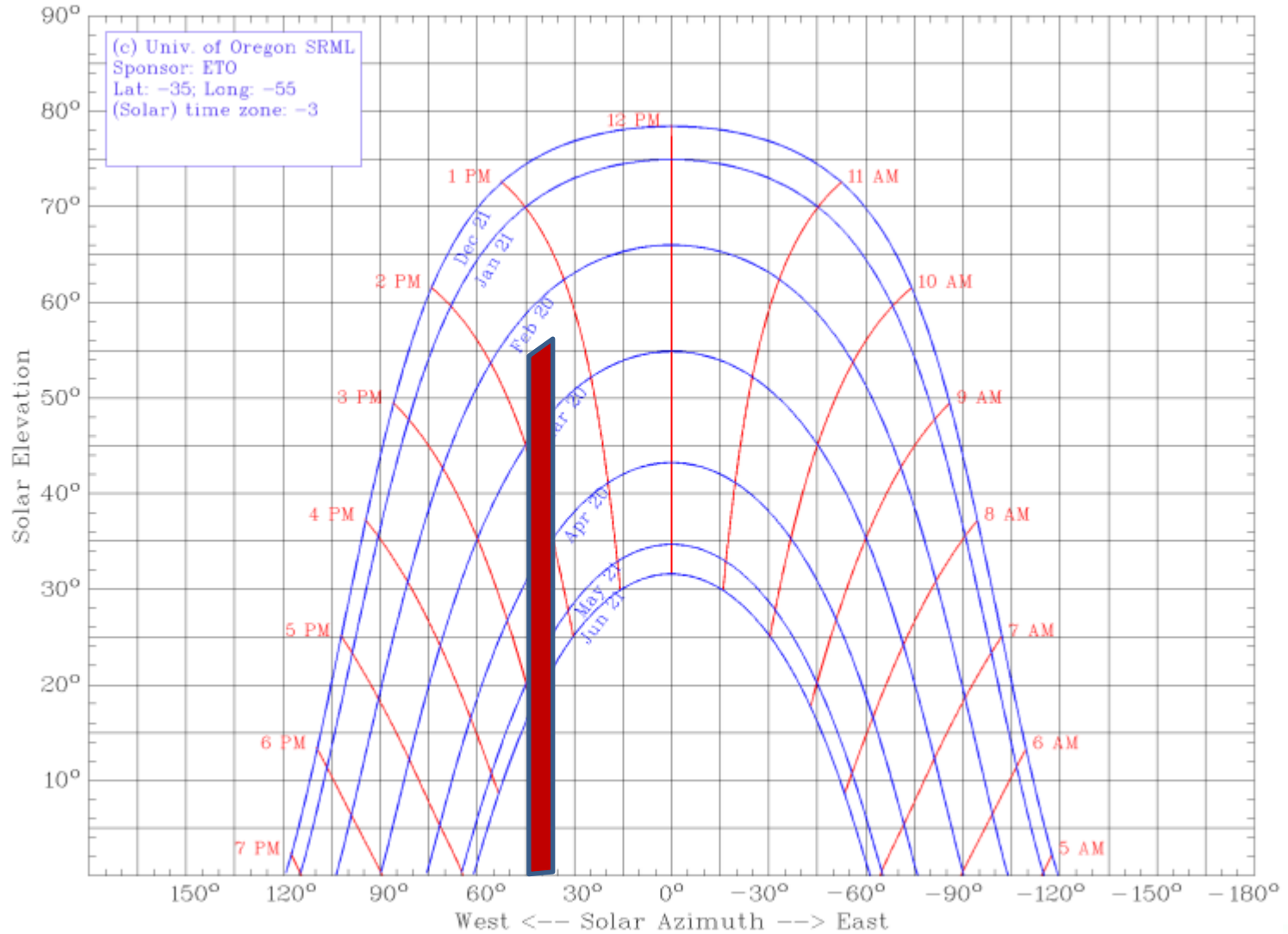


Diagrama Solar



Temario



- Introducción
- Movimiento aparente solar
- **Dimensionamiento**
- Estimación de la irradiación solar incidente
- Medición



