

# ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE TURBIDEZ DE ÅNGSTRÖM MEDIANTE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA EN EL MES DE JULIO PARA SANTA FE, ARGENTINA

Luis L. Altamirano<sup>1</sup>, Enrique D. Albizzati<sup>1</sup>, Orlando M. Alfano<sup>2</sup>

1 Fac. de Ingeniería Química (UNLitoral) - Stgo. del Estero 2654 - 3000 - Santa Fe - Argentina - Fax (042)553727  
Email : (albizzati@fiqus.unl.edu.ar)

2 INTEC (CONICET-UNLitoral) - Güemes 3450 - 3000 - Santa Fe - Argentina - Fax (042) 550944

## RESUMEN

A partir de mediciones de la radiación solar global y difusa en todo el espectro y en el plano horizontal, se obtienen valores de la radiación solar directa para la ciudad de Santa Fe, en días de cielo sin nubes del mes de Julio de 1996. Luego, empleando la radiación solar directa, un modelo teórico y un método de estimación de parámetros, se procede a calcular el valor promedio del coeficiente de turbidez atmosférica utilizado en la fórmula de Ångström para este periodo. Se encuentra un valor bajo de dicho coeficiente, en concordancia con las condiciones ambientales de cielo muy claro predominantes durante la realización de las determinaciones experimentales.

## INTRODUCCIÓN

Antes de incidir sobre la superficie terrestre, la radiación solar sufre variaciones debido a la dispersión y absorción provocada por las moléculas de aire, polvo, gotas de agua, ozono, dióxido de carbono, vapor de agua y otros gases presentes en la atmósfera que rodea al planeta. El polvo y las gotas de agua en suspensión, denominadas comúnmente aerosoles, a la vez dispersan y absorben la radiación solar en forma diferente a lo largo del espectro solar.

En particular, para cuantificar el efecto de la presencia de aerosoles en la atmósfera sobre la calidad y cantidad de la radiación solar incidente en la superficie terrestre, se puede utilizar la expresión propuesta por Ångström (Iqbal, 1983):

$$\tau_{\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

En la ecuación (1)  $\tau_{\lambda}$  es la turbidez atmosférica a una dada longitud de onda,  $\beta$  es el coeficiente de turbidez,  $\alpha$  es el coeficiente de distribución y  $\lambda$  la longitud de onda de la radiación solar. El coeficiente de turbidez de Ångström ( $\beta$ ) depende de la cantidad de aerosoles presentes y sus valores típicos según Cañada et al. (1993) varían entre 0 (atmósfera libre de aerosoles) y 0.5 (atmósfera muy turbia). El coeficiente  $\alpha$  es función del tamaño de las partículas de aerosol y su valor promedio recomendado para todo el espectro solar por Iqbal (1983) es 1.3. Los valores de  $\alpha$  máximo y mínimo típicos son 0.8 y 1.8, respectivamente (Leckner, 1978; Gueymard, 1987), decreciendo a medida que aumenta el tamaño de las partículas en suspensión en la atmósfera.

Para estudiar la turbidez en la atmósfera, además del coeficiente de Ångström pueden utilizarse otros coeficientes tal como el factor de turbidez de Linke (Grenier, 1994; Kasten, 1996), pero todos los métodos están basados en el conocimiento de valores de la radiación solar directa incidente sobre la superficie terrestre (Cañada et al., 1993; Fox, 1994; Louche et al., 1987; Pinazo et al., 1995)

En este trabajo se presentan mediciones de la radiación solar difusa y radiación solar global en todo el espectro (radiación solar difusa total y radiación solar global total), realizadas en la ciudad de Santa Fe durante el mes de Julio de 1996, sobre el plano horizontal, en condiciones de cielo muy claro y sin nubosidad. A partir de las determinaciones experimentales se calcula la radiación solar directa en función del ángulo cenital y luego se estima el coeficiente de turbidez atmosférica promedio para los días en los cuales se efectuaron las mediciones antes citadas.

