

## **EVALUACIÓN DE DISTINTOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL BASADOS EN DATOS DE TEMPERATURA**

C. Raichijk, A. Lanson

GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas,  
Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján,  
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

**RESUMEN:** Se analizaron 11 diferentes modelos de estimación de la radiación solar global media mensual a partir de datos de temperatura ambiente. Los modelos se ajustaron en San Miguel y Paraná donde se cuenta con datos simultáneos de radiación global y temperatura de 30 años de extensión. Luego los distintos modelos fueron validados para el periodo 2002-2010 en la estación de Luján ubicada en la misma región climática Templado Húmeda, obteniéndose para la mayoría de los mismos desvíos cuadráticos medios relativos, al comparar valores medidos con estimados, iguales a 9,4%. Estos resultados indican que, en nuestra región climática y hasta una distancia de 300 km, estos modelos permiten estimar la radiación global media mensual con un aceptable nivel de precisión. A su vez se observó que al estimar con los modelos mejor ajustados en Paraná, los desvíos aumentan en Luján en términos medios en un 5% y con estos mismos modelos ajustados en San Miguel, a una distancia menor de 40 km, en un 2,7% aproximadamente.

**Palabras clave:** Modelos de estimación de radiación global, temperatura, Región Templado Húmeda.

### **INTRODUCCIÓN**

Los llamados modelos meteorológicos de estimación de la radiación solar global permiten evaluar el recurso solar incidente en superficie mediante correlaciones empíricas definidas respecto a distintas variables meteorológicas. Estos modelos son de gran utilidad teniendo en cuenta la escasez o ausencia de datos de tierra de radiación solar en vastas regiones del país y del mundo. Se han propuesto diferentes tipos de modelos: lineales, polinómicos, de potencia, exponenciales, definidos respecto a una o más variables, siendo las más utilizadas: la heliofanía u horas de brillo solar, la humedad relativa, la temperatura ambiente, la nubosidad y precipitación. Todas las diferentes correlaciones propuestas se ajustan a partir de datos simultáneos de radiación global y de las distintas variables meteorológicas consideradas. Por lo tanto, en general, los modelos dependen de las condiciones climatológicas locales o regionales en las que fueron definidos. Se deberá entonces analizar en cada caso la posibilidad de extrapolar el modelo ajustado en determinadas condiciones a otro lugar o región climática.

El objetivo del presente trabajo será estudiar 11 diferentes tipos de modelos basados en la amplitud térmica para estimar valores medios mensuales de radiación solar global en la Región Templado Húmeda del país. Se utilizarán datos simultáneos de radiación global y temperatura de 30 años de extensión obtenidos en las estaciones de Paraná y San Miguel. Los diferentes modelos se ajustarán en cada una de estas estaciones y empleando también la información de ambas en conjunto. Luego se validarán en la estación de Luján donde se cuenta con datos para el periodo 2002-2010, lo que permitirá evaluar el nivel de incerteza con que se podrá estimar valores medios mensuales de radiación solar a distintas distancias dentro de la misma región climática.

Por otro lado cabe señalar que Grossi Gallegos y Spreafichi (2007) en Paraná y Grossi Gallegos y Blazquez (1996) en San Miguel, al estudiar las series temporales de promedios anuales tanto de radiación global como de distintas variables meteorológicas asociadas, entre las que se incluye la temperatura ambiente, concluyeron que, teniendo en cuenta la incerteza de las mediciones, no era posible concluir la existencia de tendencia alguna con una significancia del 5%. Eso implica que los modelos ajustados con datos correspondientes al periodo de máxima extensión disponible pueden ser validados en distintos sub-periodos de menor extensión.

### **MATERIALES Y MÉTODO**

Para ajustar los distintos modelos estudiados en el presente trabajo se emplearon los promedios mensuales de radiación global consistidos y almacenados por la Red Solarimétrica correspondientes a la estación Paraná-INTA(31°50'S, 60°31'W, 110 msnm) para el periodo 1979-2010 y a la estación San Miguel del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (34°33'S, 58°40'W, 26 msnm) para el periodo 1980-2010 conjuntamente con datos diarios de temperatura de ambas estaciones para los mismos periodos suministrados por el Banco de datos del SMN.