Configuración de la superficie de paneles

Orientación: γ
Inclinación: β

- Paneles fijos
- Seguimiento
 - En un eje
 - » Horizontal
 - » Acimutal
 - » Polar
 - En dos ejes



Paneles fijos



Orientación fija:

- $\gamma = \text{cte} (0^\circ)$

Inclinación fija:

- $\beta = \text{cte} (25-30^\circ)$

Paneles fijos

- Superficies orientadas hacia el ecuador ($\gamma = 0$)

$$\cos \theta = [(\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega) \overset{= 1}{\cancel{\cos \gamma}} + \cos \delta \sin \omega \overset{= 0}{\cancel{\sin \gamma}}] \sin \beta + [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega] \cos \beta$$

($\gamma = 0$)



$$\cos \theta = [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega] \cos \beta + [\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega] \sin \beta$$



Seguidores – Un eje



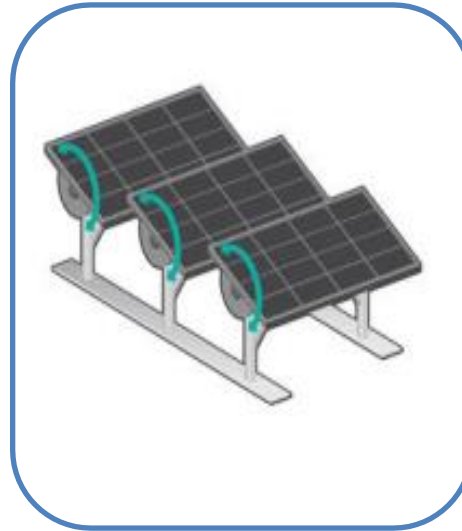
ACIMUTAL

Orientación:

- $\gamma = \gamma_s$

Inclinación:

- $\beta = cte$



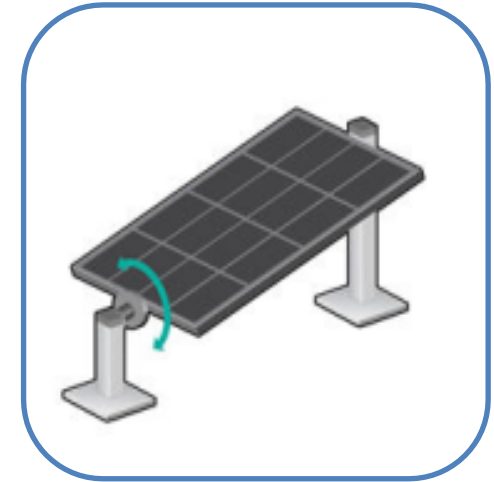
HORIZONTAL

Orientación:

- Si $\gamma_s > 0 \rightarrow \gamma = + 90^\circ$
- Si $\gamma_s < 0 \rightarrow \gamma = - 90^\circ$

Inclinación:

- $\beta = \theta_z$



POLAR

Seguidores – Un eje

Seguimiento Acimutal:

En este caso el ángulo de incidencia se puede calcular cómo:

$$\cos \theta = \cos (\beta - \theta_z)$$

Donde se cumple:

$$\beta = cte$$

$$\gamma = \gamma_s$$

Seguidores – Un eje

Seguimiento Horizontal:

En este caso el ángulo de incidencia se puede calcular cómo:

$$\cos \theta = \sqrt{\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \sin^2 \omega}$$

Donde se cumple:

$$\text{Si } \gamma_S > 0, \gamma = 90^\circ$$

$$\text{Si } \gamma_S < 0, \gamma = -90^\circ$$



Seguidores – Dos ejes



Orientación:

- $\gamma = \gamma_s$

Inclinación:

- $\beta = \theta_z$

Seguidores – Dos ejes

En este caso el ángulo de incidencia es:

$$\cos \theta = 1$$

Donde se cumple:

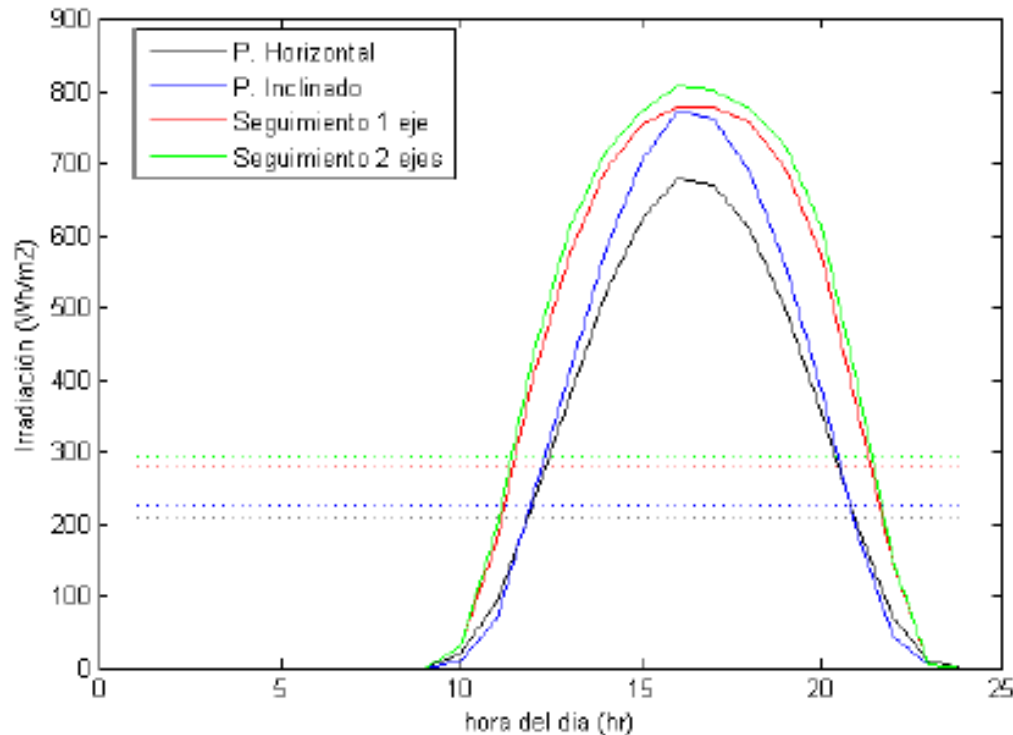
$$\gamma = \gamma_S$$

$$\beta = \theta_z$$



Ganancia según seguimiento

- La ganancia energética en el uso de configuraciones de seguimiento depende de la ubicación de la central.
- A modo de ejemplo: Salto (Uruguay)



Ganancia según seguimiento

- La ganancia energética en el uso de configuraciones de seguimiento depende de la ubicación de la central.
- A modo de ejemplo: Salto (Uruguay)

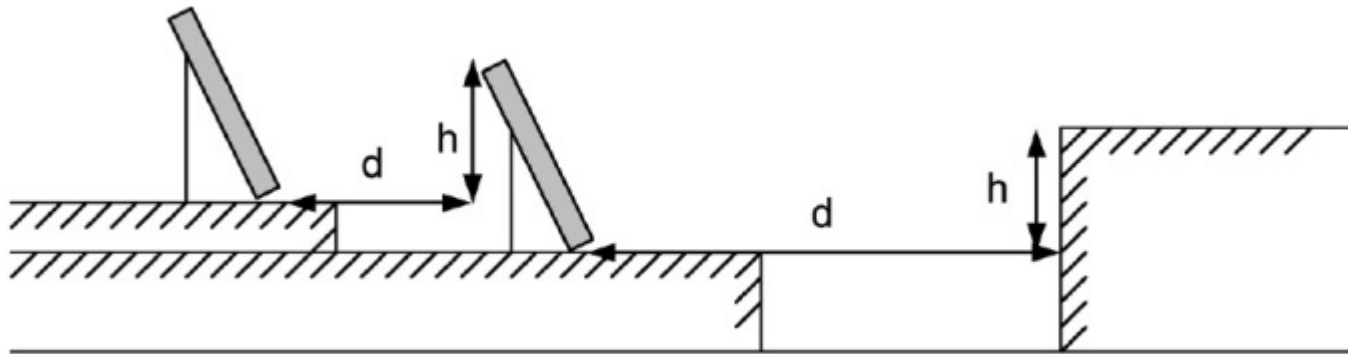
Configuración	Ganancia (vs 0°)	Ganancia (vs 28°)
Paneles Fijos (28 °)	9 %	-
Seguimiento Horizontal	30 %	19 %
Seguimiento Acimutal	35 %	24 %
Seguimiento en Dos Ejes	44 %	32 %