En el cálculo del coeficiente  $\beta$  se emplean el modelo teórico de Bird y Riordan (1986), el conjunto de datos de la radiación solar directa horizontal y un método de estimación de parámetros adaptado para el caso analizado. Este método permite estimar los parámetros de un sistema no lineal a partir de la resolución de un problema de optimización, hallando el mínimo de una función objetivo previamente definida.

## MEDICIONES DE LA RADIACIÓN SOLAR

Las mediciones de la radiación solar global horizontal en todo el espectro se realizaron con un piranómetro Eppley, modelo Black & White, previamente calibrado con un instrumento similar marca Kipp & Zonen, modelo CM11; este instrumento según lo que indica el correspondiente certificado fue calibrado por la empresa que lo fabrica el 14 de Febrero de 1994. Para efectuar las mediciones de la radiación solar difusa horizontal se utilizó el piranómetro Kipp & Zonen junto con una banda sombreadora provista por el fabricante (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 que oscilan entre 1.06 y 1.07 en el periodo de medición.

Las experiencias se realizaron bajo condiciones atmosféricas de cielo muy claro, relativamente baja humedad y temperaturas moderadas. El valor promedio de la humedad relativa ambiente fue 48% y la temperatura media fue 17 °C. Ambas variables se midieron simultáneamente con la radiación solar, empleando un termohigrómetro portátil Hanna, modelo HI 8564.

En la Figura 1 se muestra la radiación solar global y difusa, en todo el espectro, en función del ángulo cenital ( $\theta_z$ ). Las determinaciones se efectuaron desde el mediodía solar hasta la puesta del sol, abarcando aproximadamente el rango de ángulos cenitales  $50^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$ . El valor máximo de la radiación solar global es  $642 \text{ W/m}^2$ , y el correspondiente valor de la radiación solar difusa es  $75 \text{ W/m}^2$ . Estas mediciones se verifican para el ángulo cenital mínimo ( $\theta_z = 50.3^\circ$ ), observándose que la relación entre la radiación solar difusa y la radiación solar global es igual a 0.117.

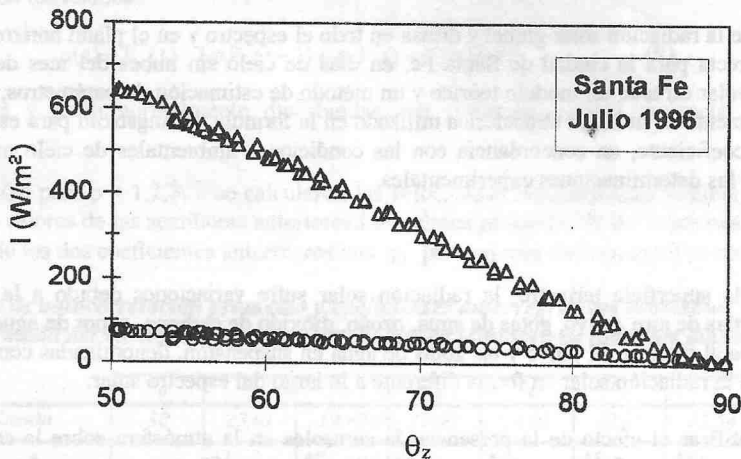


Figura 1: Medición de la radiación solar en el mes de Julio, Santa Fe. Radiación solar global ( $\Delta$ ) y difusa ( $\circ$ ).

A medida que crece el ángulo cenital la radiación solar global disminuye en forma pronunciada, mientras que el valor de la radiación solar difusa decrece suavemente desde el ángulo cenital mínimo hasta el ángulo cenital máximo. Por ejemplo para  $\theta_z = 64.9^\circ$  la radiación solar global medida es  $418 \text{ W/m}^2$  y la relación entre la radiación solar difusa y global es 0.125, pero cuando el ángulo cenital es  $80.2^\circ$  la relación es 0.256, y el valor de la radiación solar global cae a  $125 \text{ W/m}^2$ .

