

Estimación horaria de la irradiancia solar total extraterrestre

Estimación horaria de la irradiancia solar total extraterrestre

Edson Plasencia S.¹, Lidio Matos C.², Adolfo Posadas³, Carlos Cabrera⁴

RESUMEN

La irradiancia solar total extraterrestre (TSI, por sus siglas en inglés) es la cantidad de energía proveniente del sol, por unidad de área, que recibe todo punto por encima de la atmósfera terrestre, en cada instante de tiempo; por lo tanto, es una cantidad que varía tanto espacial como temporalmente, de acuerdo a la posición de un punto en particular sobre la Tierra y de la posición de ésta respecto del Sol.

Actualmente se dispone de una serie de propuestas metodológicas para estimar la TSI en forma diaria, sin embargo, existen lugares como la Antártida, donde la variabilidad sinóptica es muy alta, por lo tanto, se necesita adaptar o desarrollar una metodología que permita realizar un balance energético a una escala de tiempo menor.

En adelante, se analizará la adaptabilidad a nivel horario de los más importantes modelos propuestos a nivel diario y finalmente, se propondrá una metodología a emplear en estudios de alta resolución espacial y temporal, como los estudios antárticos a nivel horario.

Palabras clave: Irradiancia Solar, Energía Solar, Estudios Antárticos.

ABSTRACT

The Total Solar Irradiance (TSI) is the total amount of solar energy present per square unit every moment beyond the atmosphere, so, for every point it takes values that changes along the year according to its relative location on the Earth and the current position of the Earth respect to the Sun.

Actually, it's available many methods for computing daily values of TSI, nevertheless, for places like The Antartida where the daily variability of weather are highest on the world, it's needed a method that allow perform an energy balance at high spatial and temporal resolution.

In this paper, the adaptability of the most used daily methods to work on a horal scale of time is analyzed and finally, a methodology for computing TSI at high spatial and temporal resolution is proposed, to be used, by example on antartical studies.

Keywords: Solar Irradiance, Solar Energy, Antartical Studies.

1 Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica. Universidad Nacional de Ingeniería. E-mail: eplasencia@uni.edu.pe

2 Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

3 Centro Internacional de la Papa

4 Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

POSICIÓN SOLAR Y LA TSI

La forma elipsoidal que describe la trayectoria del movimiento de traslación de la Tierra al rededor del Sol, permite que exista un momento de máximo acercamiento entre ambos, llamado perihelio, y uno de máximo alejamiento, llamado afelio, y por lo tanto, que la TSI oscile también anualmente desde un valor máximo a uno mínimo.

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) define la “Constante Solar” como el promedio anual de la TSI y recomienda asignarle el valor de 1367 W/m² (valor obtenido mediante consideraciones teóricas relativas a la temperatura del Sol y al movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol)

Entonces, la cantidad de energía solar por unidad de área que recibe la Tierra en un punto por encima de la atmósfera terrestre (extraterrestre) durante el instante de tiempo *dt*, puede escribirse como:

$$dG = I_0 \epsilon \cos\Theta_z dt \dots \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

I_0 = Constante Solar (unidades de potencia por unidad de área).

ϵ = Factor de corrección (modulación) de I_0 debido a la excentricidad de la órbita terrestre.

Θ_z = Ángulo cenital (ángulo de observación del Sol).

Si la transmisividad de la atmósfera fuera del 100% (o equivalentemente, sin atmósfera) la proyección de cada uno de estos puntos extraterrestres sobre la superficie terrestre recibiría, durante ese instante *dt*, la misma cantidad de energía *dG*.

En un intervalo de tiempo mayor, la cantidad de energía recibida debe expresarse como una integral en el tiempo, por lo tanto, se necesita definir un sistema de coordenadas que de cuenta de la posición de observación del Sol desde cualquier punto de la superficie terrestre en todo instante de tiempo.

