

E N E R ▲

G Í A □ ■

NOEMÍ
SOGARI



S O ●



L A R

APUNTES DE CÁTEDRA ● CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
Y AGRIMENSURA



Aplicaciones térmicas de la energía solar

Construcción de sistemas para calentar agua y secar productos frutihortícolas

T É R ▼

M I C A



Aplicaciones térmicas de la energía solar

Construcción de sistemas para calentar agua y secar productos frutihortícolas



Sogari, Noemi

Aplicaciones de la energía solar : construcción de sistemas para calentar agua y secar productos frutihortícolas / Noemi Sogari ; contribuciones de Carlos Alejandro Gómez. - 1a edición para el alumno - Corrientes : Editorial de la Universidad Nacional del Nordeste EUDENE, 2022.

Libro digital, PDF/A - (Apuntes ; 1)

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-950-656-207-6

1. Energía Solar. 2. Energía Térmica. 3. Energía Térmica Solar. I. Gómez, Carlos Alejandro, colab. II. Título.

CDD 621.47

Edición: Natalia Passicot

Corrección: Irina Wandelow

Diseño y diagramación: Julia Caplan



© EUDENE. Secretaría de Ciencia y Técnica,
Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina, 2022.

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723.
Reservados todos los derechos.

25 de Mayo 868 (CP 3400) Corrientes, Argentina.
Teléfono: (0379) 4425006
eudene@unne.edu.ar / www.eudene.unne.edu.ar

Capítulo 3

Energía solar

CLOTILDE NOEMÍ SOGARI Y CARLOS ALEJANDRO GÓMEZ

EL SOL, FUENTE DE ENERGÍA

La estructura del Sol y sus características definen la naturaleza de la energía que radia al espacio. Esta energía es debida a la radiación electromagnética que emite el Sol como producto de reacciones termonucleares.

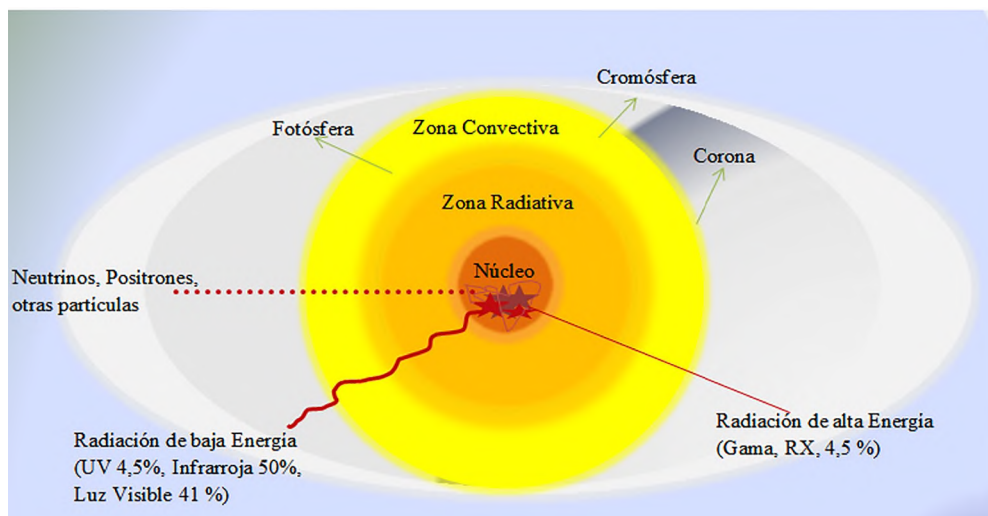


Figura 3.1. El Sol y la radiación solar (Noemí Sogari y Carlos Gómez).

El centro del Sol está formado mayormente por núcleos de hidrógeno que se unen mediante fusión nuclear para formar núcleos de deuterio y tritio: isótopos del hidrógeno y de helio.

Cada vez que ocurre una reacción termonuclear en el centro del Sol, una gran cantidad de energía electromagnética se libera y sale del núcleo solar, atraviesa la capa solar



llamada radiativa y la capa solar de convección para dispersarse fuera del astro, hacia el espacio sideral. Esta energía viaja a 300 000 km por segundo y está formada por ondas y por partículas (fotones).

