

MODELO PARAMETRIZADO DE YANG: ESTUDIO DE VALIDACIÓN

C. Raichijk

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 realizó un estudio de validación de los modelos de cielo claro e híbrido para todo tipo de cielo de Yang para valores diarios y diarios medios mensuales de radiación solar global respectivamente. Se contó para ello con datos simultáneos de radiación global y de distintos parámetros atmosféricos suministrados por las estaciones Ceilap-Bs.As. y Villa Ortúzar, ubicadas a menos de 2 km de distancia, para el periodo enero 2007- julio 2008. Se analizó a su vez la sensibilidad de valores diarios estimados de radiación global de cielo claro con respecto tanto al índice de turbidez β de Ångström como a la columna de agua precipitable, w . Al comparar valores diarios de cielo claro medidos con estimados se obtuvieron errores cuadráticos medios relativos, RMSE%, que varían entre 3,5% y 4,5% para distintos β medios, mostrando resultados compatibles con niveles de incerteza instrumental. Para valores diarios medios mensuales de radiación global para todo tipo de cielo se constataron RMSE% que varían entre 5,3% y 9,8%, indicando que el modelo híbrido de Yang, ajustado con información de distintas estaciones japonesas, puede presentarse como una alternativa válida para la estimación de la radiación global en nuestra región.

Palabras clave: Modelo parametrizado de Yang, validación, Buenos Aires.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de transmitancia bajo condiciones de cielo claro, tanto espectrales como de banda ancha o parametrizados, estiman la radiación solar incidente en la superficie terrestre evaluando los diferentes procesos de atenuación que sufre la radiación extraterrestre al atravesar la atmósfera. La mayoría de los modelos espectrales definen la irradiancia solar normal directa monocromática a nivel de superficie, $I_{n\lambda}$ ($W\ m^{-2}\ \mu m^{-1}$) en función de la extraterrestre, $I_{on\lambda}$ ($W\ m^{-2}\ \mu m^{-1}$), como

$$I_{n\lambda} = \varepsilon I_{on\lambda} \tau_{oz}(\lambda) \tau_w(\lambda) \tau_g(\lambda) \tau_r(\lambda) \tau_a(\lambda) \quad (1)$$

donde ε es la corrección a la distancia media Sol-Tierra, $\tau_{oz}(\lambda)$ la transmitancia espectral debida a la absorción de ozono, $\tau_w(\lambda)$ absorción de vapor de agua, $\tau_g(\lambda)$ absorción de gases permanentes, $\tau_r(\lambda)$ dispersión de Rayleigh y $\tau_a(\lambda)$ atenuación de aerosoles. Integrando en todo el espectro solar se puede expresar cada una de estas transmitancias como funciones de la aeromasa o trayectoria óptica, m , y de diferentes parámetros atmosféricos: presión atmosférica, columnas de ozono, dióxido de nitrógeno y agua precipitable (w , cm) y coeficientes adimensionales de turbidez β y exponente α de Ångström.

Yang et al. (2001) a partir del modelo espectral de cielo claro de Leckner (1978) obtienen las transmitancias parametrizadas para cada uno de los atenuantes atmosféricos. Luego en función de éstas definen las transmitancias medias para las componentes directa, $\overline{\tau_{b,clear}}$, y difusa, $\overline{\tau_{d,clear}}$, lo que les permite, integrando en diferentes periodos, estimar estas componentes y, a partir de estas, la radiación global de cielo claro, R_{clear} (J/m^2).

En Yang et al. (2006) con el objeto de estimar la radiación global para todo tipo de cielo, R (J/m^2), se define una transmitancia debida a la atenuación en nubes como

$$\tau_c = R / R_{clear} \quad (2)$$

donde τ_c se ajusta empíricamente como función de la heliofanía relativa. Este planteo ha sido denominado Modelo Híbrido de Yang.