En astronomía estas coordenadas son: el ángulo cenital y el ángulo azimutal; definidas tal como se muestra en la Figura 1.

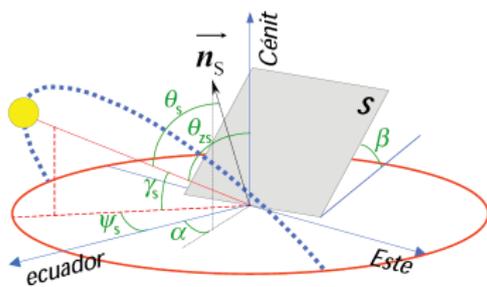


Figura 1. Definición de ángulos solares

Definiendo además el ángulo solar (ω) como “0” (cero) al medio día, positivo en las mañanas y con una variación de 15° por hora a partir del medio día, es posible expresar *dG* como:

$$dG = I_0 \epsilon (\text{Sen}(\lambda)\text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\lambda)\text{Cos}(\delta)\text{Cos}(\omega)) dt$$

...[Ecuación 2]

Donde:

λ = Latitud del punto de observación

ω = Ángulo solar

δ = Declinación solar (resultado de la inclinación del eje de rotación de la Tierra)

Al integrar *dG* sobre un intervalo de tiempo suficientemente pequeño como para que tanto ϵ como δ puedan considerarse constantes, por ejemplo, entre t_1 y t_2 (o equivalentemente entre ω_1 y ω_2) se obtiene:

$$G = I_0 \epsilon (12/\pi) (\text{Sen}(\lambda)\text{Sen}(\delta)(\omega_2 - \omega_1) + \text{Cos}(\lambda)\text{Cos}(\delta)(\text{Sin}(\omega_2) - \text{Sin}(\omega_1)))$$

... [Ecuación 3]

Donde:

G = Cantidad de energía por unidad de área recibida entre t_1 y t_2 .

I_0 = Se expresa en unidades de energía por unidad de área por horas.

Sí, el intervalo de tiempo es igual a una hora, entonces:

$$G = I_0 \epsilon (\text{Sen}(\lambda)\text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\lambda)\text{Cos}(\delta) \left[(24/\pi) \text{Cos}(\omega_0) \text{Sin}(\pi/24) \right])$$

... [Ecuación 4]

Donde:

ω_0 = Ángulo solar a mitad del intervalo de tiempo entre t_1 y t_2

LA DECLINACIÓN SOLAR

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.

Los modelos matemáticos más empleados para dar cuenta de este fenómeno son:

1) Spencer (1971)

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

2) Perrin de Brichanbaut (1975)

$$\delta = \text{ArcSin} \left(0.4 * \sin \left(2\pi \frac{(n-82)}{365} \right) \right)$$

3) Cooper (1969)

$$\delta = 23.45^\circ (\pi / 180^\circ) * \sin \left(2\pi \frac{(284+n)}{365} \right)$$

4) García (1994)

$$\delta = -23.45^\circ (\pi / 180^\circ) * \cos \left(2\pi \frac{(n+9)}{365} \right)$$

Donde:

$$\beta = n * (2\pi / 365)$$

n = Día del año (valores enteros entre 1 y 365)

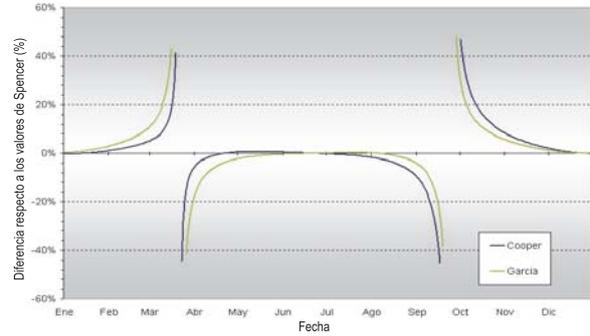
El modelo de Spencer es el más ampliamente utilizado a nivel mundial, por ejemplo, se utilizó al elaborar el “Atlas de Radiación Solar de Colombia” [1], el “Atlas Climático de Irradiación Solar de España” [2] y es utilizado oficialmente por la Oficina de Navegación y Oceanografía de Estados Unidos [3] (NOAA, por sus siglas en inglés).