La energía liberada por reacciones termonucleares abandona el Sol en forma de radiación infrarroja, ultravioleta y lumínica, que son las principales formas de energía electromagnética que alcanzan, en mayor o menor proporción, a todos los planetas del sistema solar.

El Sol es una masa gaseosa intensamente caliente de diámetro igual a $1,39 \times 10^6$ km distante de la Tierra en promedio 149 600 000 km. Y su luz recorre esta distancia en 8 minutos y 19 segundos.

El Sol emite radiación actuando como un cuerpo negro. La temperatura en la región central interior es aproximadamente $1,36 \times 10^6$ °K y la densidad central es estimada aproximadamente 100 veces la del agua. La radiación emitida pertenece al amplio rango de longitudes de onda del espectro electromagnético. Por lo tanto, se compone de radiación visible, infrarroja y ultravioleta.

La constante solar

La radiación solar extraterrestre es la radiación solar diaria que se recibe sobre una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera. El valor se define a partir del valor de la constante solar. Recordamos que la constante solar se define como la cantidad de radiación que se recibe en la capa superior de la atmósfera, sobre una superficie unidad perpendicular a los rayos solares y a una distancia del Sol media. En consecuencia, para calcular la radiación solar extraterrestre, se debe corregir la constante solar considerando que la distancia Sol-Tierra varía a lo largo del año y pasando también de una superficie perpendicular a los rayos solares a una horizontal a la Tierra (ver Figura 3.2).

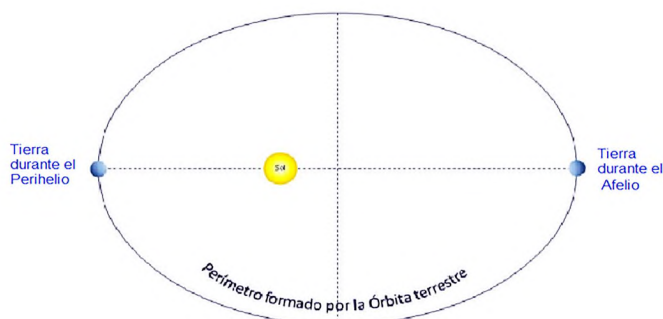


Figura 3.2. La órbita terrestre no es perfectamente circular, y el Sol no se encuentra en el centro de la elipse descrita por la Tierra en su movimiento alrededor del Sol (datos de Wikipedia adaptados por Giesma).

La esfera exterior está formada por la órbita terrestre y la irradiación solar en todas las direcciones. El promedio del radio exterior de la esfera es de 149 500 000 km. El Sol irradia la misma potencia hacia todas direcciones, y la esfera exterior recibe la misma potencia solar en cada metro cuadrado de la superficie.

Nuestro planeta, por encontrarse en el perímetro de la esfera exterior, recibe 1367 W/m^2 de potencia solar por metro cuadrado (valor adoptado por el World Radiation Center) y a esta magnitud se le denomina constante solar.

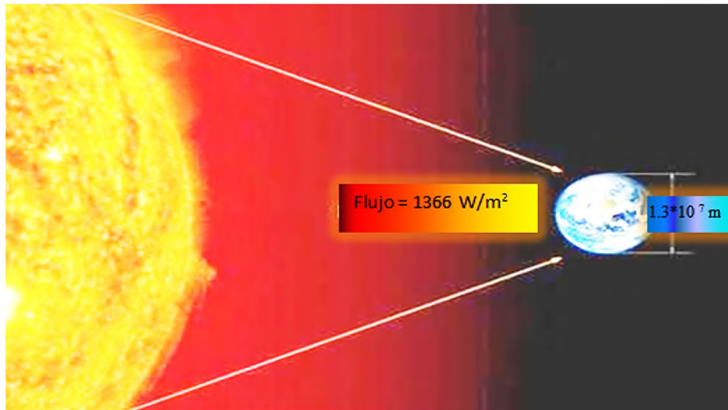


Figura 3.3. Promedio del flujo de energía por unidad de tiempo que llega a la Tierra (Nasa.gov).

La constante solar es el promedio de las cantidades de potencia recibida por cada metro cuadrado de superficie de la esfera exterior a lo largo de un año, poniendo énfasis en que, durante el perihelio, cuando la Tierra está más cerca del Sol, la atenuación de la potencia debida a la distancia es mucho menor que durante el afelio, cuando la Tierra está más alejada del Sol.