Los altos valores de la radiación solar global y los bajos valores de la radiación solar difusa, se justifican dadas las condiciones ambientales en los días y horarios en que se efectuaron las determinaciones experimentales. Estas condiciones fueron: cielo limpio y sin nubes, relativamente baja humedad ambiental, temperaturas moderadas durante las mediciones, bajas temperaturas mínimas diarias y algunos días con heladas matinales.

### ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE TURBIDEZ

Para encontrar el coeficiente de turbidez de Ångström se emplean los valores de la radiación solar directa calculados a partir de los respectivos valores medidos de la radiación solar global y la radiación solar difusa. Se estima que el error cometido en el cálculo de la radiación solar directa se halla entre un 5% y 10%, considerando las observaciones realizadas por Iqbal (1983), en relación con el factor de corrección de la radiación solar difusa medida cuando se utiliza un piranómetro con una banda sombreadora, y la calibración del piranómetro empleado para la medición de la radiación solar global.

Además se aplica un modelo teórico para cuantificar la radiación solar directa incidente (Bird y Riordan, 1986), y un método numérico de estimación de parámetros para sistemas no lineales. El método numérico utilizado resuelve un problema de optimización, hallando el mínimo de la función objetivo ( $\phi$ ) definida por:

$$\phi = \sum_{i=1}^N (I_{D,i} - I_{D,i}^*)^2 \quad (2)$$

donde  $I_{D,i}$  es la radiación solar directa obtenida con el modelo teórico,  $I_{D,i}^*$  es la radiación solar directa determinada en forma experimental, y  $N$  es el número de mediciones consideradas. El valor del coeficiente  $\beta$  estimado se corresponde con el valor mínimo de la función objetivo definida.

En el modelo teórico de Bird y Riordan (1986), la radiación solar directa se calcula a partir de la integración en todas las longitudes de onda del espectro solar, de la expresión formulada para una banda del espectro:

$$I_{D,\lambda} = H_{o,\lambda} D T_{r,\lambda} T_{a,\lambda} T_{w,\lambda} T_{o,\lambda} T_{u,\lambda} \cos \theta_z \quad (3)$$

donde se han utilizado la irradiación extraterrestre ( $H_{o,\lambda}$ ), el factor de corrección por distancia sol-tierra ( $D$ ) y distintas funciones de transmitancia de la atmósfera. Estas transmitancias incluyen los fenómenos siguientes: "scattering" Rayleigh ( $T_{r,\lambda}$ ), "scattering" y absorción de aerosol ( $T_{a,\lambda}$ ), absorción del ozono ( $T_{o,\lambda}$ ), absorción del vapor de agua ( $T_{w,\lambda}$ ) y absorción de otros gases presentes en la atmósfera ( $T_{u,\lambda}$ ).

Para la resolución del modelo teórico se fijó un día característico del mes (17 de julio) donde la radiación solar extraterrestre corresponde al promedio diario del mes considerado y una presión  $P = 1012$  mb. Se calculó el valor del vapor de agua precipitable en la atmósfera ( $w = 1.54$  cm) con el método Leckner (1978), usando los valores promedio medidos de la temperatura ambiente y de la humedad relativa.

En base a la fórmula de Bird y Riordan (1986) para estimar el albedo de "scattering" simple ( $\omega$ ) y los valores promedio propuestos por Gueymard (1989), se han adoptado:  $\omega_{0.4} = 0.94$  y  $\omega' = 0.095$ . Además, se ha utilizado un valor de factor de asimetría de aerosol ( $\langle \cos \theta \rangle$ ) igual a 0.65 (Bird y Riordan, 1986).

Los parámetros utilizados para predecir el espesor de la capa de ozono en función de la latitud del lugar, el mes y el año, han sido extraídos del trabajo de Piacentini (1992). El espesor de la capa de ozono es de 288 DU (unidades Dobson) en la fecha indicada.

El valor del exponente de la longitud de onda correspondiente a la fórmula de Ångström ( $\alpha = 1.3$ ) se adoptó en función del criterio propuesto por Iqbal (1983). Los parámetros utilizados para el modelo teórico y los resultados del método de estimación de parámetros se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del modelo y resultados del método de estimación de parámetros.