En el trabajo de 2006 los autores, a diferencia del primer trabajo de 2001, redefinen la heliofanía relativa como el cociente entre las horas de brillo de sol o heliofanía efectiva, n , obtenidas en un heliógrafo tipo Campbell-Stokes y el número máximo posible de horas de sol registrables, N_c , estimado para un día de cielo claro en un determinado momento y lugar. De acuerdo a la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), N_c será la duración de tiempo en que la irradiancia normal directa, I_{bn} , supere un umbral de $120\ W/m^2$. En dicho trabajo a partir de datos simultáneos del año 1995 de temperatura, humedad relativa, heliofanía efectiva y radiación solar global disponibles en 67 estaciones de Japón (ubicadas a bajas alturas y en un clima de tipo húmedo) además de valores satelitales de columna de ozono y espesor óptico de aerosoles

para una longitud de onda $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, AOD_{500} , se ajustaron para integrales horarias, diarias y diarias medias mensuales las transmitancias de nubes, τ_c , como funciones polinómicas de segundo grado respecto a la heliofanía relativa.

El modelo híbrido ajustado en Japón fue validado en 7 estaciones de China, 7 de EE. UU. y 12 de Arabia Saudita ubicadas a diferentes alturas y en distintos climas utilizando datos de los años 1997-1998. Para valores diarios medios mensuales se obtuvo un RMSE% medio para todas las estaciones estudiadas de 5,3%. Tang et al. (2010) validaron este mismo modelo en 97 estaciones de China con datos correspondientes al periodo 1993-2000 obteniendo para el conjunto de estaciones un RMSE% de 14,2% con un desvío medio relativo, MBE%, de 4,7% para valores diarios y un RMSE% de 8,9% con un MBE% de 4,8% para valores diarios medios mensuales.

Salazar (2010) al validar el modelo híbrido de Yang propuesto en 2001, definido respecto al N astronómico, utilizando valores medios mensuales históricos de 10 estaciones de Argentina y correlaciones empíricas para ozono, agua precipitable y el coeficiente de turbidez β de Ångström obtiene valores de RMSE% que varían entre 3,6% y 15,5%.

El objetivo de este trabajo será validar tanto el modelo de cielo claro de Yang para valores diarios como el modelo híbrido para todo tipo de cielo (definido respecto a N_c) para valores diarios medios mensuales de radiación global. Para ello se utilizarán datos de radiación solar global y espesor óptico de aerosoles para $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ obtenidos en la estación Ceilap-Bs.As. perteneciente a la red AERONET y valores simultáneos de temperatura, humedad relativa y heliofanía efectiva suministrados por la estación Villa Ortúzar del SMN ubicada a menos de 2 km de la anterior. Se contará a su vez con datos diarios de columna de ozono publicados por el NASA/GSFC Ozone Processing Team (<http://toms.gsfc.nasa.gov>).

MODELO DE CIELO CLARO DE YANG

En el modelo parametrizado de cielo claro de Yang se definen las transmitancias medias para las componentes directa y difusa de la siguiente manera (Yang et al., 2006):

$$\overline{\tau_{b,clear}} \approx \max(0; \overline{\tau_{oz}} \overline{\tau_w} \overline{\tau_g} \overline{\tau_r} \overline{\tau_a} - 0,013) \quad (3)$$

$$\overline{\tau_{d,clear}} \approx \max\left\{0; 0,5 \left[\overline{\tau_{oz}} \overline{\tau_w} \overline{\tau_g} \left(1 - \overline{\tau_r} \overline{\tau_a}\right) + 0,013 \right]\right\} \quad (4)$$

siendo $\overline{\tau_{oz}}$, $\overline{\tau_w}$, $\overline{\tau_g}$, $\overline{\tau_r}$ y $\overline{\tau_a}$ las transmitancias para los diferentes atenuantes atmosféricos obtenidas al integrar en todo el espectro solar las expresiones espectrales propuestas por Leckner (1978).