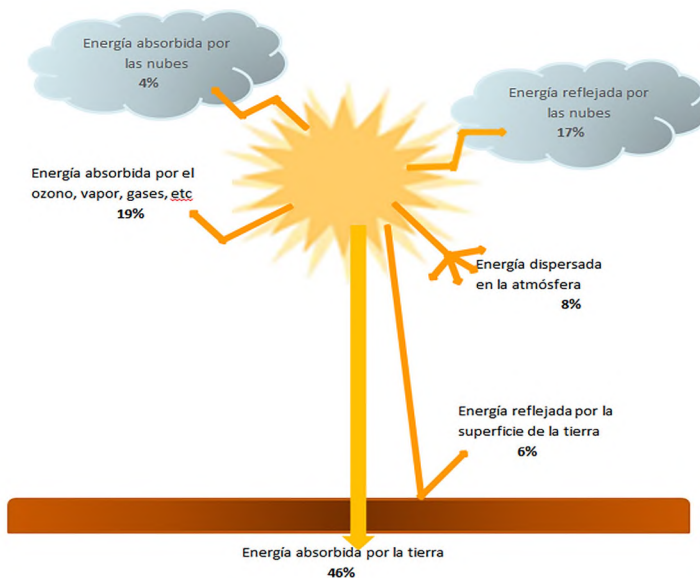


Figura 3.4. Distribución de la radiación solar (Noemí Sogari).

LA RADIACIÓN SOLAR

La energía que llega a la Tierra –en forma de ondas electromagnéticas– es el motor de la dinámica de la vida.

La radiación solar es la fuente primaria de energía para procesos dinámicos de la atmósfera global, para la definición de condiciones climáticas y para procesos biológicos naturales. La existencia de los animales tampoco sería posible en ausencia de los organismos fotosintéticos, y estos no existirían si nuestro planeta no tuviese un aporte continuo y efectivo de radiación solar.

La energía proveniente del Sol es una de las alternativas naturales de fuentes renovables y «limpias» (no contaminantes del medio ambiente) en el contexto del consumo energético de la sociedad. En el ámbito agrícola y en el de ecosistemas, ella es componente fundamental del balance de energía superficial, determina tasas de evaporación/evapotranspiración e incide en la disponibilidad de agua en el suelo.

El Sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético. Sin embargo, para los fines de aprovechamiento energético, resulta de interés la denominada radiación térmica, que considera el ultravioleta (UV), el visible (EV) y el infrarrojo (IR).

Los rayos ultravioletas, junto a los rayos X y gamma, transportan un 9% de la energía total; los rayos visibles transportan casi el 50%, los rayos infrarrojos con longitudes de onda entre 0,780 y 3,0 mm transportan el 41% restante. Las radiaciones infrarrojas que alcanzan la superficie terrestre se transforman en calor. De toda esta radiación que se dirige hacia la Tierra, solo una fracción alcanza la superficie terrestre. En efecto, al atravesar la atmósfera terrestre, intervienen los procesos de reflexión, difusión y absorción. Del total de radiación, el 50% o 60% es reflejado por las nubes; por otro lado, las partículas del aire difunden en todos los sentidos la radiación, a la vez que absorben selectivamente un elevado porcentaje de la radiación, siendo el ozono, el vapor de agua y el dióxido de carbono los componentes principales que intervienen.

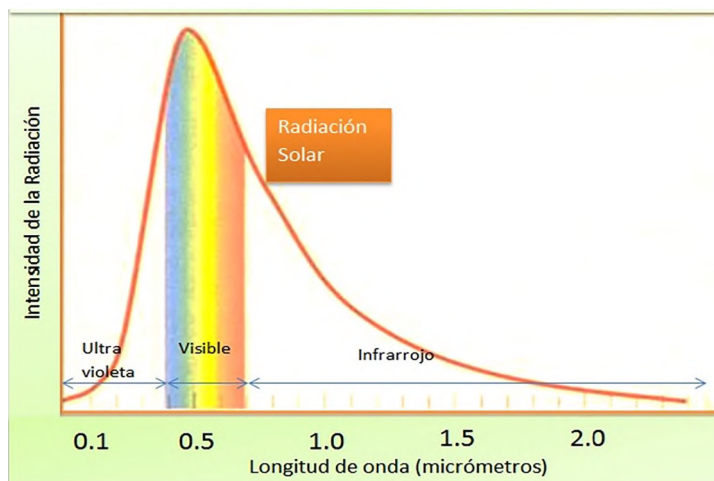


Figura 3.5. Rango del espectro de la radiación solar incidente sobre la superficie de la atmósfera terrestre (HyperPhysics, Depto. de Física y Astronomía (UGA).



