

UN METODO PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN GLOBAL CON LA AMPLITUD TÉRMICA Y LA PRECIPITACIÓN DIARIAS

M.R. ALONSO; R.O. RODRÍGUEZ; S.G. GÓMEZ y R.E. GIAGNONI¹

Recibido: 14/02/02

Aceptado: 02/04/02

RESUMEN

Se presenta un modelo de simulación de la radiación global diaria que sólo requiere como variables meteorológicas de entrada la amplitud térmica (tmax-tmin) y la precipitación diarias. El modelo no requiere ser reparametrizado para su aplicación en diferentes regiones de la Argentina.

La comparación de la estimación con modelos basados en la heliofanía y con otros modelos similares, demuestra un adecuado comportamiento que lo habilita para ser aplicado en los casos que no se dispone de valores medidos de radiación global o de valores estimados a partir de la heliofanía.

Palabras clave. Radiación global, métodos de estimación, temperatura del aire, precipitación

AN ESTIMATION METHOD OF SOLAR RADIATION BASED IN DAILY AMPLITUDE TEMPERATURE AND PRECIPITATION

SUMMARY

A model for the simulation of incoming solar radiation is presented. It only requires daily maximum and minimum temperature and precipitation as input variables. It is not needed the reparameterization of the model for the application over different regions in Argentina

The precision of this model is compared with that of a model based in solar brightness duration and with that of similar models also based in air temperature and precipitation. It shows an adequate performance, becoming a possible estimation method when solar radiation measurements and solar brightness duration are not available.

Key words. Solar radiation, estimation methods, air temperature, precipitation.

INTRODUCCIÓN

La insuficiente cantidad de estaciones meteorológicas con medición de la radiación global incidente es un problema cada vez que se desea aplicar un modelo que simula un proceso mediado por la radiación (ej. fotosíntesis, transpiración, generación de energía eléctrica, etc.) En Estados Unidos de Norte América sólo un 1% de la cantidad de estaciones meteorológicas realiza observación de la radiación y a nivel mundial aproximadamente en una de cada 500 estaciones meteorológicas se registra la radiación global incidente (Thornton y Running, 1999).

La carencia de datos de radiación ha estimulado, desde hace muchos años, el desarrollo de métodos de estimación a partir de otras variables meteorológicas, como la heliofanía, la temperatura del aire, las horas-grado de temperatura, la nubosidad, la precipitación, la humedad relativa y el vapor de agua precipitable. Schulze (1976) y a Goldberg *et.al.* (1979) han realizado revisiones sobre estos métodos.

Hunt *et.al.* (1998) encontraron que si se usaban las mediciones de una estación para estimar la radiación en puntos más o menos alejadas de la misma, el error cuadrático medio o "root mean

¹ Instituto de Clima y Agua – CNIA – INTA. Los Reseros y Las Cabañas s/n - 1712 Villa Udaondo – Castelar, Pcia. de Buenos Aires

square error" (RMSE) aumentaba en forma lineal con la distancia, o en forma curvilínea si se aplicaba un método de estimación ajustado en dicha estación. Concluyeron que existe una distancia crítica de unos 400 km, por debajo de la cual conviene utilizar directamente los valores medidos. Para mayores distancias convendría utilizar un modelo de estimación.

Grossi Gallegos y Leopardo (1988) estudiaron el problema de la extrapolación de los datos de radiación medidos en la región pampeana de la Argentina, llegando a determinar una distancia de 225 km con un error aceptable menor a 10% para valores mensuales, pero errores muy elevados para valores diarios, aún a distancias menores.

No obstante la variedad de parámetros meteorológicos que pueden relacionarse con la radiación global incidente se debe considerar el más sencillo y frecuentemente observado en las estaciones meteorológicas. Es el caso de las que registran únicamente las temperaturas máxima y mínima del aire y la precipitación. A ello se debe, indudablemente, que se hayan destinado esfuerzos con mayor intensidad al desarrollo de un método basado en estas variables (Brinsfield *et al.*, 1984; Bristow y Campbell, 1984; Hargreaves *et al.*, 1985; Reddy, 1987; Ravelo *et al.*, 1989; Schoen Petersen, 1990; Hook y McClendon, 1992; Elizondo *et al.*, 1994; Supit, 1994; Hunt *et al.*, 1998; Gooding *et al.*, 1999 y Thornton *et al.*, 2000).