Gueymard (2003a) destaca el modelo de Yang entre los cuatro mejores luego de analizar 21 modelos parametrizados de cielo claro. Cuando valida los diferentes modelos con datos de irradiación normal directa de alta calidad en 5 estaciones de EE. UU. (Gueymard, 2003b) obtiene para el modelo de Yang para todas las estaciones un RMSE% de 3,6% con un MBE% de 2,6%, observándose en todos los casos una sobrevaloración en la estimación. Madkour et al. (2006) obtienen valores muy similares en 3 localidades de Egipto.

Como señala Gueymard (2003b), la columna de agua precipitable y, en mayor medida, la turbidez son los parámetros de entrada que más influyen en la incerteza resultante de los valores estimados de irradiación normal directa. A su vez, ambos parámetros varían fuertemente a lo largo del día y día a día en el año. Teniendo en cuenta lo antes mencionado y que las integrales de radiación global que se evaluarán a continuación se estiman utilizando valores medios de β y w se realizó un estudio de sensibilidad de valores diarios estimados de radiación global de cielo claro respecto a β y w .

Yang et al. (2006) calculan la radiación global diaria de cielo claro sobre plano horizontal, H_c (MJ/m^2), como:

$$H_c = \varepsilon I_0 \int_{\Delta t} (\overline{\tau_{b,clear}} + \overline{\tau_{d,clear}}) \text{sen } h \, dt \quad (5)$$

donde $I_0 = 1367 \text{ W}/\text{m}^2$ es la constante solar, h la altura solar y Δt el intervalo de tiempo de integración.

En la Figura 1 se grafican valores diarios de radiación global de cielo claro estimados para el día juliano igual a 1 (1ro de enero) en la estación Ceilap-Bs.As. tanto en función de β con un valor medio observado en todo el periodo estudiado de $w = 2,4 \text{ cm}$, Figura 1a, como en función de w con un β medio igual a 0,04, Figura 1b. En ambos casos se tomó el valor medio observado de la columna de ozono igual a 0,281 cm.

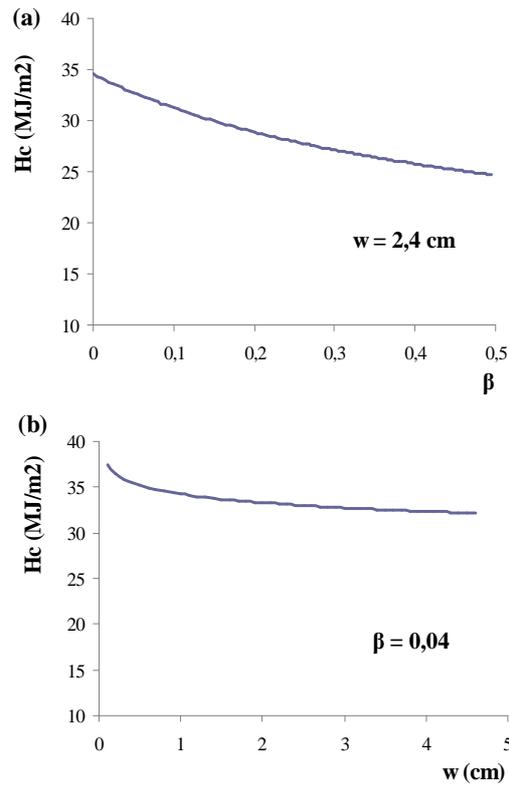


Figura 1: Valores diarios estimados de radiación global de cielo claro en función: (a) de β con un valor medio observado de $w = 2,4$ cm y (b) de w con un β medio de $0,04$.

A partir de las curvas que ajustan los valores graficados en la Figura 1, se determinó que la sensibilidad de los valores diarios estimados de H_c respecto a una variación o error de β , $\Delta H_c / \Delta \beta$, decrece cuando crece β . De la Figura 1a se obtuvo para un β mínimo observado de 0,01 que $\Delta H_c / \Delta \beta \approx 31,3$ MJ/m² mientras que para el máximo $\beta = 0,14$, $\Delta H_c / \Delta \beta \approx 24,5$ MJ/m². En cambio respecto a w , $\Delta H_c / \Delta w$, es mucho menor en términos absolutos, de la Figura 1b para un w mínimo de 0,9 cm se obtuvo un $\Delta H_c / \Delta w \approx 2$ MJ/m² y para el máximo $w = 4,5$ cm, $\Delta H_c / \Delta w \approx 0,9$ MJ/m².

