

COMPARACIÓN DE VALORES DEL ÍNDICE DE TURBIDEZ β DE ÅNGSTRÖM MEDIDOS EN VALENCIA (ESPAÑA) CON LOS ESTIMADOS USANDO EL MODELO HÍBRIDO DE YANG CORREGIDO.

Germán Salazar¹, Anna Esteve², Pilar Utrillas², José Martínez-Lozano²

¹ Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta
Avda. Bolivia 5150 – A4408FVY – Salta Capital - Salta – Argentina.
e-mail: salazarg@unsa.edu.ar

² Grupo de Radiación Solar- Dpto. Física de la Tierra y Termodinámica
Facultad de Física - Universitat de Valencia
c/Dr. Moliner, 50 - 46100 - Burjassot – Valencia – España.

Recibido: 09-09-11; Aceptado: 30-9-11.

RESUMEN.- En este trabajo se han comparado valores medios mensuales de índice de turbidez $\bar{\beta}$ de Ångström medidos por AERONET en la ciudad de Valencia (España) con valores estimados a partir de la aplicación del Modelo Híbrido de Yang Corregido (MHYC) a datos de irradiación \bar{H} media mensual medidos en la misma localidad. Los resultados indican que el MHYC es un buen estimador de valores medios mensuales de irradiación global \bar{H} . Las diferencias entre los valores estimados y medidos de turbidez indican una fuerte dependencia del modelo con los valores de nubosidad considerados cuando se intenta calcular valores de turbidez a través del valor de la irradiación global eficaz media mensual.

Palabras claves: índice de turbidez, modelo híbrido de Yang, irradiación global, AERONET

COMPARISON OF ÅNGSTRÖM TURBIDITY INDEX VALUES MEASURED IN VALENCIA (SPAIN) WITH ESTIMATES USING THE CORRECTED YANG HYBRID MODEL.

ABSTRACT.- In this paper mean monthly Ångström turbidity index $\bar{\beta}$ values measured by AERONET in Valencia (Spain) are compared with estimated values obtained from the application of the Corrected Yang Hybrid Model (CYHM) to mean monthly irradiation data measured in the same city. The results indicate that the CYHM is a very good estimator of mean monthly global irradiation. The CHYM is also used to estimate turbidity index values correlating estimated and measured mean monthly global irradiation values. The difference between estimated and measured turbidity index values indicates a strong dependence of the model with the cloudiness values.

Keywords: turbidity index, Yang hybrid model, global irradiation, AERONET

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los aerosoles resulta de gran importancia debido al papel que juegan en la interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre lo que permite estudiar, entre otras cosas, el forzamiento radiativo y la evolución del clima global. Sin embargo, en el mundo son pocos y muy localizados los laboratorios o grupos de investigación que cuentan con dispositivos para medirlos, directa o indirectamente (fotómetros o espectro-radiómetros), debido principalmente al costo de estos equipos. Así, obtener valores medidos de concentración y tamaño de aerosoles no resulta sencillo debido a lo especializado del instrumental requerido.

Muchos países en vías de desarrollo cuentan con registros históricos de heliofanía (duración del brillo solar), medidos

por sus respectivos servicios meteorológicos u otras instituciones oficiales. Argentina cuenta con datos de heliofanía registrados desde fines del siglo XIX hasta la actualidad, aunque no de manera continua. La relación entre la heliofanía y la irradiación solar ha sido ampliamente estudiada siendo la relación lineal de Ångström-Prescott la más sencilla ya que relaciona la heliofanía relativa n/N , donde n es la cantidad de horas que el Sol efectivamente brilla y N es la cantidad astronómicamente posible de brillo, con el índice de claridad $K_t = H/H_0$, donde H es la irradiación solar global y H_0 es la irradiación solar extraterrestre. La expresión es

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{n}{N} \quad (1)$$

Esta relación resulta ser muy precisa en las estimaciones de H solo cuando se han determinado previamente, y para la localidad deseada, los valores de los coeficientes a y b, lo que implica que se deben disponer primero de datos de irradiación solar y heliofanía medidos simultáneamente. Dicho de otra manera, esta relación solo es útil para estimar H cuando se disponen de bases de datos de irradiación solar y de heliofanía para la localidad en estudio. Otro aspecto negativo es que los valores de los coeficientes a y b tienen un marcado carácter local (Martínez-Lozano et al., 1984) suelen ser útiles solo para el sitio para el que se han determinado. Así, la relación de Ångström-Prescott resulta ser de mucha utilidad cuando se desea reconstruir series temporales de irradiación a partir de datos de heliofanía, para un sitio en particular. Esta técnica en particular fue utilizada para ayudar en la confección del Atlas de Energía Solar de la República Argentina (Grossi Gallegos y Righini, 2007).