El diagrama de la Figura 3.5 muestra el espectro de un rayo de sol en las afueras de la entrada en la atmósfera terrestre. El pico del espectro está dentro del espectro visible, pero todavía hay una cantidad significativa de longitudes de onda más cortas presentes.

Conceptos básicos

Se exponen a continuación algunas definiciones básicas de magnitudes usadas, por ejemplo, en el cálculo de la cantidad de energía solar incidente sobre una superficie.

Masa de aire. Relación de la masa de la atmósfera atravesada por la radiación directa y la masa que pasaría si el Sol se encontrara en el cenit (los rayos inciden perpendicularmente a una superficie horizontal). Así, en el nivel del mar, $m = 1$, cuando el Sol está en el cenit, y $m = 2$, para un ángulo cenital de 60° . Para ángulos cenitales entre 0° y 70° a nivel del mar, la siguiente expresión resulta una buena aproximación:

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

Radiación solar directa. Radiación proveniente del Sol sin que haya interactuado con las moléculas de la atmósfera.

Radiación solar difusa. Radiación recibida del Sol, cuya dirección ha sido cambiada debido a la interacción con las moléculas de la atmósfera.

Radiación solar de albedo. Radiación solar incidente sobre una superficie, resultado de la reflexión-emisión de los cuerpos expuestos al Sol.

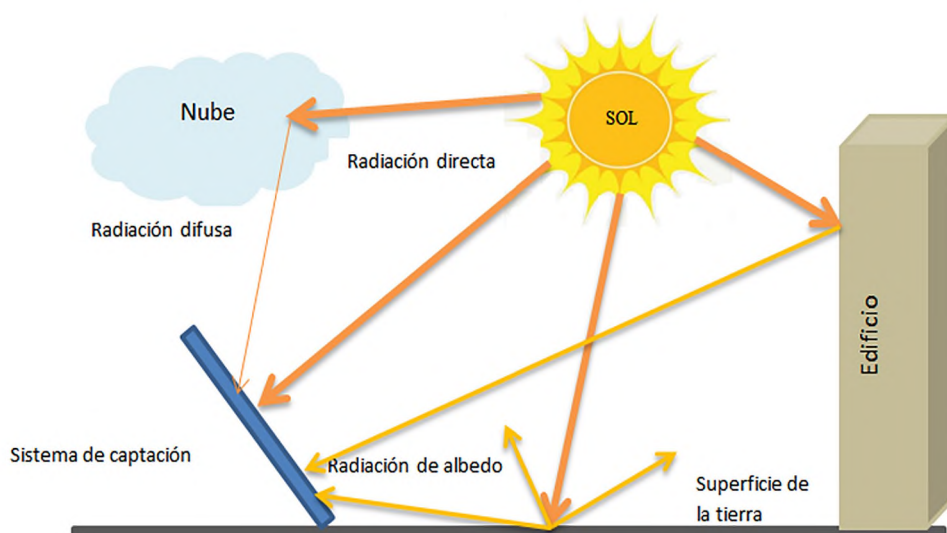


Figura 3.6. Radiación solar directa, difusa, reflejada (Noemí Sogari).

En la siguiente tabla se exponen valores del porcentaje de radiación albedo, proveniente de distintos elementos.

Tabla 1. Porcentaje de radiación albedo proveniente de distintos elementos

<u>SUPERFICIE</u>	<u>ALBEDO (%)</u>	<u>SUPERFICIE</u>	<u>ALBEDO (%)</u>
Nieve fresca	80-85	Agua (sol cerca del horizonte)	50-80
Arena	20-30	Agua (sol cerca del cenit)	3-5
Pasto	20-25	Nube gruesa	70-80
Bosque	5-10	Nube delgada	25-30
Suelo seco	15-25	Tierra y atmósfera global	30

Radiación solar total o global. La suma de la radiación solar directa y difusa incidente sobre una superficie.