ESTUDIO DE VALIDACIÓN

Valores diarios de radiación global de cielo claro

Para este estudio se utilizaron integrales diarias de radiación global sobre plano horizontal y medias diarias con sus respectivos desvíos estándares absolutos del espesor óptico de aerosoles para $\lambda = 0,5$ μ m, AOD₅₀₀, publicados por la estación Ceilap-Bs.As. (-34,57° S; -58,30° W; 10m) perteneciente a la red AERONET en <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> para el periodo enero 2007 - julio 2008. Los valores de AOD₅₀₀ empleados corresponden al nivel 2 de calidad garantizada de datos. Esta información se complementó con datos diarios simultáneos de temperatura y humedad relativa proporcionados por la estación Villa Ortúzar (-34,58° S; -58, 48° W; 25 m) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ubicada a menos de 2 km de distancia.

El coeficiente de turbidez β de Ångström se determinó a partir de AOD₅₀₀ empleando la expresión propuesta por Ångström (1961) para $\alpha = 1,3$:

$$\beta = 0,5^{1,3} \text{ AOD}_{500} \quad (6)$$

mientras que w se estimó mediante (Leckner, 1978):

$$w = 0,493 (\Phi_r / T) \exp (26,23 - 5416 / T) \quad (7)$$

con T, temperatura ambiente, en grados Kelvin y Φ_r , humedad relativa, en fracciones de uno.

Se seleccionaron datos correspondientes a días de cielo claro, con un $k_t > 0,7$, encontrándose 238 casos. Teniendo en cuenta la fuerte variabilidad de β a lo largo del día y su potencial influencia en los valores a estimar, dada la dependencia encontrada respecto a este parámetro, se compararon datos diarios medidos con valores calculados empleando el β diario medio, $\bar{\beta}$, así como $\bar{\beta} + \sigma$ y $\bar{\beta} - \sigma$, siendo σ el desvío estándar absoluto diario. De esta manera se considera el 67% de los casos observados de β durante cada día.

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

$$\text{RMSE\%} = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (H_{\text{est}} - H_{\text{obs}})^2 / n \right]^{0,5}}{\sum_{i=1}^n H_{\text{obs}} / n} 100\% \quad (8)$$

$$\text{MBE\%} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{\text{est}} - H_{\text{obs}})}{\sum_{i=1}^n H_{\text{obs}}} 100\% \quad (9)$$

siendo H_{obs} y H_{est} los valores de radiación observados y estimados respectivamente. También se consideró la pendiente k en la correlación $H_{\text{est}} = k H_{\text{obs}}$ y el coeficiente de determinación R^2 de la regresión asociada.

En la Tabla 1 se consignan los resultados obtenidos para valores diarios de radiación global de cielo claro y en la Figura 2 se grafican valores diarios de radiación global de cielo claro estimados con $\bar{\beta}$ vs. medidos.

Estimados con	RMSE%	MBE%	k	R ²
$\bar{\beta}$	3,9	1,9	1,041	0,982
$\bar{\beta} + \sigma$	3,5	1,0	1,032	0,981
$\bar{\beta} - \sigma$	4,5	2,8	1,051	0,982

Tabla 1: Resultados obtenidos al comparar datos diarios de radiación global de cielo claro con valores estimados con distintos β .

