

RADIACIÓN SOLAR INSTANTÁNEA Y HORARIA SOBRE PLANOS INCLINADOS PREDICCIONES TEÓRICAS Y DETERMINACIONES EXPERIMENTALES

Luis L. Altamirano¹, Rodolfo P. León¹, Enrique D. Albizzati¹, Orlando M. Alfano²

1 Facultad de Ingeniería Química (UNLitoral) - Stgo. del Estero 2654 -3000-
 Santa Fe - Argentina - Fax: 042-571162 - E-mail: aleo@fiqus.unl.edu.ar

2 INTEC (CONICET-UNLitoral) - Güemes 3450 - 3000 - Santa Fe - Argentina. FAX : 042-550944

RESUMEN

Se emplean modelos teóricos en la predicción de la radiación solar incidente sobre superficies inclinadas para la ciudad de Santa Fe, Argentina en días de cielo sin nubes. Los resultados de la aplicación de cuatro modelos para estimar la radiación global y difusa sobre las superficies inclinadas se comparan con funciones que aproximan las determinaciones experimentales. Las comparaciones se efectúan con datos de la radiación solar instantáneos e integrados en una hora. Se calculan errores absolutos y relativos para testear los modelos teóricos. Con ángulos de inclinación a 15° y 30° el modelo isotrópico subestima en forma significativa valores de la radiación, mientras que los modelos anisotrópicos presentan en general un buen acuerdo con las mediciones. El modelo de Hay y Davies tiene mínimo valor de la raíz cuadrada del error cuadrático medio para la radiación solar global y difusa, evaluadas tanto en forma instantánea como horaria.

INTRODUCCIÓN

En Argentina las mediciones de radiación solar más frecuentes son sobre superficies horizontales siendo escasos los datos sobre superficies inclinadas. Cuando el propósito que se persigue es conocer la intensidad de la radiación solar incidente sobre un plano receptor, y su variación según la posición del sol y el tiempo, los modelos de estimación de la radiación son una alternativa importante. Los modelos teóricos realizan el cómputo de la radiación solar en todo el espectro por medio de dos componentes: la radiación solar directa y la difusa, siendo la suma de estas dos la radiación global recibida sobre el plano. Estos modelos están restringidos a días de cielo claro o con baja nubosidad han sido verificados para el plano horizontal (Bird y Riordan, 1986).

En este trabajo se analizan cuatro modelos teóricos para obtener la radiación solar incidente sobre planos inclinados (Duffie y Beckman, 1991). Los modelos son: Isotrópico, Hay y Davies, Reindl et al. y Perez et al., los cuales se diferencian en el método de evaluación de la radiación solar difusa. Además se presentan determinaciones experimentales de la radiación global y difusa sobre superficies planas horizontal e inclinadas, efectuadas desde el medio día hasta el atardecer en días de cielo sin nubes en Santa Fe, Argentina. El objetivo es la estimación teórica y la medición de radiación solar sobre planos inclinados, la aplicación de elementos estadísticos como método de comparación entre valores medidos y determinados con los modelos, y la interpretación de los resultados haciendo uso de los valores instantáneos y horarios de la radiación solar determinada experimentalmente.

PREDICCIÓN TEÓRICA DE LA RADIACIÓN

La radiación solar global incidente sobre un plano inclinado un ángulo t respecto a la horizontal es la suma de la radiación directa y la difusa :

$$I_{GT,\lambda} = I_{DN,\lambda} \cos \theta_i + I_{dT,\lambda} \quad (1)$$

El ángulo de incidencia de la radiación directa sobre el plano es (θ_i). Con el modelo espectral publicado por Bird y Riordan (1986) se calcula la radiación directa normal (I_{DN}), a partir de la radiación solar extraterrestre ($H_{0,\lambda}$) y de las transmitancias de la atmósfera, que incluyen los siguientes procesos: dispersión Rayleigh ($T_{r,\lambda}$), dispersión y absorción de aerosol ($T_{a,\lambda}$), y absorción del ozono ($T_{o,\lambda}$), del vapor de agua ($T_{w,\lambda}$) y de otros gases también presentes en la atmósfera ($T_{u,\lambda}$). Un factor relacionado con la distancia sol - tierra (D) corrige el valor de la radiación extraterrestre según la época del año:

$$I_{DN,\lambda} = H_{0,\lambda} D T_{r,\lambda} T_{a,\lambda} T_{w,\lambda} T_{o,\lambda} T_{u,\lambda} \quad (2)$$

Para el cálculo de la radiación difusa sobre superficies inclinadas ($I_{dT,\lambda}$) existe el modelo isotrópico y los modelos anisotrópicos (Duffie y Beckman, 1991). En este trabajo se emplea el criterio expuesto por Bird y Riordan (1986) aplicando los modelos para evaluar la radiación solar sobre planos inclinados en cada banda del espectro y en un instante de tiempo, aunque originalmente estos modelos fueron empleados para valores horarios de radiación solar.