La turbidez atmosférica, es decir la presencia de aerosoles atmosféricos, es una de las principales causas de atenuación de la radiación solar que llega a la superficie, en condiciones de cielo claro o despejado: de forma que si la turbidez aumenta, la radiación solar disminuye y viceversa. El modelo híbrido de Yang (Yang et al, 2001, 2006) es un modelo apto para estimar el valor de la turbidez analizando datos medidos de radiación solar ya que básicamente es un modelo espectral de día claro (donde se considera la transmitancia de la atmosfera debida a ozono, vapor de agua, mezcla de gases, Rayleigh y aerosoles) al que se le aplican luego valores de heliofanía relativa para contemplar el efecto de la nubosidad sobre el valor estimado de irradiación. Sus bondades para la estimación de la irradiación directa, que es donde influye la turbidez, es tal que está considerado entre los 4 mejores modelos para estimar irradiación directa (Gueymard, 2003).

En un trabajo previo (Salazar, 2011) se realizó una corrección al modelo híbrido de Yang original para que los valores estimados de radiación difusa media mensual correlacionaran bien con los con valores medidos. Esto permitió realizar una estimación de los valores medios mensuales de turbidez en 10 sitios de Argentina, a partir de datos de irradiación global media mensual, pero estos valores estimados de turbidez no pudieron ser comparados con valores medidos.

En este trabajo se disponen de datos medidos de irradiación y de turbidez, simultáneamente y en el mismo sitio, por lo que esta comparación puede ser realizada.

Así, a partir de datos medidos de espesor óptico de aerosoles (AOD) en la estación AERONET (AERosol RObotic NETwork) (AERONET, 2011) de Burjassot (Valencia) y de datos de irradiancia solar global medidos en el mismo lugar durante el año 2010, se comparan los valores medios mensuales de irradiación global estimados, usando el Modelo Híbrido de Yang Corregido, con los valores medidos.

Luego se estiman los valores de turbidez que hacen que los valores de irradiación solar medidos y estimados coincidan perfectamente. Por fin se comparan los valores medidos y estimados del coeficiente de turbidez de Ångström, para la ciudad de Valencia durante el año 2011.

2. EL MODELO HIBRIDO DE YANG CORREGIDO (MHYC)

Para realizar la estimación de los valores medios mensuales del coeficiente β de Ångström se utilizó el Modelo Híbrido de Yang Corregido (MHYC) (Salazar, 2011), el que consta de dos etapas de cálculo. En la primera se estiman los valores medios mensuales de la irradiación global \bar{H} de día claro, para lo cual primero se calculan sus componentes directa \bar{H}_b y difusa \bar{H}_d . Es en estos cálculos donde se utiliza el valor del coeficiente β como variable. El Modelo Híbrido de Yang (Yang et al, 2001,2006) define a las componentes directa y difusa de la irradiación global como,

$$\text{Componente Directa: } H_b = \int I_0 \gamma \bar{\tau}_b \cos \theta_z dt \quad (2.a)$$

$$\text{Componente Difusa: } H_d = \int I_0 \gamma \bar{\tau}_d \cos \theta_z dt \quad (2.b)$$

$$\text{con} \quad \bar{\tau}_b \approx \bar{\tau}_{oz} \bar{\tau}_w \bar{\tau}_g \bar{\tau}_r \bar{\tau}_a - 0.013 \quad (3.a)$$

$$\bar{\tau}_d \approx \bar{\tau}_{oz} \bar{\tau}_w \bar{\tau}_g (1 - \bar{\tau}_r \bar{\tau}_a) - 0.013 \quad (3.b)$$