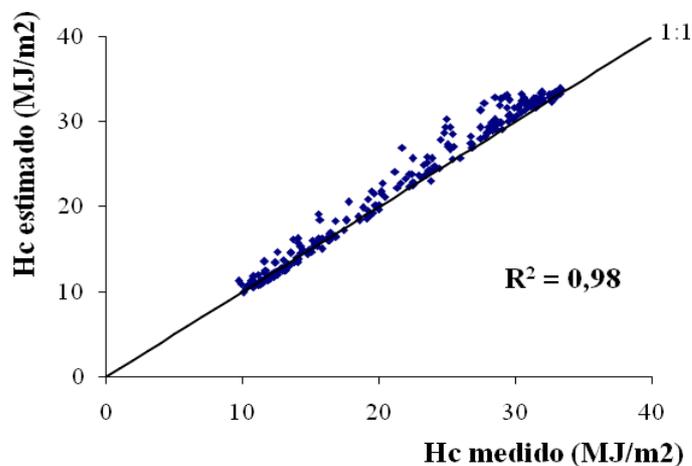


Figura 2: Valores diarios de radiación global de cielo claro estimados con $\bar{\beta}$ vs. medidos.

Por otro lado el número de mediciones realizadas de AOD₅₀₀ varía día a día, por lo tanto los valores diarios medios utilizados de β serán en distinta medida representativos de la presencia de aerosoles a lo largo del día. A modo de ejemplo de cómo la variabilidad diaria de β puede influir en el estudio de validación, se tomaron 2 días con un número de 30 o más mediciones realizadas pero con distintos desvíos estándares relativos, $\sigma\%$: el 27/11/2007 con 30 mediciones y alta variabilidad, $\sigma\% = 40\%$, y el 29/1/2007 con 42 mediciones y baja variabilidad, $\sigma\% = 7,3\%$. En la Figura 3 se representan los valores de β a lo largo de estos días junto a sus medias y en la Tabla 2 las variaciones porcentuales obtenidas entre los valores estimados y medidos de radiación global.

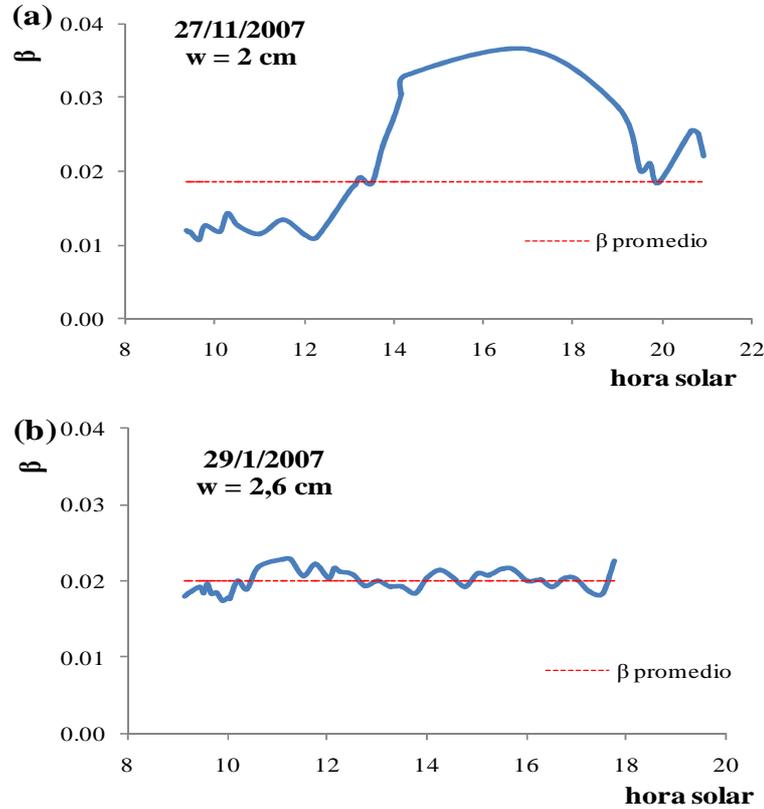


Figura 3: Evolución diaria de β para dos días con 30 o más mediciones: (a) 27/11/2007 con $\sigma\% = 40\%$ y (b) 29/1/2007 con $\sigma\% = 7,3\%$.

días analizados	w(cm)	nº de mediciones	$\sigma\%$	Variación% de H_c
(a) 27/11/2007	2	30	40	9,3
(b) 29/1/2007	2,6	42	7,3	2,7

Tabla 2: Comparación entre valores estimados y medidos de radiación global de cielo claro en 2 días con distintas variabilidades observadas de β .