Distancia entre los paneles

- Con la siguiente ecuación se garantiza un mínimo de 4 horas de sol en torno al mediodía del solsticio de invierno:

$$d_{min} = \frac{h}{tg(61^\circ - |\phi|)}$$

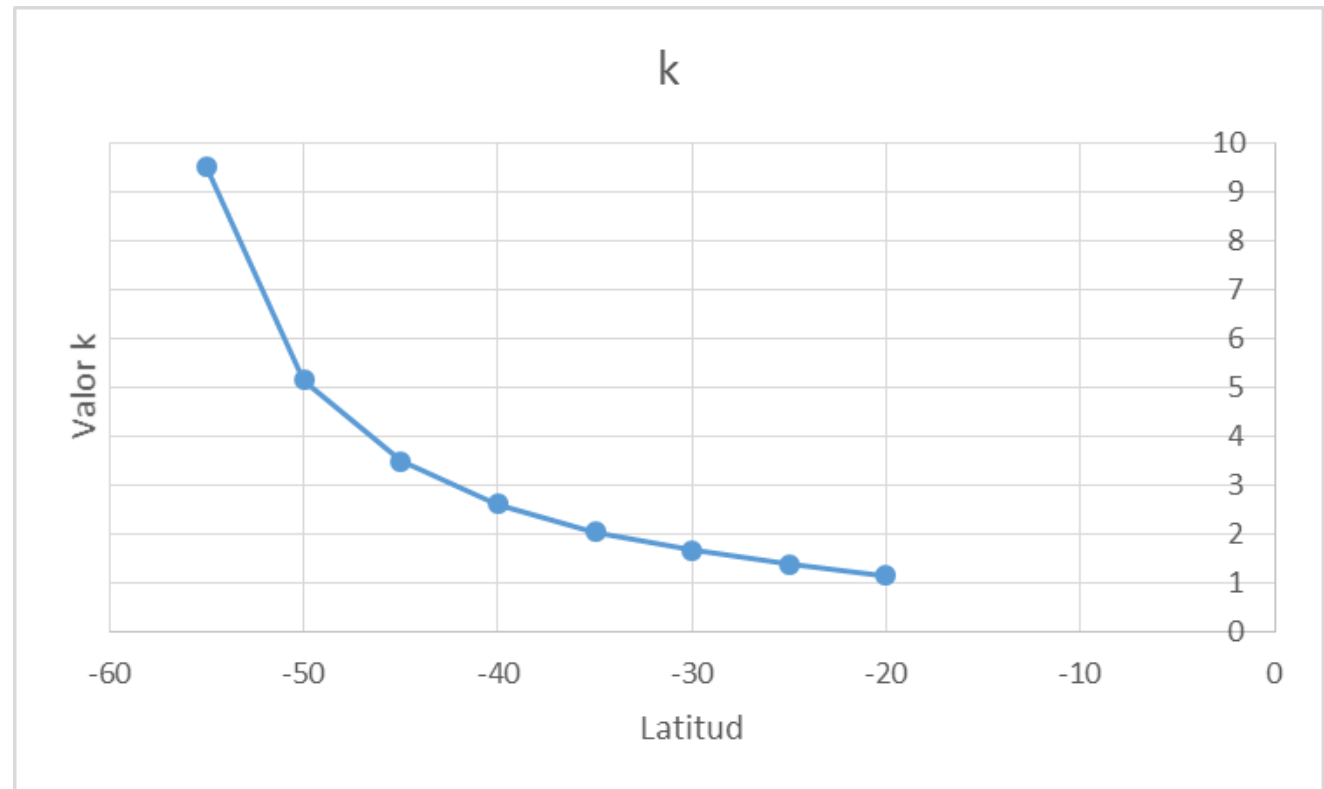


Distancia entre los paneles

$$k = \frac{1}{\text{tg}(61^\circ - |\phi|)}$$

$$d_{\min} = k \times h$$

phi (°)	k
-10	0,81
-15	0,97
-20	1,15
-25	1,38
-30	1,66
-35	2,05
-40	2,61
-45	3,49
-50	5,14
-55	9,51



Distancia entre los paneles

- ¿De qué forma se podría calcular la d_{\min} para que se garantice 4 horas de incidencia de luz solar en el entorno del mediodía solar del solsticio de invierno?



Inclinación Óptima