$$\text{y} \quad \gamma = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi(d-2)}{365} \right) \quad (4)$$

donde θ_z es el ángulo cenital, γ es la corrección de la distancia media Tierra-Sol, I_0 es la constante solar (1367 W/m²), d es el día juliano, $\bar{\tau}_b$ y $\bar{\tau}_d$ son las transmitancias directa y difusa, respectivamente, que a su vez son funciones de las transmitancias del ozono $\bar{\tau}_{oz}$, del vapor de agua $\bar{\tau}_w$, de la mezcla de gases $\bar{\tau}_g$, de Rayleigh $\bar{\tau}_r$ y de Mie $\bar{\tau}_a$. Para ver las expresiones de estos términos, el apéndice A al final del trabajo.

En la segunda etapa de cálculo se estimó el valor eficaz de la irradiación global media mensual \bar{H}_{ef} utilizando la expresión del MHYC

$$\bar{H}_{ef} = (0.391 + 0.518 \frac{\bar{n}}{\bar{N}}) \bar{H}_b + 0.222 \bar{H}_d + 0.1999 \bar{H}_d \quad (5)$$

donde \bar{n}/\bar{N} es la heliofanía relativa media mensual. El valor eficaz estimado de irradiación global \bar{H}_{ef} es el que se compara con los valores medidos.

Si bien los valores de H_b y H_d son valores diarios de acuerdo a como se calculan (ecuaciones 2.a y 2.b), el uso de valores medios mensuales para las variables de entrada del modelo brinda como resultado valores de irradiación de un día que representan a los de todo un mes (valores diarios medios mensuales).

Los valores de la heliofanía relativa media mensual \bar{n}/\bar{N} pueden obtenerse de dos fuentes: valores medidos de irradiancia solar global o heliógrafos. La OMM (OMM, 1982) estableció que el umbral de irradiancia para considerar Sol brillando es de 120 W/m². Fue necesario que la Organización estableciera un valor de referencia ya que los valores de irradiancia global que logran imprimir las bandas de los heliógrafos (tipo Campbell-Stokes, principalmente) puede oscilar entre 20 W/m² y 400 W/m² (Gueymard, 1993) según sea el tipo de banda, el clima, etc. Esta dispersión de valores hace necesario el realizar estudios

para determinar la representatividad de los valores de heliofanía registrados mediante heliógrafo (Roldan et al, 2005).

El exponente α de Ångström se consideró constante e igual a 1.3, de acuerdo a lo propuesto por Ångström, citado por Iqbal (1983). Este coeficiente suele tomar valores entre 0.5 y 2.5, siendo un indicador del tamaño relativo de los aerosoles. Suponer este valor constante introduce error en las estimaciones de turbidez, pero ayuda a eliminar un “grado-de-libertad-” en las ecuaciones involucradas.

3. APLICACIÓN DEL MODELO HIBRIDO CORREGIDO A DATOS DE VALENCIA.

Aplicamos el MHYC a datos de irradiancia solar global registrados en el Campus Burjassot de la Universitat de Valencia (España), situado a latitud +39.47°, longitud +0.38° y a 40 metros de altura s.n.m. En la clasificación climática de Köppen, Valencia tiene un clima tipo Csa (clima mediterráneo con verano cálido). Los datos utilizados en este trabajo fueron registrados durante el año 2010. El instrumento utilizado fue un piranómetro Kipp & Zonen CM6. En la Figura 1 se aprecia la evolución anual de los valores diarios medidos de irradiación solar global. En la misma figura se ha representado también la irradiación extraterrestre.

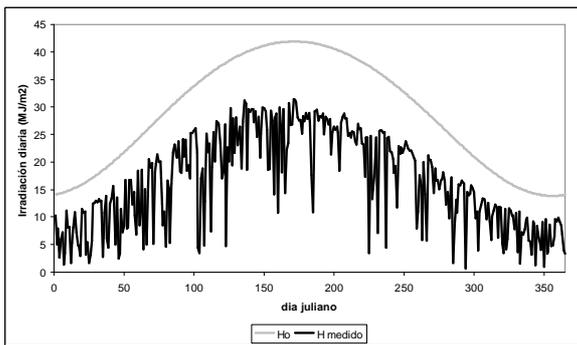


Fig. 1. Valores de irradiación solar global diaria H medidas en el Campus Burjassot (Valencia) durante el año 2010. Se ha graficado también el valor de la irradiación extraterrestre H₀.