Los modelos semiempíricos o empíricos desarrollados hasta el presente estiman la radiación global razonablemente bien para la estación donde se ajusten los coeficientes, pero necesitan normalmente ser reparametrizados para aplicarlos en otra localidad.

La determinación de la radiación global con la fórmula de Angström-PreScott (PreScott, 1940) está mundialmente difundida y aceptada como un modelo de estimación a partir de la heliofanía relativa. En la Argentina ha sido muy usado en aplicaciones agrometeorológicas tomando los coeficientes indicados por Penman (1948), cuando no se disponía de los determinados por Grossi Gallegos y Atienza (1991).

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un método de estimación semiempírico de la radiación global diaria incidente, a partir de la amplitud térmica y la precipitación diarias, que no requiera una reparametrización cuando se aplique a distintas

localidades y/o regiones de la Argentina donde no se disponga de la heliofanía relativa. La precisión obtenida será comparada con la del método basado en mediciones de esta última variable y con la de métodos similares al aquí propuesto, presentes en la bibliografía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos observados de radiación global utilizados fueron registrados por la Red Solarimétrica dependiente del Departamento de Energía no Convencional, División Energía Solar, de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales de la Fuerza Aérea Argentina, con Piranómetro Eppley Black and White modelo 8-48.

En el Cuadro N°1 se incluyen las estaciones y el detalle de los años de medición usados, tanto para el ajuste como para la validación del modelo. En algunos casos se trata de años incompletos de medición. Para el ajuste se emplearon las mediciones no discontinuas, correspondientes a un año completo de 14 estaciones de medición distribuidos sobre todo el territorio argentino (Figura 1).

Los datos meteorológicos requeridos para la determinación de los coeficientes y validación del modelo corresponden a la red de estaciones agrometeorológicas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

De acuerdo con Bristow y Campbell (1984):

$$T_t = \frac{\text{radiación global medida}}{\text{radiación incidente al tope de la atmósfera}} \quad (1)$$

Donde T_t es la transmitancia, y la radiación incidente es al tope de la atmósfera sobre una superficie horizontal o radiación astronómica (**RA**), calculada en función de la latitud y fecha del año de acuerdo a Smith (1992).

Si se estima T_t para cada día, a su vez se puede estimar la radiación global (**RG**):

$$RG = T_t \cdot RA \quad (2)$$

El modelo de Bristow y Campbell (1984), así como los que se derivaron del mismo (Thornton y Running, 1999; Goodin *et al.*, 1999), asumen una función con tres parámetros, cuya gráfica tiene forma aproximadamente sigmoidea para la transmitancia en función de la amplitud diaria de temperatura. Hargreaves *et al.* (1985) en cambio, expresaron la RG como una función lineal de la raíz cuadrada de la amplitud térmica diaria. Debido a su

Cuadro N° 1. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas empleadas en el ajuste y validación del modelo. Se detallan los años utilizados para el ajuste y para la validación. Aquellas estaciones en las que no se señala año para el ajuste sólo participaron en la validación.