- El **ángulo óptimo de inclinación** es aquel que maximiza la energía incidente. Dependiendo del fin, se puede maximizar a nivel anual o estacional. Generalmente se busca maximizar la energía a nivel anual.
- Sin nubosidad, en condiciones de nubosidad constante o fuera de la atmósfera el ángulo coincide con la latitud.

$$\beta_{opt} = |\phi|$$

- Con mayor nubosidad en invierno que en verano: $\beta_{opt} \downarrow$
- Con mayor nubosidad en verano que en invierno: $\beta_{opt} \uparrow$

Inclinación Óptima

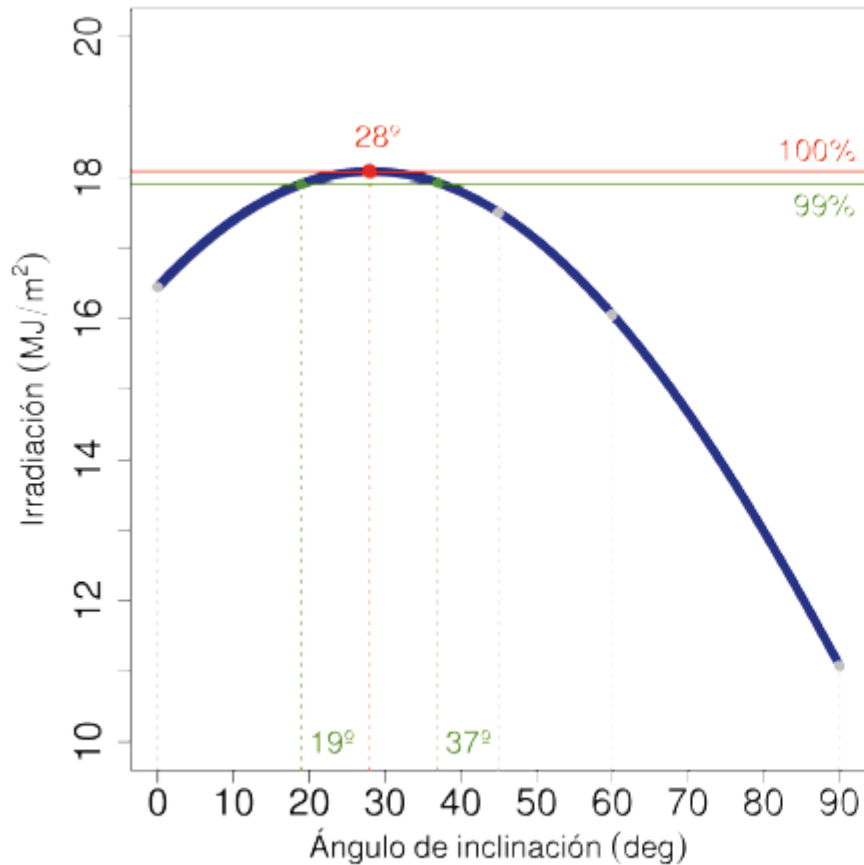
- Según “Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red – IDEA” España ($\phi = 36^\circ - 43^\circ$)