Los valores de cantidad de vapor de agua precipitable w se tomaron de la base de datos AERONET, de la estación situada en dicha localidad. Los valores de heliofanía relativa media mensual se calcularon a partir de los datos de irradiancia global medidos.

Se realizó una primera estimación de valores de irradiación global media mensual, suponiendo el valor del coeficiente de turbidez constante e igual a un valor media anual, que se calcula utilizando la ecuación (Ångström, 1961)

$$\bar{\beta} = (0.025 + 0.1 \cos \varphi) e^{-0.7 \frac{A}{1000}} \quad (6)$$

donde φ es la latitud y A es la altura del sitio (en metros) respecto del nivel del mar. Para Valencia resulta ser $\bar{\beta} = 0.10$. Los resultados de la estimación utilizando para cada mes el mismo valor de $\bar{\beta}$ se aprecian en la Tabla I, donde se comparan los valores estimados con los medidos. En la Figura 2 se grafican estos datos.

Tabla I. Comparación de los valores medidos y los estimados de irradiación global media mensual, para el año 2010 en Valencia (España).

mes	\bar{H} medida (MJ/m ²)	\bar{H}/\bar{H}_0	\bar{n}/\bar{N}	\bar{H} estimada (MJ/m ²)	Error %
Ene-10	7.13	0.46	0.41	6.77	5.05
Feb-10	10.54	0.5	0.54	10.63	-0.85
Mar-10	15.45	0.55	0.61	15.73	-1.81
Abr-10	19.73	0.57	0.66	20.50	-3.90
May-10	25.26	0.64	0.71	24.33	3.68
Jun-10	25.46	0.61	0.70	25.25	0.82
Jul-10	25.97	0.64	0.73	24.73	4.77
Ago-10	21.28	0.57	0.67	21.59	-1.46
Sep-10	18.25	0.58	0.68	17.94	1.70
Oct-10	13.14	0.54	0.62	12.93	1.60
Nov-10	9.33	0.53	0.54	8.46	9.32
Dic-10	6.59	0.46	0.43	6.18	6.22

Los valores estimados se calcularos usando el modelo híbrido de Yang corregido usando el valor medio anual del coeficiente de turbidez. Se muestra el error porcentual entre cada valor medido y estimado.

El Error Cuadrático Medio es de 0.61 MJ/m², equivalente al 3.7% de diferencia entre las serie de datos medidas y estimadas. Este error es pequeño e indica que el valor considerado de turbidez medio mensual esta próximo al verdadero salvo en los meses de enero, julio, noviembre y diciembre, donde la diferencia porcentual de los valores de irradiación global medida y estimada es mayor al 5%.

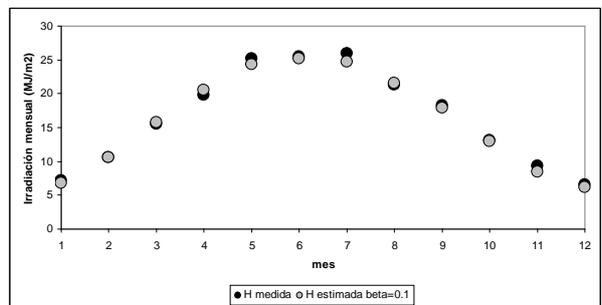


Fig. 2. Comparación de los valores de irradiancia global medidos y estimados con el MHYC, para la ciudad de Valencia, en el año 2010. El valor medio anual considerado para el coeficiente de turbidez $\bar{\beta}$, en el caso de las estimaciones de irradiación global, fue de 0.10.

4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES MEDIOS MENSUALES DEL ÍNDICE DE TURBIDEZ B.