Irradiación. Es la energía radiante incidente sobre una superficie en la unidad de tiempo por unidad de área. Se expresa en W/m^2 en el sistema MKSA. El símbolo G se utiliza para la irradiancia solar, con subíndices apropiados para diferenciar radiación directa (b), difusa (d) o albedo (a).

Irradiancia (I). Es la energía radiante incidente sobre una superficie por unidad de área, obtenida por integración para un tiempo determinado. Se expresa en J/m^2 en el sistema MKSA.

$$I = \int_{t_2}^{t_1} G(t) dt \quad (3.2)$$

Radiatividad (W/m^2). Es la proporción de energía radiante que emite una superficie por unidad de área debido a la combinación de emisión, reflexión y transmisión.

Emisividad (W/m^2). Es la proporción de energía radiante que emite una superficie por unidad de área debido solo a la emisión.

Tiempo solar (Hs). Tiempo basado en el movimiento angular aparente del Sol a través del cielo, tal que el mediodía solar ocurre cuando el Sol atraviesa el meridiano del observador. La hora solar no coincide con la hora local. La relación entre ambas está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Hora solar} - \text{Hora local} = 4 (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (3.3)$$

Donde: L_{st} es el meridiano estándar que caracteriza el tiempo del lugar, L_{loc} es la longitud del lugar en cuestión y E es un factor de corrección que depende del día del año (Duffie y Beckman, 2013; Spencer, 1971, citado por Iqbal, 1983).

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos B - 0.32077\sen B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sen 2B) \quad (3.4)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3.5)$$

Donde: n es el día del año, así $1 \leq n \leq 365$

Tabla 2. Expresiones para convertir el día del mes en el número del día del año

MES	N PARA EL I-ÉSIMO DÍA DEL AÑO	MES	N PARA EL I-ÉSIMO DÍA DEL AÑO
Enero	i	Julio	$181 + i$
Febrero	$31 + i$	Agosto	$212 + i$
Marzo	$59 + i$	Septiembre	$243 + i$
Abril	$90 + i$	Octubre	$273 + i$
Mayo	$120 + i$	Noviembre	$304 + i$
Junio	$151 + i$	Diciembre	$334 + i$

ÁNGULOS DE POSICIÓN SOLAR E INFLUENCIA SOBRE LA RADIACIÓN

La cantidad de energía solar que llega a un punto de la superficie terrestre depende de la inclinación con que los rayos solares inciden en la superficie, ya que cuanto más perpendiculares sean dichos rayos (a la superficie terrestre), mayor será la intensidad de radiación solar. La dirección de los rayos solares depende de la ubicación del Sol, de la ubicación geográfica del lugar en estudio (latitud del lugar), de la época del año y de la hora del día.

Definiciones de los ángulos de posición

Paralelo. Círculo determinado por la intersección entre la esfera terrestre y un plano paralelo al ecuador.

Latitud. Ángulo determinado desde el centro de la Tierra por un radio dirigido al lugar de interés y otro radio dirigido al punto del ecuador sobre el mismo meridiano. La latitud varía entre 0° en el ecuador y 90° en los Polos (positivo en el Polo Norte y negativo en el Polo Sur).

Meridiano. Círculo determinado por la intersección entre la esfera terrestre y todo plano que pasa por los polos.

Longitud. Ángulo determinado por el plano de un meridiano con respecto a otro tomado como referencia.

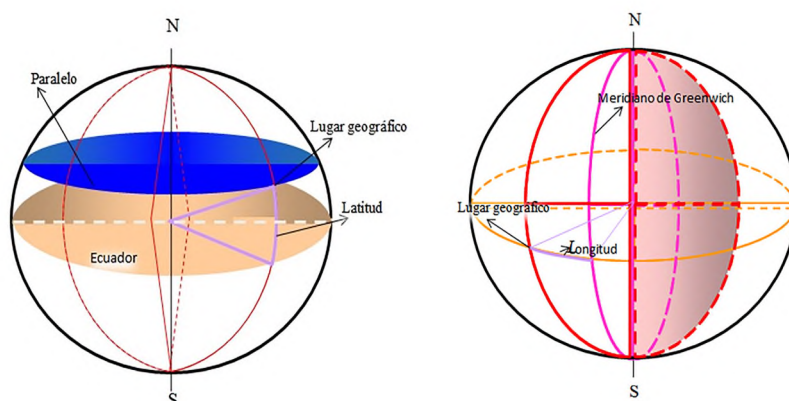


Figura 3.7. Representación de paralelo, latitud, meridiano, longitud (Noemí Sogari).