Mes	P (mb)	w (cm)	$\omega_{0.4}$	$\omega'$	$\langle \cos \theta \rangle$	O <sub>3</sub> (DU)	$\alpha$	$\tau_{0.5}$	$\beta$
Julio	1012	1.54	0.94	0.095	0.65	288	1.3	0.0461	0.0187

Se observa que el valor de la turbidez atmosférica para la longitud de onda  $0.5 \mu\text{m}$  es  $\tau_{0.5} = 0.0461$  y el coeficiente de turbidez de Ångström correspondiente es  $\beta = 0.0187$ . El valor estimado de  $\beta$  es relativamente bajo, lo que indica cielo limpio y baja concentración de partículas de aerosoles en la atmósfera.

Este resultado concuerda con el obtenido en otros trabajos en condiciones semejantes. Cañada et al. (1993) y Louche et al. (1987) han verificado que el valor del coeficiente  $\beta$  es menor en invierno que en otras estaciones del año. Esta disminución está relacionada con el bajo valor de vapor de agua precipitable ( $w$ ), que indica una menor tendencia a la formación y crecimiento de gotas de agua en la atmósfera, y por lo tanto menor turbidez.

En la Figura 2 se reproducen los valores de la radiación solar directa obtenidos de las mediciones y los resultados del modelo teórico con el valor de  $\beta$  antes estimado. Se verifica un buen acuerdo entre las predicciones del modelo teórico y los datos experimentales en el periodo investigado, lo que demuestra la validez del método numérico propuesto en este trabajo.

Se observa en la figura que el valor máximo teórico de la radiación solar directa es  $584 \text{ W/m}^2$  para  $\theta_z = 50^\circ$ , disminuyendo rápidamente a  $345 \text{ W/m}^2$  si  $\theta_z = 65^\circ$  y hasta  $101 \text{ W/m}^2$ , cuando  $\theta_z = 80^\circ$ .

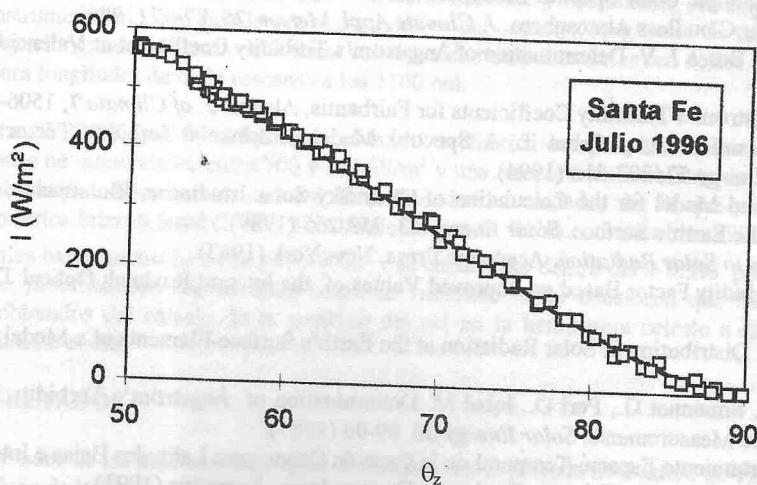


Figura 2: Radiación solar directa en el mes de Julio, Santa Fe. Experimental ( $\square$ ) y modelo teórico ajustado (—).

Finalmente en la Figura 3 se representan los valores de radiación solar global y la radiación solar difusa medidas y calculadas teóricamente con  $\beta = 0.0187$ , observándose también un buen acuerdo entre ambos resultados.