Siguiendo este razonamiento, se puede pensar en estimar los valores medios mensuales del índice de turbidez $\bar{\beta}$ de Ångström a partir de los datos de radiación solar medidos. Para ello se realiza una correlación entre los valores medios mensuales de irradiancia global, estimados a través de $\bar{\beta}$, y los valores medidos. Dado que los valores de la otras variables (cantidad de agua precipitable w, insolación \bar{n}/\bar{N}) han sido medidos y no estimados, el error en el ajuste

depende solo del valor de $\bar{\beta}$ y del valor estimado del ozono, el que se supondrá igual al valor l del anexo A.

En la Tabla II se comparan los valores mensuales de $\bar{\beta}$ medidos por AERONET con los valores medios mensuales de $\bar{\beta}$ que hacen coincidir los valores de irradiación global estimados y medidos.

Tabla II. Comparación entre los valores estimados y medidos del coeficiente de turbidez $\bar{\beta}$ de Angstrom, que hacen coincidir los valores medios mensuales de irradiación global mensual medidos con los estimados usando el MHYC.

	β MHYC	β AERONET	$\beta_{MHYC} - \beta_{AERONET}$
Enc	0.08	0.04	0.04
Feb	0.09	0.04	0.05
Mar	0.11	0.12	-0.01
Abr	0.12	0.13	-0.01
May	0.08	0.06	0.02
Jun	0.10	0.09	0.01
Jul	0.07	0.10	-0.03
Ago	0.11	0.10	0.01
Sep	0.09	0.06	0.03
Oct	0.09	0.07	0.02
Nov	0.06	0.02	0.04
Dic	0.08	0.05	0.03
Promedio	0.09	0.07	-0.02
Desv. Estandar	0.02	0.03	

En la Figura 3 se aprecian diferencias importantes en los meses de enero, febrero, julio, septiembre, noviembre y diciembre.

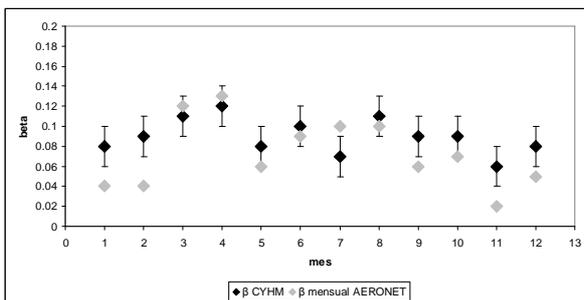


Fig. 3. Comparación de los valores medidos y estimados del coeficiente de turbidez de Ångström, para la ciudad de Valencia durante el año 2010. Se han agregado barra de error absoluto promedio.

Debe destacarse que los datos extraídos de AERONET para este trabajo corresponden al nivel de filtrado 1.5 (nivel medio) lo que indica que se han filtrado los efectos de nubosidad pero no han pasado el control de calidad final (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Los valores medios mensuales de turbidez estimados presentan diferencias significativas con los medidos en aquellos meses donde la nubosidad es grande, es decir, donde la heliofanía media mensual es menor. Queda en evidencia la influencia que tiene la nubosidad (representada en la heliofanía) en el modelo cuando se intenta determinar la turbidez ajustando el valor de la irradiación global. Esto explica que exista una tendencia a que la diferencia entre los valores de β estimados y medidos sea positiva en los meses de invierno boreal y negativa en los meses de verano boreal, cuando se ajustan los valores de irradiación global estimados con los medidos.

El valor promedio de los coeficientes medios mensuales estimados resulta ser de 0.09, estando este valor muy próximo al valor medio anual de 0.10, estimado usando la ecuación 6. Los valores medios mensuales medidos por AERONET para el coeficiente de turbidez resultan ser menores a esta estimación, situándose en 0.07. El considerar el valor del coeficiente α como constante, los valores estimados de \bar{n}/\bar{N} , el valor estimado del ozono y la expresión del modelo en si (el valor de los coeficientes) son también fuente de error en los valores estimados de β .

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han estimado los valores medios mensuales de irradiación global \bar{H} para la ciudad de Valencia (España) mediante el Modelo Híbrido de Yang Corregido (MHYC). La utilización del valor medio anual estimado del coeficiente de turbidez $\bar{\beta}$ de Ångström permitió estimar la irradiación global media mensual \bar{H} con un error del 3.7% respecto de los valores medidos.