Declinación (δ). Posición angular del Sol al mediodía solar respecto al plano del ecuador. Varía entre -23.45° y $+23.45^\circ$ (positivo para el hemisferio norte).

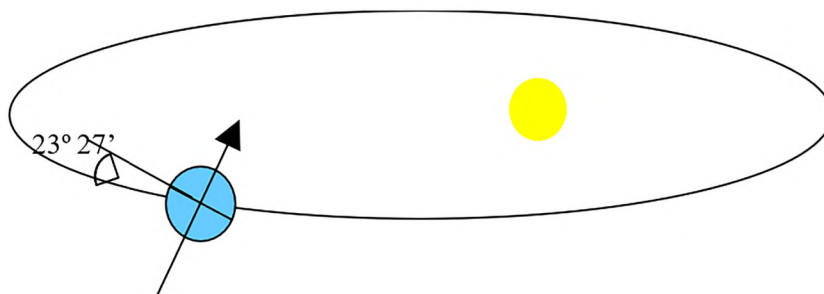


Figura 3.8. Representación del ángulo de declinación (Noemí Sogari).

El eje de rotación de la Tierra se encuentra inclinado unos 23.45° respecto del plano orbital de la Tierra, por lo que, a medida que gira alrededor del Sol, expone perpendicularmente a los rayos del Sol y de forma cíclica, el hemisferio norte, el ecuador y el hemisferio sur. De esta manera, visto desde la superficie de la Tierra, el Sol se «ve más alto» en el cielo (con mayor ángulo de elevación) durante el verano y «más bajo» en el invierno.

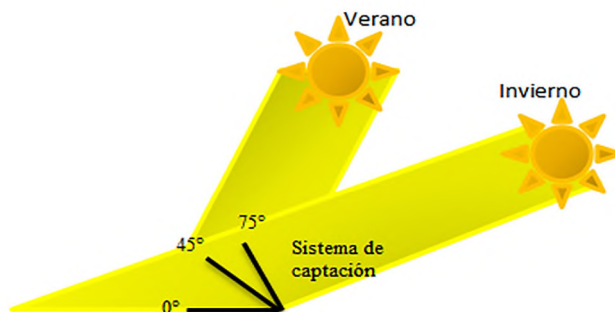


Figura 3.9. El Sol se «ve más alto» en el cielo (con mayor ángulo de elevación) durante el verano y «más bajo» en el invierno (Noemí Sogari).

La declinación puede calcularse aplicando la ecuación de Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (3.6)$$

Donde: n es el número del día en el año.

El comportamiento de la declinación solar se aproxima a un coseno con amplitud igual al ángulo de la eclíptica y periodo igual al de un año tropical solar, de modo que su máximo corresponde al solsticio de verano, el mínimo al solsticio de invierno y los equinoccios a los pasos por cero.

Ángulo de incidencia (θ). Ángulo determinado por la radiación solar directa sobre una superficie y la normal a dicha superficie.

Ángulo acimutal de la superficie (Υ'). Desviación angular respecto del meridiano local, de la proyección de la normal a la superficie sobre el plano horizontal.

Ángulo horario (ω). Desplazamiento angular del Sol hacia el este o el oeste respecto del meridiano local. Consecuencia de la rotación terrestre a 15° cada hora. Por definición, el mediodía solar es $\omega=0^\circ$. El ángulo horario solar expresa la rotación diaria de la Tierra. Como la Tierra gira 360° en 24 horas, cada hora agrega 15° al ángulo horario. Cuando el Sol está en su punto más alto en el cielo, el ángulo de hora solar es igual a cero. Los ángulos antes del mediodía toman valor negativo y después del mediodía, positivo.

Ángulo cenital (θ_z). Ángulo determinado por la vertical del lugar y la línea del Sol.

Altitud solar (α_s). Ángulo entre la horizontal del lugar y la línea solar.

Ángulo acimutal solar (Υ_s). Desplazamiento angular respecto del sur de la proyección de la radiación solar directa incidente sobre una superficie horizontal. Desplazamiento hacia el este es positivo.