Todos los modelos están definidos con respecto a la amplitud térmica media mensual:

$$\Delta T_m = \overline{T_{\max}} - \overline{T_{\min}} \quad (1)$$

siendo  $\overline{T_{\max}}$  y  $\overline{T_{\min}}$  las temperaturas máxima y mínima medias mensuales respectivamente. Se consideró la diferencia de las medias mensuales y no la media mensual de las diferencias diarias por ser los valores medios de temperatura de más fácil acceso para el potencial usuario.

En la Tabla 1 se presentan los distintos modelos estudiados y las referencias de los trabajos originales.

Modelo	Ecuaciones	Referencias
1	$H/H_o = a + b (\Delta T_m/N)$	García (1994) citado por Evrendilek y Ertekin (2008)
2	$H/H_o = a \Delta T_m^b$	Richardson (1985) citado por Liu y Scott (2001)
3	$H/H_o = a \Delta T_m^{0,5}$	Hargreaves y Samani (1982)
4	$H/H_o = a \Delta T_m^{0,5} + b$	Hargreaves et al.(1985) citado por Evrendilek y Ertekin (2008)
5	$H/H_o = a \ln (\Delta T_m) + b$	Chen et al.(2004)
6	$H/H_o = 1 - \exp (-a \Delta T_m^b)$	Thornton y Running (1999)
7	$H/H_o = a [1 - \exp (-b \Delta T_m^c)]$	Bristow y Campbell (1984)
8	$H/H_o = a [1 - \exp (-b \Delta T_m^c / H_o)]$	Goodin et al. (1999)
9	$H/H_o = 0,75 [1 - \exp (-b \Delta T_m^2 / H_o)]$	Weiss et al. (2001)
10	$H = [a \Delta T_m^b (H_o \tau)^c - d] / e$ donde $\tau = 0,8 + 0,12 [(182-n)/183]^{1,5}$	Mahmood y Hubbard (2002) citado por Evrendilek y Ertekin (2008)
11	$H/H_o = a \Delta T_m + b$	modelo lineal

Tabla 1: Modelos estudiados en el presente trabajo, donde  $\Delta T_m$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) es la amplitud térmica media mensual;  $H$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) la radiación diaria media mensual en superficie;  $H_o$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) la radiación a tope de atmósfera definida para el día medio de cada mes ( $n$ );  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , y  $e$  las constantes a ajustar cuyas dimensiones dependen del modelo considerado y  $N$  ( $h$ ) el número de horas de sol.

Para el estudio de validación se consideraron datos medios mensuales de radiación global y temperatura para el periodo 2002-2010 obtenidos en el estación solarimétrica y meteorológica perteneciente a la Universidad Nacional de Luján ( $34^{\circ}35'S$ ,  $59^{\circ}03'W$ , 21msnm).

Los estimadores estadísticos empleados en el estudio de validación son el error cuadrático medio relativo, RMSE%, y el desvío medio relativo, MBE%:

$$\text{RMSE\%} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (H_{\text{est}} - H_{\text{obs}})^2 / n \right]^{0,5}}{\sum_{i=1}^n H_{\text{obs}} / n} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$MBE\% = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{est} - H_{obs})}{\sum_{i=1}^n H_{obs}} 100\% \quad (3)$$

donde  $H_{obs}$  y  $H_{est}$  son los valores medios de radiación global observados y estimados respectivamente.

## RESULTADOS

En la Tabla 2 se consignan los valores de las constantes de cada modelo ajustados en San Miguel (215 casos), Paraná (256 casos) y utilizando datos de ambas estaciones en conjunto (471 casos) y el coeficiente de determinación,  $R^2_{ajuste}$ , al comparar valores medidos y estimados con estos modelos.