Estación	Latitud S.	Longitud W.	Altura s.n.m. (m)	Años Utilizados	
				Ajuste	Validación
01 - Cerrillos	24°54'	65°29'	1.250	-	82
02 - Pte.R.Sáenz Peña	26°52'	60°27'	90	83	84
03 - Famaillá	27°03'	65°25'	363	-	79, 80, 81, 82, 83, 84
04 - El Sombrerito	27°39'	58°46'	57	83	81, 82, 84
05 - Mercedes (Corrientes)	29°10'	58°01'	100	82	83, 84
06 - Rafaela	31°11'	61°33'	100	83	79, 80, 81, 82, 84
07 - Paraná	31°50'	60°31'	110	83	79, 80, 81, 84
08 - Oliveros	32°33'	60°51'	26	83	82, 84
09 - Marcos Juárez	32°41'	62°07'	110	83	79, 80, 81, 82, 84
10 - V. Mercedez (San Luis)	33°43'	65°29'	515	82	80, 81, 83, 84
11 - Pergamino	33°56'	60°33'	65	-	82
12 - San Miguel	34°33'	58°44'	26	83	80, 81, 82, 84
13 - Castelar	34°40'	58°39'	22	83	79, 80, 81, 82, 84

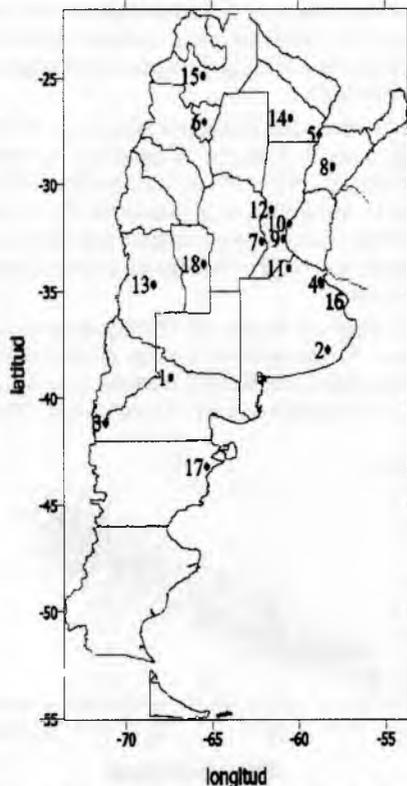


Figura 1. Ubicación de las estaciones utilizadas.

mayor simplicidad y facilidad para el ajuste de los parámetros, se seguirá este último modelo relacionando T_t con la raíz cuadrada de la amplitud diaria de temperatura ($t_{max}-t_{min}$), en °C en lugar de utilizar la RG. Se procuró así hallar un modelo para la estimación de la transmitancia, obteniendo luego en forma indirecta la RG, como se indica en (2).

De acuerdo con Ravelo y Zanvettor (1989), se incorporó al modelo la variable J , considerando que la transmitancia está correlacionada con la variación del ángulo de declinación solar a lo largo del año, determinante del espesor de la capa atmosférica que debe atravesar la radiación para llegar a la superficie de la tierra:

Si d_j es mayor que 172 y menor que 355, $J = d_j - 172$;

Si d_j es mayor que 0 y menor que 173, $J = 172 - d_j$

Si d_j es mayor que 354 y menor que 366, $J = 183 - (d_j - 355)$

Siendo d_j el día juliano, 172 el día juliano correspondiente al solsticio de invierno (SI) y 355 el día juliano correspondiente al día del solsticio de verano (SV).

Esta transformación del día juliano produce un valor mínimo para el SI y un valor máximo para el SV.

Basados en el trabajo de Reddy (1987) se relacionó la RG como una función de la latitud (Lat) y de las precipitaciones, quien también utilizó la raíz cúbica de este último parámetro. Para el modelo a desarrollar se

decidió emplear un procedimiento de prueba y error para seleccionar el exponente de la precipitación diaria (Pp), en milímetros.

Se decidió incorporar también la altura sobre el nivel del mar (Alt) en m para compensar su efecto sobre la amplitud diaria de la temperatura.

Finalmente se estableció el siguiente modelo para la transmitancia:

$$Tt = a_0 + a_1 Lat + a_2 Alt + a_3 J + a_4 (tmax-tmin)^{0.5} + a_5 Pp^b$$

Se empleó el procedimiento "Step Wise" para verificar la significancia de las variables propuestas y determinar sus coeficientes.