El modelo isotrópico considera que la superficie recibe desde el cielo el mismo valor de radiación (sin depender de la dirección); la radiación difusa es la suma de esta componente denominada isotrópica y la componente originada en la reflexión de la radiación en el suelo. Los modelos anisotrópicos consideran que la radiación difusa tiene múltiples componentes, además de la radiación reflejada. El modelo de Hay y Davies estima la radiación difusa como la suma de una componente circumsolar que tiene la misma dirección que la radiación directa, y las componente isotrópica y reflejada antes referidas. Otro modelo utilizado es el de Reindl et al. que agrega el término de brillo de horizonte a los términos contemplados en el modelo de Hay y Davies. Finalmente, el modelo de Perez et al. estima con formulaciones propias las componentes isotrópica, reflejada, circumsolar y otra de brillo de horizonte involucradas en el cálculo de la radiación difusa.

Los resultados teóricos obtenidos son valores de radiación para cada longitud de onda. Por lo tanto al utilizarlos se procede a integrar los valores calculados en el caso que se realizan las estimaciones en forma instantánea. Luego, para hallar valores horarios se integran en este período los valores predichos para cada instante, mediante el método numérico de Simpson.

MEDICIONES Y PARÁMETROS DE CÁLCULO

Las mediciones de la radiación global sobre superficie inclinada se realizaron con un piranómetro Eppley, modelo Black & White. Para efectuar las mediciones de la radiación solar difusa inclinada se utilizó el piranómetro Kipp & Zonen con una banda sombreadora (modelo CM 11/121). Esta banda impide la incidencia de toda la radiación solar directa y de una pequeña fracción de la radiación solar difusa, por lo que los valores experimentales fueron corregidos con factores propuestos por el fabricante. Las mediciones se realizaron bajo condiciones de cielo sin nubes. Las determinaciones se efectuaron desde el mediodía solar hasta la puesta del sol. Los valores de la humedad relativa ambiente promedio oscilaron entre 60 y 62%, y las temperaturas promedio entre 25 y 29°C. Ambas variables se midieron simultáneamente con la radiación solar, empleando un termohigrómetro portátil Hanna, modelo HI 8564.

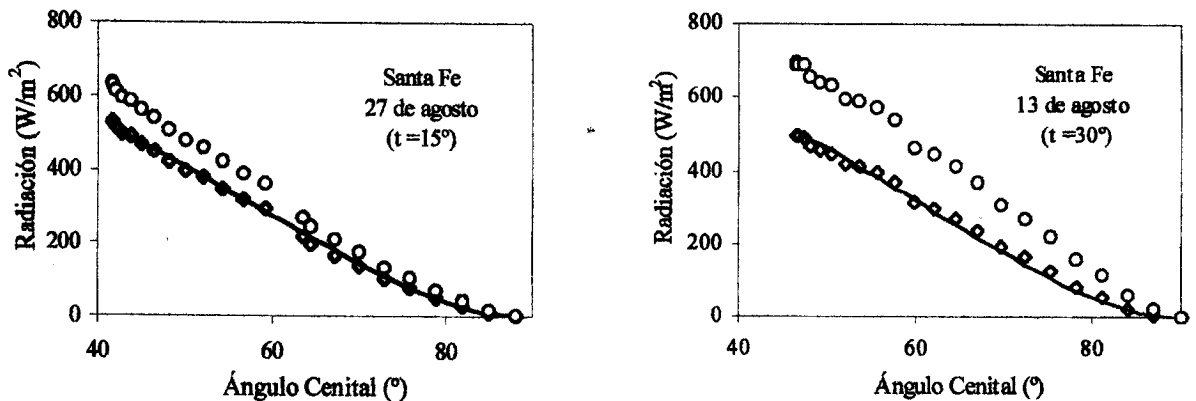


Figura 1 : Radiación Solar Directa calculada con datos experimentales (o Inclinada, \diamond Horizontal) y calculada con el Modelo de Bird y Riordan (—)