Modelo	San Miguel		Paraná		ambas en conjunto	
	constantes	$R^2_{ajuste}$	constantes	$R^2_{ajuste}$	constantes	$R^2_{ajuste}$
1	a = 0,5686; b = -0,0536	0,948	a = 0,4422; b = 0,0997	0,973	a = 0,4822; b = 0,0546	0,960
2	a = 0,24; b = 0,3284	0,962	a = 0,2771; b = 0,2679	0,982	a = 0,2648; b = 0,2866	0,973
3	a = 0,1595	0,961	a = 0,1576	0,978	a = 0,1583	0,970
4	a = 0,1055; b = 0,1775	0,962	a = 0,0851; b = 0,2442	0,982	a = 0,0915; b = 0,2231	0,973
5	a = 0,1721; b = 0,1153	0,962	a = 0,1418; b = 0,1869	0,982	a = 0,1514; b = 0,1638	0,973
6	a = 0,2331; b = 0,4875	0,962	a = 0,2867; b = 0,40	0,982	a = 0,2683; b = 0,4276	0,973
7	a = 0,5623; b = 0,0586; c = 1,62	0,962	a = 0,5692; b = 0,1157; c = 1,3041	0,982	a = 0,5598; b = 0,0644; c = 1,589	0,974
8	a = 0,5263; b = 0,0013; c = 5,1735	0,947	a = 0,5402; b = 0,0019; c = 4,7133	0,979	a = 0,5323; b = 0,0022; c = 4,8036	0,963
9	a = 0,3874	0,643	a = 0,3627	0,838	a = 0,3719	0,755
10	a = 0,2314; b = 0,1224; c = 0,80; d = 0,8195; e = 0,2125	0,975	a = 0,3218; b = 0,2141; c = 0,6024; d = 1,117; e = 0,1653	0,981	a = 0,3029; b = 0,1499; c = 0,6448; d = 1,049; e = 0,1538	0,976
11	a = 0,0161; b = 0,3499	0,961	a = 0,0127; b = 0,3864	0,982	a = 0,0137; b = 0,3749	0,973

Tabla 2: Valores de las constantes y  $R^2_{ajuste}$  para cada modelo estudiado obtenidos en San Miguel, Paraná y utilizando datos de ambas estaciones en conjunto.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en el estudio de validación realizado en Luján conjuntamente al coeficiente de determinación,  $R^2$ , al comparar valores medidos y estimados con los diferentes modelos.

Modelo	ajustados en								
	San Miguel			Paraná			ambas en conjunto		
	RMSE%	MBE%	R <sup>2</sup>	RMSE%	MBE%	R <sup>2</sup>	RMSE%	MBE%	R <sup>2</sup>
1	13,7	-3,7	0,866	11,1	2,4	0,887	11,4	1,2	0,884
2	9,1	4,0	0,941	9,3	2,9	0,933	9,2	3,2	0,936
3	10,1	7,1	0,955	9,3	5,8	0,955	9,6	6,3	0,955
4	9,1	4,2	0,943	9,2	3,0	0,935	9,1	3,3	0,937
5	9,2	3,8	0,939	9,3	2,8	0,932	9,2	3,0	0,935
6	9,1	3,9	0,940	9,3	2,8	0,932	9,2	3,1	0,935
7	10,1	2,0	0,917	9,9	1,9	0,919	10,1	1,7	0,915
8	12,3	-1,2	0,878	11,4	0,9	0,887	11,9	-0,2	0,880
9	19,5	16,7	0,817	18,0	14,2	0,798	18,6	15,2	0,805
10	9,4	-0,2	0,940	9,7	3,7	0,926	9,4	1,6	0,934
11	9,1	4,5	0,945	9,1	3,2	0,937	9,1	3,5	0,940

Tabla 3: Valores de RMSE%, MBE% y R<sup>2</sup> obtenidos en Luján al validar los distintos modelos ajustados en San Miguel, Paraná y utilizando datos de ambas estaciones en conjunto.

## CONCLUSIONES

Se estudiaron 11 diferentes tipos de modelos de estimación de la radiación solar global media mensual definidos respecto a la amplitud térmica diaria. Estos modelos se ajustaron en San Miguel y Paraná donde se cuenta con datos simultáneos de radiación global y temperatura de 30 años de extensión (1979/1980-2010). También se evaluó la posibilidad de ajustar los modelos estudiados empleando datos de ambas estaciones en conjunto. Como resultados del proceso de ajuste se puede observar lo siguiente:

- los modelos se pudieron ajustar con mejor precisión en Paraná, con RMSE% al comparar valores medidos con estimados que varían entre 4,3% y 10,5% con un valor medio de 5%. El valor más alto corresponde al modelo de Weiss et al. (2001), modelo 9 en nuestro trabajo.
- en San Miguel los RMSE% varían entre 5,8% y 16,3% con un valor medio de 7,7%. El valor más alto también corresponde al modelo de Weiss et al. (2001).
- al utilizar la base de datos de ambas estaciones los RMSE% varían entre 5,3% y 13,3% para el modelo de Weiss et al. (2001) con un valor medio de 6,3%.
- los mejores niveles de ajuste, con valores de RMSE% muy similares entre sí en cada caso estudiado, se obtuvieron con los modelos: 2 (Richardson, 1985), 3 (Hargreaves y Samani, 1982), 4 (Hargreaves et al., 1985), 5 (Chen et al., 2004), 6 (Thornton y Running, 1999), 7 (Bristow y Campbell, 1984), 10 (Mahmood y Hubbard, 2002) y con el modelo lineal o modelo 11. Para los modelos 1 (García, 1994) y 8 (Goodin et al., 1999) se obtienen RMSE% levemente superiores a los modelos antes mencionados.