$$\beta_{opt} = 3.7^\circ + 0.69 \times |\phi|$$

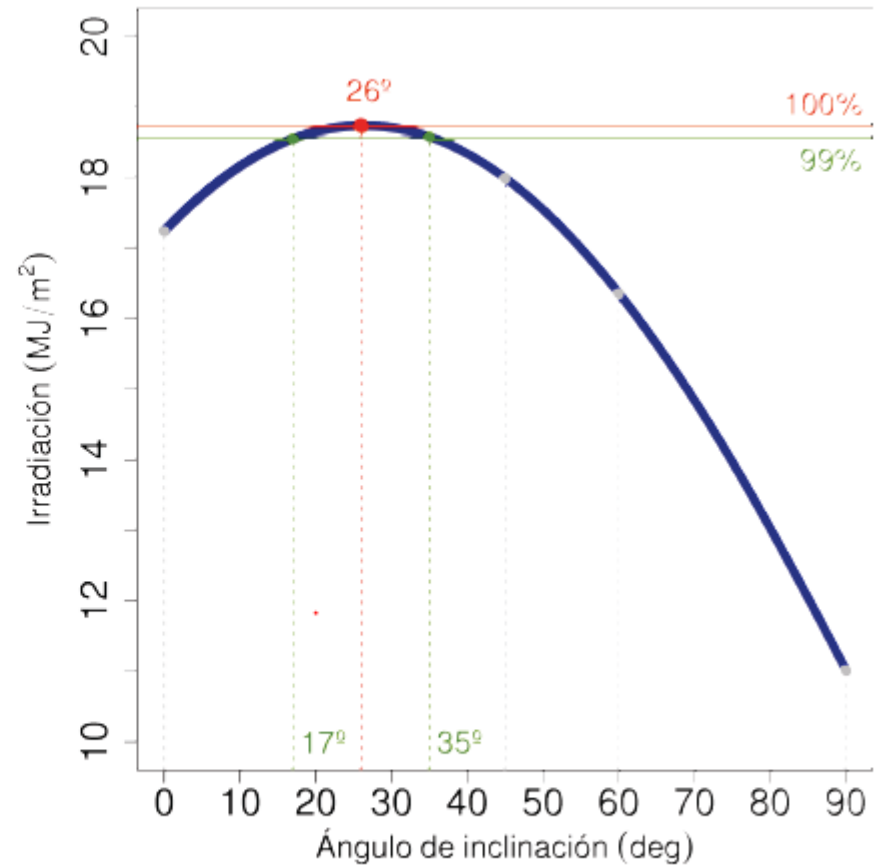
- Utilizando la fórmula para el territorio Uruguayo:
 - Montevideo $\rightarrow \phi = -34.9^\circ \Rightarrow \beta_{opt} = 27.8^\circ$
 - Paysandú $\rightarrow \phi = -32.3^\circ \Rightarrow \beta_{opt} = 26^\circ$
 - Salto $\rightarrow \phi = -31.4^\circ \Rightarrow \beta_{opt} = 25.4^\circ$