Para la validación del modelo obtenido se calculó la RG diaria en Mj/m² por medio de la ecuación (2) con la Tt estimada por el modelo y la RA correspondiente. A fines comparativos, también se computó la RG con la ecuación basada en la heliofanía relativa utilizando los coeficientes propuestos por Penman (1948).

La precisión de los métodos se compara por medio del RMSE y el error medio absoluto en porcentaje (MAE %):

$$MAE\% = \text{abs} (\text{Est}-\text{Obs}) / \text{Obs} \cdot 100$$

Donde Est: valor estimado y Obs: valor observado

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo obtenido para la estimación de la Tt diaria en función de la diferencia entre la temperatura máxima y mínima (amplitud térmica) y la precipitación diaria, con los correspondientes valores de los coeficientes, es el siguiente:

$$Tt = 0.134 - 2.21 \cdot 10^{-3} \cdot Lat - 1.13 \cdot 10^{-4} \cdot Alt + 1.69 \cdot 10^{-4} \cdot J + 0.145 \cdot (tmax-tmin)^{0.5} - 0.118 \cdot Pp^{0.05}$$

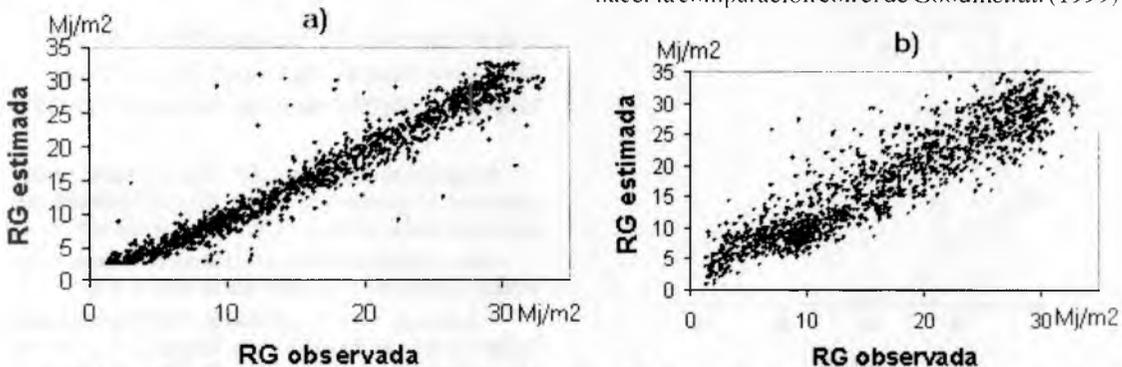


Figura 2. Radiación global diaria observada (RG) y estimada: a) Por método de la heliofanía y b) Por el método de la amplitud térmica y precipitación diarias (modelo propuesto) para la estación Alto Valle. N=1.292.

En las Figuras (2) a y b se observan los gráficos de la relación entre valores medidos y estimados para la estación Alto Valle con el modelo basado en la heliofanía y el modelo aquí propuesto.

En el Cuadro N° 2 se presentan, para cada estación, la cantidad de días empleados en la estimación por el método de la heliofanía y por el modelo propuesto y los respectivos RMSE y MAE %.

En el Cuadro N° 3 se compara la precisión del métodos de estimación desarrollado en este trabajo con los propuestos por otros autores. Para esto se indican los valores de RMSE y MAE% y asimismo se señala la cantidad de observatorios meteorológicos sobre la que se realizó la validación de los métodos.

Comparando en primer término el método con la heliofanía con el de amplitud térmica y precipitación diarias, se observa que la mediana y el valor mínimo del RMSE obtenidos con este último son un 50% mayor al obtenido con el método que utiliza la heliofanía, no ocurriendo lo mismo con los valores máximos, que resultan aproximadamente similares. La diferencia para el MAE% trepa a casi el doble para la mediana y el valor medio, siendo de un 50% para el máximo. Esto sugiere que el método de la temperatura y precipitación podría presentar una estabilidad razonable.