Los distintos modelos fueron validados en la estación de Luján ubicada dentro de la misma región climática Templado Húmeda y a una distancia aproximada de 335 km de Paraná y de 40 km de San Miguel. Exceptuando los modelos de Weiss et al. (2001), García (1994) y Goodin et al. (1999) (modelos 9, 1 y 8), al comparar valores medidos para el periodo 2002-2010 con estimados se obtuvieron, en los tres casos de ajuste, valores medios de RMSE% y MBE% muy similares entre sí e iguales a 9,4% y 3,4% respectivamente. Estos resultados indican que, en nuestra región climática y hasta una distancia de 300 km, es posible mediante estos modelos estimar la radiación global media mensual con una precisión menor al 10%. Se observó a su vez que al estimar con los modelos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10 y 11 ajustados en Paraná, los desvíos aumentan en Luján en términos medios en un 5% y con estos mismos modelos ajustados en San Miguel, a una distancia menor de 40 km, en un 2,7% aproximadamente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean hacer presente su agradecimiento a las autoridades del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por haber facilitado la información utilizada en el presente trabajo.

## REFERENCIAS

- Bristow K.L. y Campbell G.S. (1984) On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric. For. Meteorol.* 31, 159-166.
- Chen R., Ersi K., Yang J., Lu S., Zhao W. (2004) Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Convers. Manage.* 45, 1759-1769.
- Evrendilek F. y Ertekin C. (2008) Assessing solar radiation models using multiple variables over Turkey. *Clim. Dyn.* 31, 131-149.

- García J.V. (1994) Principios físicos de la climatología, pp. 244. Ediciones UNALM (Universidad Nacional Agraria La Molina).
- Goodin D.G., Hutchinson J.M.S., Vanderlip R.L., Knapp M.C. (1999) Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data. *Agron. J.* 91, 845-851.
- Grossi Gallegos H. y Blázquez M. L. (1996) Estudio de variables meteorológicas en la estación San Miguel, Provincia de Buenos Aires. Informe de avance. En *Actas de la XIX Reunión de Trabajo de la ASADES*, tomo I, 04.1-04.4, Mar del Plata, Argentina.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2007) Análisis de las series de datos anuales en la estación Paraná-INTA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 11, 11.31-11.36 versión CD-ROM.
- Hargreaves G.H. y Samani Z.A. (1982) Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 108, 225-230.
- Hargreaves G.L., Hargreaves G.H., Riley P. (1985) Irrigation water requirement for the Senegal river basin. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 111, 265-275.
- Liu D.L. y Scott B.J. (2001) Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. *Agric. For. Meteorol.* 106, 41-59.
- Mahmood R. y Hubbard K.G. (2002) Effect of time of temperature observation and estimation of daily solar radiation for the Northern Great Plains, USA. *Agron. J.* 94, 723-733.
- Richardson C.W. (1895) Weather simulation for crop management models. *Trans. ASAE* 28, 1602-1606.
- Thornton P.E. y Running S.W. (1999) An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation. *Agric. For. Meteorol.* 93, 211-228.
- Weiss A., Hays C.J., Hu Q., Easterling W.E. (2001) Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop yield simulations. *Agron. J.* 93, 1321-1326.

## **EVALUATION OF DIFFERENT TEMPERATURE-BASED GLOBAL SOLAR RADIATION MODELS**

**ABSTRACT:** We analyzed 11 different models to estimate the solar radiation global monthly average data from ambient temperature. Models were adjusted in San Miguel and Parana where account with simultaneous data of global radiation and temperature of 30 years of extension. The different models were validated for the period 2002-2010 in the station of Luján located in the same Humid Temperate climatic region, obtaining for the majority relative roots mean square errors equal to 9.4%. These results indicate that, in our climatic region and up to a distance of 300 km, these models allow us to estimate the monthly mean global radiation values with an acceptable level of accuracy. At the same time it was observed that, when estimating in Luján with adjusted in Paraná models, the RMSE% values increase on average by 5% and with adjusted in San Miguel models, at a minor distance of 40 km, at 2.7% approx.

**Key words:** Solar radiation prediction models, temperature, Humid Temperate Region.