Inclinación Óptima



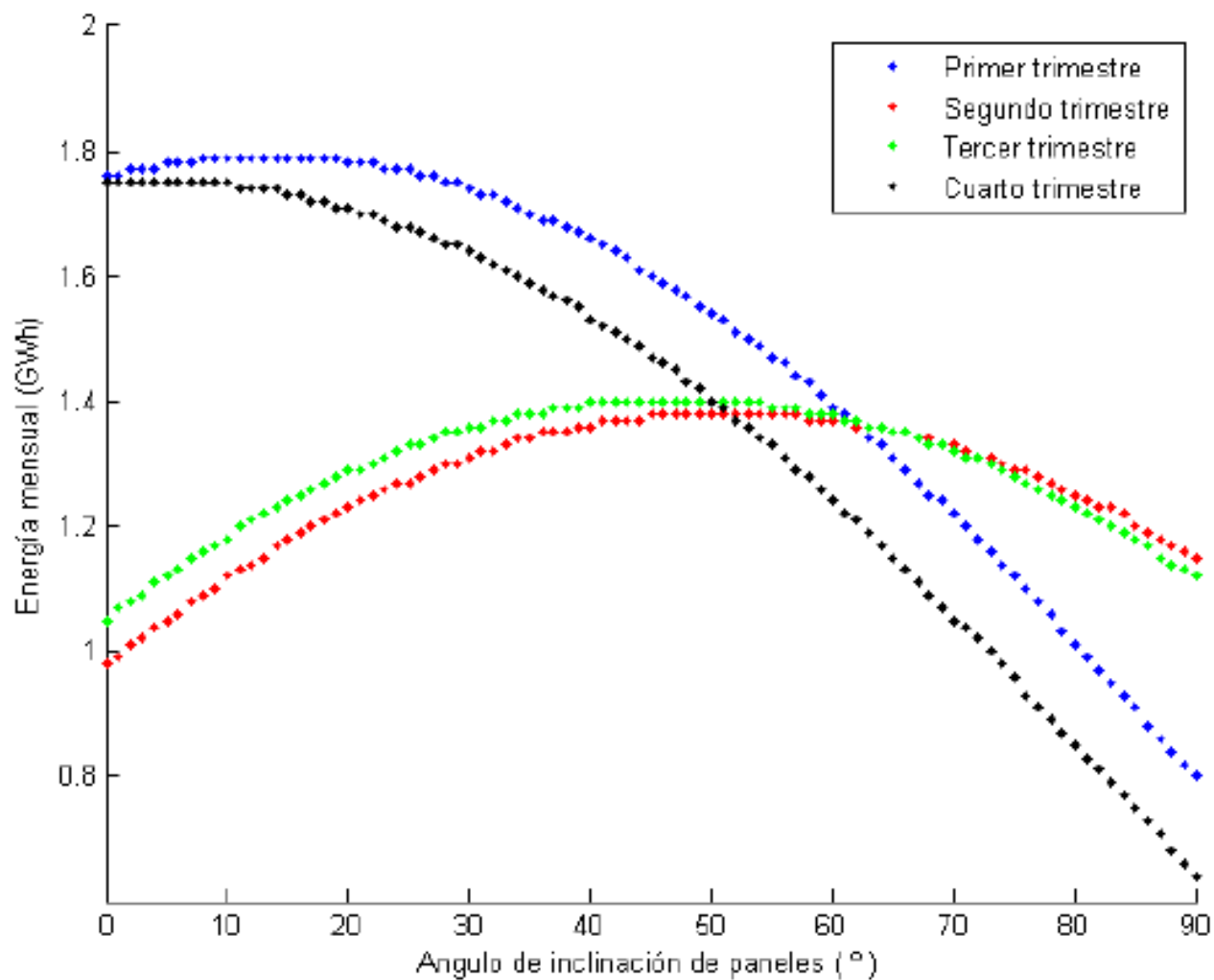
(a) Montevideo.



(b) Salto.

- Según Irradiación Incidente en la superficie





Referencias

- Notas del curso “Fundamentos de Energía Solar” – Recurso Solar
- Estimación del recurso solar mediante imágenes satelitales. Rodrigo Alonso Suárez
- Solar engineering of thermal processes. John A. Duffie, William A. Beckman
- Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red – IDEA
- Análisis del uso de seguidores solares en centrales fotovoltaicas – G. Crapuchetti, G. Hermida, M. Puppo