En relación con los parámetros de cálculo, para hallar el coeficiente de turbidez de Ångström (β) con los valores de la radiación solar global y difusa medidos sobre planos inclinados a 15° y 30°, se calculan por diferencia los valores de la radiación solar directa incidente en estas superficies (I_{DT}^*) y se proyectan dichos valores sobre el plano horizontal (I_D^*), conocidos el ángulo cenital (θ_z) y el ángulo de incidencia de la radiación sobre el plano inclinado :

$$I_D^* = I_{DT}^* (\cos \theta_z / \cos \theta_i) \quad (3)$$

Luego se aplica el modelo de Bird y Riordan (1986) para encontrar la radiación solar teórica sobre la superficie horizontal (I_D) y con un método numérico de estimación de parámetros para sistemas no lineales se halla el valor del coeficiente β (Altamirano et al., 1996). Se computa una función objetivo que incluye las diferencias entre la radiación directa teórica y la calculada con los datos experimentales, que se muestran en la Figura 1. El valor del coeficiente de turbidez se corresponde con el valor mínimo de dicha función objetivo.

Con el método de estimación de parámetros se obtiene $\beta = 0.103$ para el día 13 de agosto y $\beta = 0.154$ para el día 27 de agosto. Estos valores prácticamente coinciden con los propuestos por Iqbal (1983) para días de cielo claro ($\beta = 0.10$) y cielo algo turbio ($\beta = 0.15$), con un valor de $\alpha = 1.3$ para el exponente de la fórmula de Ångström. Para el cálculo teórico de la radiación solar en las superficies inclinadas se emplea la turbidez atmosférica en la longitud de onda 0.5 μm ($\tau_{0.5}$); a partir de los valores de α y β referidos se encuentra que $\tau_{0.5} = 0.380$ (plano inclinado a 15°) y $\tau_{0.5} = 0.252$ (plano inclinado a 30°).

Otros parámetros utilizados en los modelos son: la presión atmosférica ($P = 1010$ mb), el albedo de dispersión de aerosol a la longitud de onda 0,4 μm ($\omega_{0.4} = 0,815$) y su factor de variación con la longitud de onda ($\omega' = 0,095$), fijados según los valores propuestos por Gueymard (1989). El factor de asimetría de aerosol ($\langle \cos \theta \rangle = 0,95$) se adopta según lo propuesto por Bird y Riordan (1986), y el espesor de la capa de ozono (288 unidades Dobson) en función de la latitud del lugar, el mes y el año

según la fórmula de Piacentini (1992). El vapor de agua precipitable en la atmósfera (w), fue calculado según la fórmula de Leckner (1978), dependiendo de la temperatura y de la humedad relativa ambiente medidas. Sus valores son: $w=3,32\text{cm}$ (día 13 de agosto) y $w=4,08\text{cm}$ (día 27 de agosto).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se observa que los valores experimentales de la radiación solar global disminuyen fuertemente al crecer el ángulo cenital, mientras que es mucho menos pronunciada la caída de la radiación solar difusa. Cuando el ángulo de inclinación del plano es 15° , para un ángulo cenital $\theta_z=50^\circ$ el cociente entre la radiación difusa y global incidente es 0,28, mientras que la relación entre la radiación global sobre el plano inclinado y la radiación global horizontal es igual a 1,18. Si el ángulo cenital es 70° las relaciones anteriores valen 0,41 y 1,22 respectivamente.