Los métodos analizados por Hunt *et al.* (1998) para el Estado de Ontario (Canadá) y Gooding *et al.* (1999) para el Estado de Kansas (EEUU) basados en la temperatura y precipitación diarias fueron validados comparativamente con menor número de estaciones, distribuidas en un área mucho más reducida.

En el trabajo de Hunt *et al.* (1998) (dos métodos empleados) la precisión es similar al obtenido en este trabajo, pero con RMSE mínimo más alto, al hacer la comparación con el de Gooding *et al.* (1999)

Cuadro N° 2. Comparación de la precisión obtenida en la estimación de la radiación global incidente diaria (RG) por el método de la heliofanía y el de la temperatura y precipitación (modelo propuesto). N: número de días empleado en cada estación y para cada método; RMSE: error medio cuadrático; MAE%: error medio absoluto en por ciento.

Estación	Método de estimación con la heliofanía			Método de estimación amplitud térmica y la precipitación diaria		
	N	RMSE	MAE%	N	RMSE	MAE%
01 - Cerrillos	58	1,51	9,6	58	2,33	27,2
02 - Pte.R.Saenz Peña	701	2,33	13,5	704	4,27	37,8
03 - Famaillá	1.567	2,55	17,7	1.570	4,00	35,6
04 - El Sombrerito	1.381	2,28	13,1	1.380	3,95	26,7
05 - Mercedes (Corrientes)	1.257	3,28	16,9	1.259	4,24	25,4
06 - Rafaela	2.159	2,79	14,9	2.085	3,87	27,4
07 - Paraná	1.872	3,08	16,6	1.870	4,52	28,4
08 - Oliveros	822	1,65	12,5	996	3,49	28,0
09 - Marcos Juárez	1.901	2,17	12,2	1.838	3,89	30,2
10 - V. Mercedes (San Luis)	1.100	3,23	16,8	1.135	3,71	22,2
11 - Pergamino	318	3,23	15,6	321	3,57	24,5
12 - San Miguel	1.647	1,90	12,0	1.700	3,23	23,9
13 - Castelar	1.864	2,61	15,8	1.862	3,87	21,1
14 - Rama Caída	1.649	2,52	12,6	1.655	3,50	20,6
15 - Balcarce	491	4,03	26,1	540	4,38	35,0

Cuadro N° 3. Valor de la mediana (Md), valor mínimo (Min) y valor máximo (Max) del RMSE y el MAE% para distintos métodos. Se indica la cantidad de estaciones meteorológicas utilizadas en cada caso.

Cantidad de Estaciones	RMSE			MAE%			Método	Autor
	Md	Min	Max	Md	Min	Max		
17	2,55	1,51	4,03	14,9	9,6	26,1	Heliofanía	Este trabajo
17	3,87	2,33	4,52	27,2	20,6	37,3	Temperatura	Este trabajo
8	4,60	4,20	4,70	-	-	-	Heargraves (1985)	Hunt <i>et.al.</i> (1998)
8	3,85	3,40	4,10	-	-	-	Hunt <i>et.al.</i> (1998)	Hunt <i>et.al.</i> (1998)
10	2,79	2,60	4,68	33,0	9,6	43,0	Goodin <i>et.al.</i> (1999)	Goodin <i>et.al.</i> (1999)
40	-	-	-	14,4	7,5	35,4	Thornton <i>et.al.</i> (1999)	Thornton <i>et.al.</i> (1999)

se observa que el valor de la mediana del RMSE es menor en este último caso, siendo los valores de la mediana del MAE% similares en ambos casos. Los valores máximos son comparables, tanto en el RMSE como en el MAE%.

El método de Thornton y Running (1999) no se basa sólo en la amplitud de la temperatura y la precipitación diarias, ya que requiere además la

temperatura del punto de rocío. Fue validado en una extensa región en Estados Unidos, con una amplia variabilidad climática. Tampoco requiere de una reparametrización en cada sitio. Los valores de MAE% mínimo y mediano son comparables a los obtenidos por el método de la heliofanía, superando la precisión del método aquí propuesto, aunque sin embargo, la diferencia con el valor má-

ximo MAE% es mas bien pequeña, apuntando nuevamente a la estabilidad de los resultados obtenidos.