Inclinación (β). Ángulo determinado por la superficie en cuestión y la horizontal del lugar ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$).

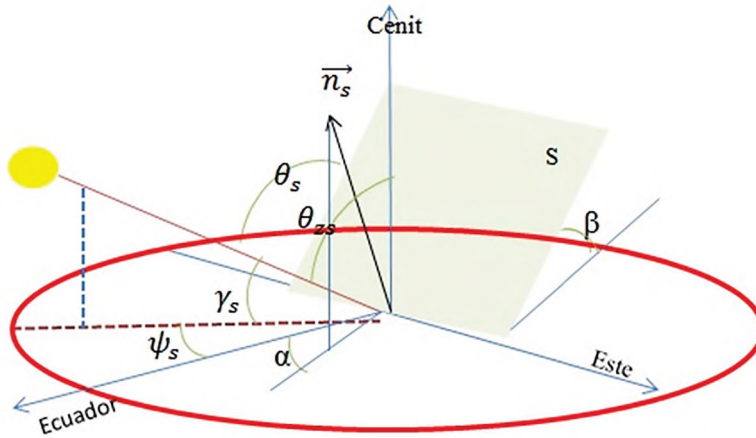


Figura 3.10: Ángulos de posición (datos provenientes de la Universidad de Jaén, adaptados por Noemí Sogari).

La relación geométrica entre el plano de un sistema con una determinada orientación relativa a la Tierra y la radiación solar directa incidente sobre dicha superficie podrá ser descrita en términos de los ángulos antes definidos.

Relaciones entre los ángulos de posición

La dirección de la radiación solar incidente sobre una superficie orientada respecto de las coordenadas locales se calcula mediante las siguientes relaciones matemáticas.

Ángulo de incidencia:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \beta - \text{sen} \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega \\ &+ \cos \delta \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{sen} \gamma \cdot \text{sen} \omega \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ángulo cenital:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \delta = \text{sen} \alpha \quad (3.8)$$

Ángulo horario:

$$\cos \omega_s = \frac{-\sin \delta \cdot \sin \Phi}{\cos \delta \cdot \cos \Phi} = -\tan \delta \cdot \tan \Phi \quad (3.9)$$

Calcular el ángulo de incidencia de la radiación directa incidente sobre una superficie horizontal ubicada en Corrientes, Argentina, a las 10:30 hora solar del 17 de abril.

Solución

- Ubicación del lugar

Lugar de estudio: Corrientes. Entonces, su ubicación estará dada por los siguientes ángulos:

Latitud: $27^{\circ} 27' S (27.45^{\circ})$

Longitud: $58^{\circ} 49' O$

- Número de día en el año

Día seleccionado: 17 de abril. Corresponde al día número $n=107$ del año.

- Posición del Sol

La posición angular del sol al mediodía solar respecto al plano del ecuador, es decir, la declinación será igual a:

$$\delta = -23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284+107}{365}\right) = -10.15^{\circ} \quad (1)$$

- Cálculo del ángulo horario

Hora seleccionada: 10.5, entonces $\omega = 15^{\circ} \times 10.5 = 157.5^{\circ} - 180^{\circ} = -22.5^{\circ} \quad (2)$

- Duración astronómica del día

$$\cos \omega_s = -\tan(-10.15) \cdot \tan 27.45 \quad (3)$$

$$\omega_s = 84.6^{\circ}$$

Y como la Tierra gira 360° en 24 horas, entonces, $84.6^{\circ} = 5.64$ horas.

Es decir que la salida del Sol ocurre 5.64 horas antes del mediodía solar y el ocaso, 5.64 horas después del mediodía solar. Este dato resulta útil para conocer con precisión el tiempo durante el cual un sistema de colección podría aprovechar la radiación solar.



Referencias bibliográficas

«Promedio del flujo de energía por unidad de tiempo que llega a la Tierra» (Sin fecha). En *Ciencia Nasa*. Disponible en <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-espaciales>

DUFFIE, John A. y Beckman William A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. USA: Wiley.

IQBAL, Muhammad (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Toronto: Academic press

WHILLIER, A. (1956). «The Determination of Hourly Values of Total Radiation from Daily Summations». *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B*, 7, 197.