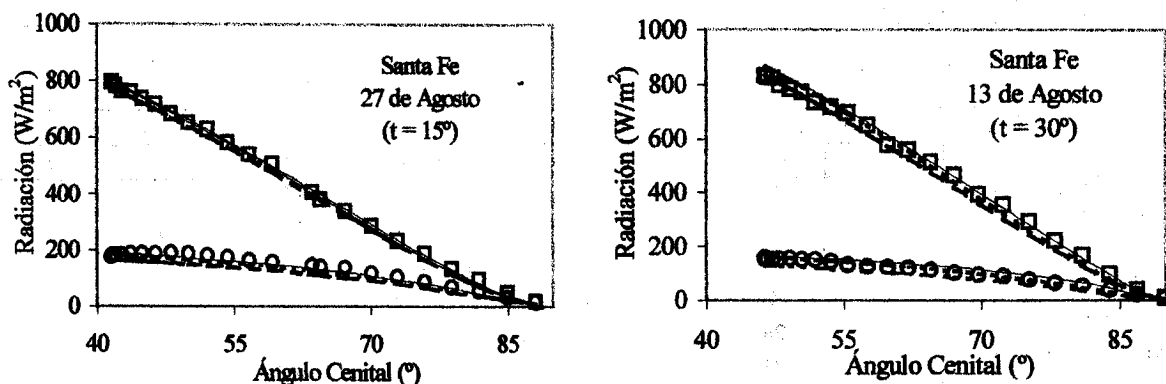


Figura 2 : Radiación solar experimental (\square Global, \circ Difusa) y teórica (..... Mod. Reindl et al. y Hay y Davies, - - - - Mod. Isotrópico, _____ Mod. Perez et al.)

Al analizar las mediciones sobre el plano posicionado a 30° se visualiza que disminuyen los cocientes entre la radiación difusa y la global a 0,20 ($\theta_z=50^\circ$) y 0,24 ($\theta_z=70^\circ$). Asimismo crecen los cocientes entre la radiación solar global inclinada y horizontal; cuando el ángulo cenital es 50° la relación vale 1,33 y si dicho ángulo es 70° trepa a 1,54. Las variaciones encontradas entre $t = 15^\circ$ y $t = 30^\circ$, se originan tanto en la posición del plano receptor, pues a mayor ángulo de inclinación es menor el ángulo de incidencia de la radiación directa y es mayor la radiación recibida por la superficie, como en el hecho que cuando se efectuaron las mediciones en el plano inclinado a 30° se presentaron las condiciones de cielo más claro.

Los modelos que se comparan son: Isotrópico, Hay y Davies, Reindl et al. y Perez et al. Con los resultados obtenidos se verifica que el modelo isotrópico en general subestima la radiación solar global y difusa medida sobre ambos planos inclinados. Los modelos anisotrópicos utilizados presentan un razonable acuerdo, como se observa en la última figura. En las representaciones gráficas prácticamente no se detectan diferencias ni en la radiación global ni en la radiación difusa entre los resultados del modelo de Hay y Davies y los hallados con el modelo de Reindl et al. Sí en cambio se comprueba que con el modelo de Perez et al. se predicen los valores más altos de radiación solar al compararlo con los otros modelos, a igual ángulo y cualquiera sea la condición de cielo e inclinación de la superficie.

El test estadístico abarca el cálculo MBE (error medio de desviación - mean bias error), MPE (error de porcentaje medio - mean percentage error), y RMSE (raíz cuadrada del error cuadrático medio - root mean square error). Los errores absolutos (MBE y RMSE) y el error relativo (MPE) se estiman en forma instantánea entre cada uno de los resultados de los modelos teóricos y los valores hallados con el polinomio de tercer grado que ajusta las determinaciones experimentales. La estimación horaria de los errores se efectúa con los valores integrados en ese lapso entre las 13 y las 18 horas, haciendo uso del cálculo numérico (método de Simpson).

En las Tablas 1 y 2 se vuelcan los valores calculados de los errores. Analizando el MBE para valores instantáneos y horarios, y ambos ángulos de inclinación, no se observa una tendencia definida en los modelos anisotrópicos. En cambio el modelo isotrópico subestima los datos medidos y los valores absolutos del MBE son máximos en relación con los otros modelos. Los valores promedio mínimos absolutos de MBE corresponden al modelo de Perez et al. para la radiación difusa instantánea ($1,9 \text{ W/m}^2$) y horaria ($3,2 \text{ Wh/m}^2$), y al modelo de Hay y Davies al analizar la radiación global instantánea ($0,8 \text{ W/m}^2$) y horaria ($2,0 \text{ Wh/m}^2$).

En relación con el error relativo medio porcentual (MPE), los valores absolutos del modelo isotrópico son los más altos. El modelo de Perez et al. presentan los valores absolutos mínimos al promediar los resultados alcanzados en ambos planos inclinados, de radiación difusa instantánea (1,8%) y horaria (-3,8%) y de radiación global instantánea (4,6%). El modelo de Hay y Davies es el que presenta menor valor absoluto promedio de MPE para la radiación global horaria (1,1%).