Además, en el Atlas Climático de Irradiación de España se menciona que permite estimar el ángulo de declinación solar con un error máximo de 0.0006 radianes.

Sin embargo, el Laboratorio de Monitoreo de la Radiación Solar [4] (SRML, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Oregon (USA), recomienda el uso del modelo de Cooper y a nivel local, el año 2001, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI - PERU), utilizó indirectamente el modelo de García [5] al elaborar el “Atlas de Radiación Solar del Perú” [6], basado en los trabajos de Baigorria [7].

Ya que todos estos modelos utilizan el día del año como parámetro de entrada, se entiende que fueron desarrollados y validados para ser utilizados en una escala temporal diaria, por lo que, con el objetivo de seleccionar un modelo que pueda ser utilizado a nivel horario en la estación antártica peruana de Machu Picchu, haciendo fraccionario el día del año (Primer día del año = 1 de enero a las 12:00 m) se tabularon, compararon y graficaron valores horarios de los modelos de Spencer, Cooper y García.

Gráfico 1. Estimación de la declinación solar horaria Comparación de modelos.



El Gráfico 1 muestra que existe una diferencia promedio de 20% entre los valores de Declinación Solar estimados en forma horaria mediante los modelos de Cooper y García, respecto de los estimados utilizando el modelo de Spencer.

La Tabla 1 muestra que la discretización de la Declinación Solar a nivel horario es más continua con el modelo de Spencer que con los otros modelos.

Tabla 1. Intercomparación de modelos de Declinación Solar.

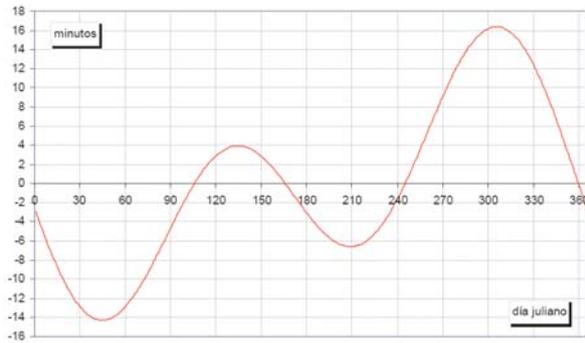
Nivel	Valor (grados °)		Modelo		
			Spencer	Cooper	García
Diario	Angulo de Declinación Solar	Máximo	23.455514	23.449728	23.449077
		Mínimo	-23.425984	-23.449728	-23.449945
		Mínimo (Abs)	0.065924	0.000000	0.100918
	Dif. entre valores	Mínima	-0.389575	-0.403667	-0.403663
		Máxima	0.395310	0.403652	0.403663
		Mínimo (Abs)	0.001668	0.001737	0.000000
Horario	Angulo de Declinación Solar	Máximo	23.455514	23.449945	23.449945
		Mínimo	-23.426305	-23.449945	-23.449945
		Mínimo (Abs)	0.000094	0.000000	0.000000
	Dif. entre valores	Mínima	-0.016232	-0.016820	-0.016820
		Máxima	0.016471	0.016820	0.016820
		Mínimo (Abs)	0.000003	0.000006	0.000006

LA ECUACIÓN DEL TIEMPO

La trayectoria que describe la Tierra en su movimiento de traslación alrededor del Sol no es circular, pero verifica aquella ley de Kepler que establece “áreas iguales en tiempos iguales”, entonces, la Tierra acelera y desacelera durante su movimiento de traslación, por lo tanto, a lo largo del año, el “medio día” marcado por los relojes que usan los seres humanos (hora civil) no coincide con el “medio giro” de la Tierra sobre su eje (hora solar).