Valores diarios medios mensuales de radiación global para todo tipo de cielo

En esta oportunidad se consideraron valores diarios medios mensuales de radiación global, \overline{H} , y valores medios mensuales de AOD₅₀₀ con sus respectivos desvíos estándares absolutos, de temperatura, humedad relativa y heliofanía efectiva. En el modelo híbrido de Yang se define la transmitancia de nubes, τ_c , para valores medios mensuales como función de la heliofanía relativa, $\overline{n}/\overline{N_c}$, de la siguiente manera (Yang et al., 2006):

$$\tau_c = 0,2777 + 0,8636 \overline{n}/\overline{N_c} - 0,1413 (\overline{n}/\overline{N_c})^2 \quad (10)$$

siendo \bar{N}_c , el número máximo posible de horas de sol registrables, calculado mediante el modelo de cielo claro para los días medios de cada mes.

A partir de (2) y (10) se estimaron los valores medios mensuales de radiación global utilizando, dada la fuerte variabilidad también observada durante cada mes, el β medio mensual, $\bar{\beta}$, así como $\bar{\beta} + \sigma$ y $\bar{\beta} - \sigma$, siendo σ el desvío estándar absoluto mensual. El número de casos analizados es de 19. En la Tabla 3 se consignan los resultados obtenidos para valores diarios medios mensuales de radiación global y en la Figura 4 se grafican valores estimados con $\bar{\beta}$ vs. medidos.

Estimados con	RMSE%	MBE%	k	R ²
$\bar{\beta}$	6,9	5,9	1,058	0,995
$\bar{\beta} + \sigma$	5,3	2,8	1,031	0,990
$\bar{\beta} - \sigma$	9,8	9,3	1,091	0,993

Tabla 3: Resultados obtenidos al comparar datos diarios medios mensuales de radiación global con valores estimados con distintos β .

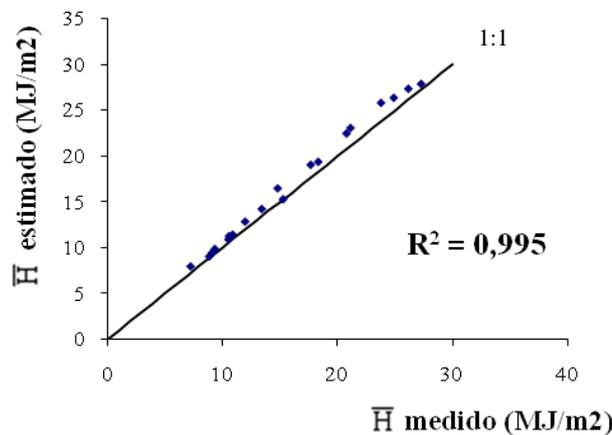


Figura 4: Valores diarios medios mensuales de radiación global estimados con $\bar{\beta}$ vs. medidos.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de validación de los modelos de cielo claro e híbrido para todo tipo de cielo de Yang para valores diarios y diarios medios mensuales de radiación global respectivamente. Se utilizó para ello datos de radiación global y espesor óptico de aerosoles AOD₅₀₀ publicados por la estación Ceilap-Bs.As., mediciones de temperatura, humedad relativa y heliofanía efectiva suministrado por la estación Villa Ortúzar, más datos de columna de ozono de origen satelital.