En lo que respecta al error absoluto RMSE, del análisis de los promedios de los datos tabulados se comprueba que el modelo de Hay y Davies es el que posee los mínimos valores promedio en los días de medición, tanto para la radiación difusa instantánea ($10,5 \text{ W/m}^2$) y horaria ($9,8 \text{ Wh/m}^2$), como para la radiación global instantánea ($15,2 \text{ W/m}^2$) y horaria ($14,0 \text{ Wh/m}^2$).

Tabla 1. Comparación entre valores teóricos y experimentales de radiación solar a $t = 15^\circ$.

Radiación solar sobre plano inclinado a 15°		Isotrópico		Hay y Davies		Reindl et al.		Perez et al.	
		Difusa	Global	Difusa	Global	Difusa	Global	Difusa	Global
MBE	Instantáneo	-26,8	-15,0	-14,5	-2,7	-14,4	-2,6	-7,2	4,7
	Horario	-28,2	-14,8	-14,6	-1,3	-14,5	-1,2	-6,8	6,6
MPE	Instantáneo	23,6	8,1	15,7	5,6	15,6	5,6	9,5	3,0
	Horario	19,4	3,7	10,8	1,0	10,8	1,0	5,0	-1,1
RMSE	Instantáneo	27,7	15,5	16,1	7,7	16,1	7,7	9,4	8,8
	Horario	28,8	15,2	16,0	5,5	15,9	5,5	8,6	8,2

Tabla 2. Comparación entre valores teóricos y experimentales de radiación solar a $t = 30^\circ$.

Radiación solar sobre plano inclinado a 30°		Isotrópico		Hay y Davies		Reindl et al.		Perez et al.	
		Difusa	Global	Difusa	Global	Difusa	Global	Difusa	Global
MBE	Instantáneo	-22,7	-19,0	0,6	4,2	1,2	4,8	11,0	14,7
	Horario	-23,8	-20,4	1,9	5,3	2,5	5,9	13,1	16,5
MPE	Instantáneo	26,0	14,2	6,5	10,0	6,0	9,8	-5,9	6,2
	Horario	20,2	5,7	-0,8	1,1	-1,3	1,0	-12,6	-1,8
RMSE	Instantáneo	23,6	24,6	4,9	22,7	5,2	23,0	13,0	23,3
	Horario	24,4	25,1	3,5	22,4	4,0	22,6	13,6	23,5

CONCLUSIONES

* Se comprueba que la radiación solar global decrece fuertemente al aumentar el ángulo cenital, y es menor la disminución de la radiación solar difusa y es elevada la relación entre ambas excepto para altos valores del ángulo cenital.

* Se observa una mejor concordancia entre las predicciones y las mediciones al aplicar modelos anisotrópicos; el modelo isotrópico tiene la particularidad de subestimar los valores de radiación solar global y difusa.

* En relación con los modelos anisotrópicos, se comprueba que los valores obtenidos con el modelo de Hay y Davies son prácticamente los mismos que con el modelo de Reindl et al.

* El modelo de Hay y Davies tiene el mínimo valor promedio de RMSE para la radiación global y difusa predichas, tanto instantánea como horaria.

AGRADECIMIENTOS : Se agradece a la Universidad Nacional del Litoral (Beca de Iniciación en la Investigación y financiamiento de Proyecto CAID 96) y al CONICET, (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) la colaboración prestada para la realización de este trabajo. A la Cátedra de Automatización y Control de Procesos por el instrumental electrónico facilitado durante las mediciones.

REFERENCIAS

- Altamirano L. L., Albizzati E. D. y Alfano O. M. (1996) Estimación del coeficiente de turbidez de Ångström mediante la radiación solar directa en el mes de julio para la ciudad de Santa Fe, Argentina, Tomo I, pág. 4.13 - 4.16 - Actas de la 19ª Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente.
- Bird, R.E. y Riordan C. (1986) Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres, *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol. 25, N° 1, pp. 87-97.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991) Solar engineering of thermal processes. Second edition, Wiley-Interscience publication, J. Wiley & Sons, Inc..
- Gueymard C. A. (1989) Two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface. *Solar Energy*, Vol. 43, pp. 253-265.
- Iqbal M. (1983) An introduction to solar radiation. Academic Press.
- Leckner B. (1978) The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface-elements of a model. *Solar Energy*, Vol. 20, pp. 143-150.
- Piacentini, R.D. (1992) Comportamiento espacio-temporal de la capa de ozono para latitudes bajas e intermedias ($50^\circ N$, $50^\circ S$), Congreso de la Asociación de Geofísicos y Geodestas, Buenos Aires, Argentina.