La diferencia de tiempo (en minutos) entre la hora civil y la hora solar varía durante un año, como lo muestra el Gráfico 2.

Grafico 2. Minutos de diferencia entre la hora civil y la hora solar.



Tanto en el Atlas de Radiación Solar de España como en el Atlas de Radiación Solar de Colombia se utilizó para la Ecuación del Tiempo, una expresión propuesta por Spencer [8] y que a continuación se presenta:

$$EqT = 229.18 * (0.000075 + 0.001868 \cos(\beta) - 0.032077 \sin(\beta) - 0.014615 \cos(2\beta) - 0.040849 \sin(2\beta))$$

Esta expresión, sin ser la más precisa de todas las disponibles [9], es ampliamente utilizada a nivel mundial, incluso la NOAA la utiliza; sin embargo, existen por supuesto otras, como a la que hacer referencia la documentación del SRML:

$$EqT = \begin{cases} -14.2 \sin(\pi(n+7)/111), & 1 \leq n \leq 106 \\ 4.0 \sin(\pi(n-106)/59), & 107 \leq n \leq 166 \\ -6.5 \sin(\pi(n-166)/80), & 167 \leq n \leq 246 \\ 16.4 \sin(\pi(n-247)/113), & 247 \leq n \leq 365 \end{cases}$$

Donde:

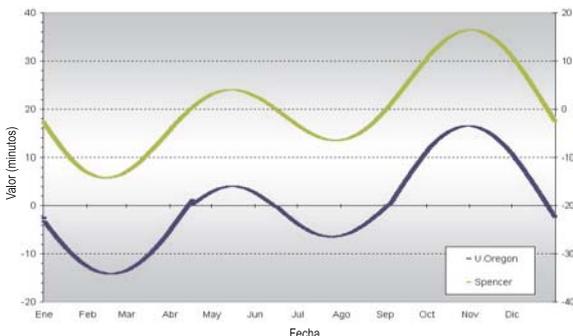
EqT= Se expresa en minutos

$$B = n * (2\pi / 365)$$

n = Día del Año (valores enteros entre 1 y 365)

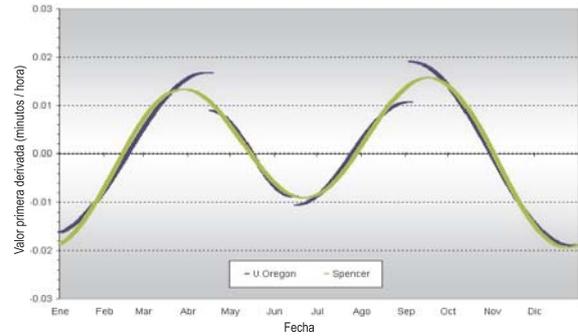
El Gráfico 3 muestra los valores que devuelven ambas expresiones, cuando se las evalúa de forma horaria (reparametrizando fraccionalmente el número de día del año, de tal manera que, Primer Día del año = 1 de Enero a las 12:00 m).

Grafico 3. Ecuación del Tiempo - Estimación Horaria.



La expresión tomada de la documentación del SRML muestra unas discontinuidades que se hacen más evidentes cuando se analiza la primera derivada de los valores tabulados.

Grafico 4. Primera derivada de la ecuación del tiempo.



CORRECCIÓN POR HUSO HORARIO

La hora civil es por definición, la misma para toda longitud dentro de un mismo huso horario, de tal forma que cuando la longitud del punto de observación es mayor o menor por 15° a la longitud de referencia horaria, es necesario cambiar la hora civil (hora local) en una hora.

Esta transición discontinua implica que, basta con que un punto de observación se encuentre alejado apenas 3° respecto de la longitud de referencia horaria, ya el tiempo solar estaría errado en un 20%.