Teniendo en cuenta que tanto β como w son los parámetros de entrada de los modelos que más inciden en la incerteza de los valores estimados de irradiación normal directa de cielo claro se analizó la sensibilidad respecto de estos parámetros de valores diarios de radiación global de cielo claro estimados. Se comprobó que $\Delta H_c/\Delta\beta$ decrece cuando crece β y que $\Delta H_c/\Delta w$ es mucho menor en términos absolutos que la anterior en todo el intervalo de valores posibles de w . Como β varía fuertemente a lo largo del día y del año se compararon valores medidos de radiación global con estimados utilizando los valores medios de β así como $\beta+\sigma$ y $\beta-\sigma$, siendo σ los desvíos estándares absolutos correspondientes.

Al comparar valores diarios de radiación global de cielo claro se obtuvieron RMSE% que varían entre 3,5% y 4,5% con MBE% positivos, indicando siempre una sobrevaloración en la estimación, entre 1% y 2,8%. Estos valores son compatibles con el nivel de incerteza de medición, que para un sensor CM11 Kipp & Zonen empleado es de alrededor de 1-2%. Cabe destacar que el número de mediciones de AOD₅₀₀ realizadas varían día a día, lo que implica que los valores medios de β empleados están determinados con distinto peso estadístico. En este sentido se pudo constatar que, para días con distintas variabilidades de β , los RMSE% para valores estimados con el β medio pueden variar de 2,7% a 9,3% (ver Tabla 2).

Para valores diarios medios mensuales de radiación global para todo tipo de cielo se observan RMSE% que varían entre 5,3% y 9,8% con MBE% también positivos entre 2,8% y 9,3%. Estos resultados están indicando que el modelo híbrido de Yang, ajustado con datos de 67 estaciones de Japón, se presenta como una alternativa válida de estimación de la radiación solar global en una región como la nuestra, con características climáticas y topográficas similares a las presentes en las estaciones utilizadas en Japón. Niveles aceptables de precisión también obtuvieron Yang et al. (2006) y Tang et al. (2010) al validar el mismo modelo en distintas regiones climáticas del mundo, empleando incluso valores medios aproximados de β de origen satelital.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea hacer presente su agradecimiento a las autoridades del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de la estación Ceilap-Bs.As. por haber facilitado la información utilizada en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Ångström A. (1961) Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus* 13, 214-223.
- Gueymard C. (2003a) Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74, 355-379.
- Gueymard C. (2003b) Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high-quality measurements. *Solar Energy* 74, 381-395.
- Leckner B. (1978) The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface-Elements of a model. *Solar Energy* 20, 143-150.
- Madkour M.A., El-Metwally M., Hamed A.B. (2006) Comparative study on different models for estimation of direct normal irradiance (DNI) over Egypt atmosphere. *Renewable Energy* 31, 361-382.
- Salazar G. A. (2001) Aplicación del modelo híbrido de Yang a datos climatológicos medios mensuales de 10 localidades de Argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 25, 15-21.
- Tang W., Yang K., He J., Qin J. (2010) Quality control and estimation of global solar radiation in China. *Solar Energy* 84, 466-475.
- Yang K., Huang G.W., Tamai N. (2001) A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy* 70, 13-22.
- Yang K., Koike T., Ye B. (2006) Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. *Agricultural and Forest Meteorology* 137, 43-55.

YANG PARAMETERIZED MODEL: STUDY OF VALIDATION

ABSTRACT: A validation study of the Yang's clear sky and all skies hybrid models for daily and monthly mean daily values of solar global radiation respectively has been made. It was used simultaneous data supplied by the stations CEILAP-Bs. As. and Villa Ortúzar, located less than 2 km away, for the period January 2007 - July 2008. Discussed in turn the sensitivity of the estimated daily values under clear skies with respect to both the Ångström's turbidity coefficient, β , and to the precipitable water column, w . When comparing measured daily values under clear skies with estimated values was obtained RMSE% that ranging between 3.5% and 4.5% for different β means, showing results consistent with levels of instrumental uncertainty. For the monthly mean daily values of global radiation for all skies were found RMSE% between 5.3% and 9.8%, indicating that the Yang's hybrid model, adjusted from data of different Japanese stations, can be presented as a valid alternative to estimate global radiation in our region.

Key words: Yang parameterized model, validation, Buenos Aires.