También se utilizó el MHYC como herramienta para estimar el valor medio mensual del coeficiente de turbidez $\bar{\beta}$, proporcionando valores cuyo error promedio es 31.4%. Aunque este es un valor que podemos considerar elevado, si tenemos en cuenta que el valor promedio de la diferencia entre los valores medios mensuales estimados y medidos es 0.02 y que la precisión de los fotómetros CIMEL esta comprendida entre 0.01 y 0.02 para el coeficiente β , puede concluirse que el método puede servir para brindar una primera aproximación de los valores de turbidez de un sitio del que se dispongan de valores de radiación global, temperatura, humedad relativa y heliofanía.

APÉNDICE

$$\bar{\tau}_{oz} = \exp(-\ln \bar{k}_{oz}) \quad (A1)$$

$$\bar{k}_{oz} = 0.0365(\text{ml})^{-0.2864} \quad (A2)$$

$$\bar{\tau}_w = \exp(-\bar{c}_w) \quad (A3)$$

$$\bar{c}_w = -\ln[0.909 - 0.036 \ln(\text{mw})] \quad (A4)$$

$$\bar{\tau}_g = \exp(-\bar{c}_g) \quad (A5)$$

$$\bar{c}_g = 0.0117 \text{m}^{0.3139} \quad (A6)$$

$$\bar{\tau}_r = \exp(-0.008735 \text{m} \bar{\lambda}_r^{-4.08} P/P_0) \quad (A7)$$

$$\bar{\lambda}_r = 0.547 + 0.014(\text{mP}/P_0) - 0.00038(\text{mP}/P_0)^2 + 4.6 \times 10^{-6}(\text{mP}/P_0)^3 \quad (A8)$$

$$\bar{\tau}_a = \exp(-\beta \text{m} \bar{\lambda}_a^{-1.3}) \quad (A9)$$

$$\bar{\lambda}_a = 0.6777 + 0.1464(\text{m}\bar{\beta}) - 0.00626(\text{m}\bar{\beta})^2 \quad (A10)$$

$$l = 0.44 - 0.16 \sqrt{\left(\frac{\phi - 80}{60}\right)^2 + \left(\frac{y - 120}{263 - \phi}\right)^2} \text{ con } y = d \text{ si } d < 300, y = d - 366 \text{ si } d > 300 \quad (\text{A11})$$

$$w = 0.00493HR.T^{-1} \cdot \exp(26.23 - 5416T^{-1}) \quad (\text{A12})$$

Donde,

l = espesor capa de ozono (cm.)

ϕ = latitud (°)

w = cantidad de agua precipitable (cm.)

T = temperatura (K)

HR = humedad relativa (%)

m = masa de aire relativa sin corrección por presión atmosférica.

P = presión atmosférica del sitio (hPa)

P_0 = Presión atmosférica a nivel del mar (hPa)

REFERENCIAS

AERONET, 2011. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (acceso Mayo de 2011)

Ångström, A. 1961. Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus* 13, 214–223.

Grossi Gallegos H, Righini C., 2007. Atlas de Energía Solar de la Republica Argentina. Ed. Universidad de Lujan y SECYT.

Gueymard C. 1993. Analysis of monthly average solar radiation and bright sunshine for different thresholds at Cape Canaveral, Florida. *Solar Energy* 51, 139-145.

Gueymard, C., 2003. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74, 355-379.

Klein S. A. 1977. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 19, 325-319.

Martínez-Lozano J.A., Tena F., Onrubia J., de la Rubia J., 1984. The historical evolution of the Angstrom formula and its modifications: review and bibliography. *Agricultural and Forest Meteorology* 33, 109-128.

O.M.M. 1982. Informe Final Abreviado de la Octava Reunión de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación, OMM – N° 590, Anexo II. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza.

Roldán A., Righini R., Grossi Gallegos H., 2005. Análisis preliminar del comportamiento de fajas de heliógrafos utilizadas en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 9, 11.09-11.13

Salazar G. A., 2011. Estimation of monthly values of atmospheric turbidity using measured values of global irradiation and estimated values from CSR and Yang hybrid models. Study case: Argentina. *Atmospheric Environment* 45, 2465-2472

Yang K., Huang G. W., Tamai N., 2001. A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy* 70, 1, 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.