Tomando en cuenta este hecho, la expresión que relaciona correctamente el tiempo solar con el tiempo civil sería:

$$TSolar = TLocal + \frac{EqT}{60} + \frac{(Lon_{Ref} - Lon_{Local})}{15^\circ}$$

Recuérdese además que:

$$\omega = \pi - \left(\frac{\pi}{12}\right) TSolar$$

EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA TSI HORARIA

Tomando en cuenta la adaptabilidad de los modelos analizados (su continuidad) ante una escala temporal de mayor resolución (horaria) se consideró:

- Constante Solar, valor recomendado por la WMO (1367 W/m²).
- Excentricidad Orbital, factor de corrección propuesto por Spencer.
- Declinación Solar, adaptación del propuesto por Spencer a día del año fraccional.
- Angulo Solar, con precisión de minutos debido a la incorporación de:
- Ecuación del Tiempo, adaptación de Spencer a día del año fraccional.

- Corrección de Huso Horario, haciendo continua la hora civil (1 min cada 0.25°).

Luego, se calcularon los valores de Energía Solar Total Extraterrestre a intervalos horarios a partir de las 6:00 h, de acuerdo a la Ecuación 4.

A diferencia de la metodología propuesta por Ruiz y Silva [10], se evaluaron numéricamente todos los términos de la Ecuación 4, sin aproximaciones.

Una vez encontrado el total de la energía solar recibida durante cada hora civil, se dividió dicha cantidad entre 3600 segundos para obtener la Irradiancia Solar Total Extraterrestre Promedio Horario sobre el punto de observación.

Tanto con la metodología descrita, como con la utilizada por Ruiz y Silva, se han tabulado valores de la TSI Promedio Horario para tres localidades peruanas: Estación Meteorológica Weberbauer (Cajamarca), Estación Meteorológica Automática Lima-Este (Lima) y Estación de Investigación Machu Picchu (Antártida).

Tabla 2. Localidades referenciales

Nombre	Ubicación	Latitud	Longitud
Est. Met. Weberbauer	Cajamarca	-7.133	-78.467
Est. Met. Aut. Lima Este	Lima	-12.0503	-77.0836
Est. Inv. Machu Picchu	Antártida	-62.0914	-58.4711

Los Gráficos 5, 6, 7 y 8 muestran una comparación de los valores obtenidos con ambas metodologías para cuatro épocas distintas del año.

Grafico 5. TSI Promedio Horario - Enero.

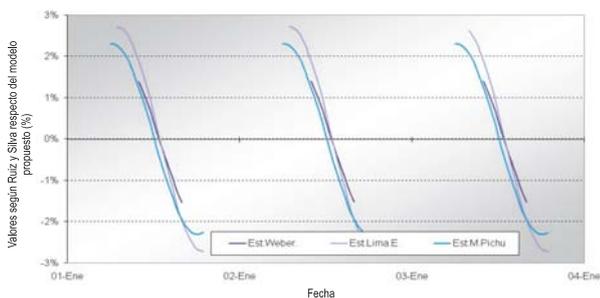


Grafico 6. TSI Promedio Horario - Abril.

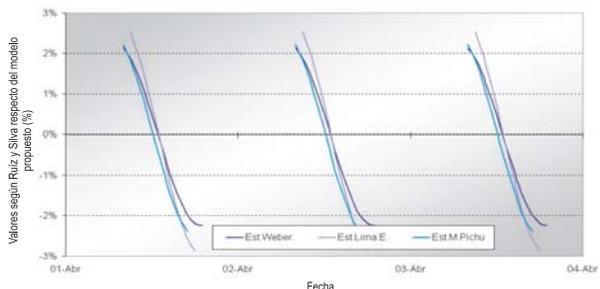


Grafico 7. TSI Promedio Horario - Julio.