La similitud de estimación entre el método aquí desarrollado y el de la heliofanía, lograda para las localidades argentinas analizadas (ej.: Pergamino y Villa Mercedes -San Luis-), y la aceptable precisión con relación a otros métodos de simulación propuestos en otros países, permite utilizarlo para

la estimación de la radiación global diaria con temperaturas y precipitación como únicas variables meteorológicas sin la necesidad de recalcular los coeficientes. La aplicación del modelo se justifica en regiones carentes de mediciones de radiación global, cuando no se dispone de valores de heliofanía relativa.

BIBLIOGRAFÍA

- BRINSFIELD, R.; M. YARAMANOGLU and F. WHEATON. 1984. Ground level solar radiation prediction model including cloud cover effects. *Solar Energy* 33: 493-499.
- BRISTOW, C.L and G.S. CAMPBELL. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31: 159-166.
- ELIZONDO, D.; G. HOOGENBOOM and R.W. MCCLENDON. 1994. Development of a neural network model to predict daily solar radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71: 115-132.
- Goldberg, B., W.H. Klein and R.D. McCartney. 1979. A comparison of simple models used to predict solar irradiance on a horizontal surface. *Solar Energy* 23:81-83.
- GOODING, D.G.; J.M.S. HUTCHINSON; R.L. VANDERLIP and M.C. KNAPP. 1999. Estimating solar irradiation for crop modeling using daily air temperature data. *Agronomy Journal* 91: 845-851.
- GROSSI GALLEGOS H. y G. ATIENZA. 1991. Determinación de ajuste de la ecuación de regresión entre las horas de insolación y la radiación. *Actas V Reunión Argentina de Agrometeorología*. Córdoba, Argentina, p. 57-62.
- GROSSI GALLEGOS H. and R. LOPARDO. 1988. Spatial variability of the global solar radiation obtained by the solarimetric network in the Argentine Pampa Humeda. *Solar Energy*, 40(5)397-404
- HARGREAVES, G.L; G.H. HARGREAVES and J.P. RILEY. 1985. Irrigation water requirement for Senegal River Basin. *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE 111:265-275.
- HOOK, J.E. and R.W. McCLENDON. 1992. Estimation of solar radiation data missing from long-term meteorological records. *Agronomy Journal* 88:739-742.
- HUNT, L.A.; L. KUCCHAR and C.J. SWANTON. 1998. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 91:293-300.
- PENMAN H.L.. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. London. Ser. A*. 193:120-146.
- PRESCOTT J.A.. 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. S. Aust.* 1:114-118.
- RAVELO, A.C. y R. ZANVETTOR. 1989. Estimación de la radiación solar diaria para su utilización en modelos fisiológicos. *Actas IV Reunión Argentina de Agrometeorología*. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- REDDY, S.J. . 1987. The estimation of global solar radiation and evaporation through precipitation – a note. *Solar Energy* 38: 97-104.
- SCHOEN PETERSEN, M.. 1990. Implementation of semi-physical model for examining solar radiation in the Midwest. Research Report 90-01, Midwestern Climate Center. Atmospheric Sciences Division, Illinois State Water Survey, Champaign IL.
- SCHULZE, R.E. 1976. A physically based method of estimating solar radiation from sun cards. *Agricultural Meteorology*, 16:85-101.
- SUPIT, I. 1994. Global Radiation. Luxembourg: Office for Official Publication of the European Communities, *Agricultural Series*, Cat No.: CL-NA-15745-EN-C, pag. 194.
- SMITH M.. 1992. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. FAO, Land and Water Development Division, *Report*, Rome, pags. 60.
- THORNTON, P.E. and S.W. RUNNING. 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology* 93: 211-228.
- THORNTON, P.E.; H. HASENAUER and M.A. WHITE. 2000. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. *Agricultural and Forest Meteorology* 104:255-271.