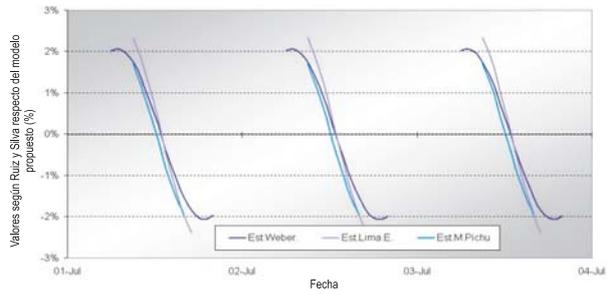
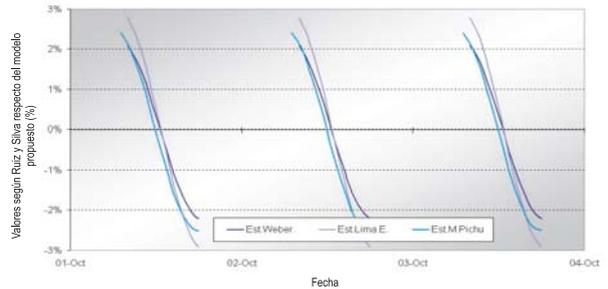


Grafico 8. TSI Promedio Horario - Octubre.



CONCLUSIONES

Estimar la declinación solar mediante el modelo de Garcia o el de Cooper, ofrece menos precisión y menos continuidad a nivel horario que hacerlo mediante el modelo de Spencer; modelo que además permite una eficiente implementación computacional.

La Ecuación del Tiempo propuesta por Spencer tiene frente a otras expresiones una precisión y continuidad a nivel horario muy superior, con lo cual, ofrece un adecuado balance entre complejidad y precisión.

La corrección por huso horario es de uso imprescindible en tanto se requiera evaluar la TSI con una resolución espacial de kilómetros o menor aún.

De acuerdo con los valores estimados, simplificar las expresiones de la TSI implican para las localidades peruanas un error absoluto máximo de 3% y un error absoluto promedio de 1.5% , lo cual equivale aproximadamente a 20 W/m² , la radiación promedio mensual que reciben muchas zonas alto andinas del Perú.

Con la metodología empleada para estimar los valores Promedio Horario de la TSI, se abre la posibilidad de contrastar con un valor teórico, los valores experimentales de radiación solar registrados en las estaciones meteorológicas instaladas en la superficie terrestre, a nivel horario y así, encontrar por ejemplo : factores de transmisividad atmosférica, variación de nubosidad horaria, número de horas de sol potenciales diarias a alta resolución espacial, etc.

Dado que las variaciones en la trayectoria que describe el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, son significativamente diferentes cada 400 años, los valores estimados, mantienen su precisión durante este mismo tiempo de años.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ministerio de Minas y Energía, Republica de Colombia (2005). "Atlas de Radiación Solar en Colombia", Colombia.
2. Vera Mella, Nelson (2005). "Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la península Ibérica", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
3. Earth System Research Laboratory, NOAA-USA (2007). "Solar Position Calculator", Estados Unidos.
Disponible en: <http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/azel.html>
4. Solar Radiation Monitoring Laboratory, Oregon University (2007). "Solar radiation basics", Estados Unidos.
Disponible en: <http://solardat.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.html>
5. Garcia, J.V. (1994). "Principios Físicos de la Climatología", Ediciones Univ. Agraria La Molina, Lima, Perú.
6. Ministerio de Energía y Minas, Republica del Perú (2001). "Atlas de Radiación Solar del Perú", Perú.
7. Baigorria, Guillermo (2004). "Climate interpolation for land resources and land use studies in mountainous regions", Tesis Doctoral, Wageningen University, Los Paises Bajos.
8. Spencer, J. W. (1971). "Fourier series representation of the position of the Sun", *Search* 2 (5), 172, Estados Unidos.
9. Michalsky, J. J. (1988). "The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050)", *Solar Energy* 40 (3), 227-235, Estados Unidos.
10. Ruiz H., Valeriano y Silva P., Manuel (2005). "Radiación Solar", Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, España.