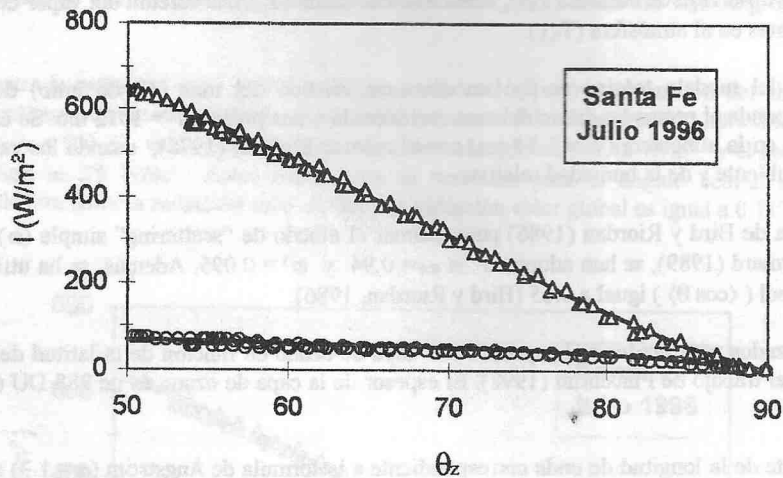


Figura 3: Radiación solar en el mes de Julio, Santa Fe. Radiación solar global ( $\Delta$ ) y difusa (O). Modelo ajustado (—).

## CONCLUSIONES

En las determinaciones experimentales se obtuvieron altos valores de la radiación global y bajos valores de la radiación solar difusa en el rango de ángulos cenitales abarcado:  $50^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$ .

El coeficiente de turbidez estimado es relativamente pequeño, lo que está de acuerdo con las condiciones ambientales en el momento que se efectuaron las mediciones. El valor de  $\beta$  fue hallado utilizando los datos registrados en condiciones de día límpido y sin nubes, relativamente baja humedad ambiental, temperaturas moderadas durante las mediciones, bajas temperaturas mínimas diarias y algunos días con heladas matinales; desde el mediodía hasta el atardecer.

Se ha comprobado la tendencia observada por otros autores, que indica que el valor de  $\beta$  en invierno es inferior al de otras estaciones del año, lo que está relacionado con un bajo valor del vapor de agua precipitable en la atmósfera terrestre.

Se obtiene buen acuerdo entre las predicciones de radiación solar global y difusa del modelo teórico de Bird y Riordan (1986) utilizando el coeficiente de turbidez  $\beta$  estimado y los datos experimentales de dichas radiaciones (global y difusa) en el periodo investigado (en el rango de ángulos cenitales  $50^\circ$ -  $90^\circ$ ).

**Agradecimientos:** Los autores agradecen la colaboración del CONICET y de la Universidad Nacional del Litoral (C.A.I.+D. 93-94 Proyecto N°174) y de la Cátedra de Instrumentación y Control de Procesos de la Facultad de Ingeniería Química (UNL), por su contribución al presente trabajo de investigación

## REFERENCIAS

- Bird R. E. y Riordan C. Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmosphere. *J. Climate Appl. Meteor.* **25**, 87-97 (1986)
- Cañada J., Pinazo J. M. y Bosca J. V. Determination of Ångström's Turbidity Coefficient at Valencia. *Renewable Energy* **3**, 621-626 (1993).
- Fox J. D. Calculated Ångström's Turbidity Coefficients for Fairbanks, Alaska. *J. of Climate* **7**, 1506-1512 (1994).
- Grenier J.C., De La Casinière A. y Cabot T. A Spectral Model of Linke's Turbidity Factor and Its Experimental Implications. *Solar Energy* **52**, 303-313 (1994).
- Gueymard C. A Two-Band Model for the Calculation of Clear Sky Solar Irradiance, Illuminance, and Photosynthetically Active Radiation at the Earth's Surface. *Solar Energy* **43**, 253-265 (1989).
- Iqbal M. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, New York (1983).
- Kasten F. The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness. *Solar Energy* **56**, 239-244 (1996).
- Leckner B. The Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth's Surface-Elements of a Model. *Solar Energy* **20**, 143-150 (1978).
- Louche A., Maurel M., Simonnot G., Peri O., Iqbal M. Determination of Ångström's Turbidity Coefficient from Direct Total Solar Irradiance Measurements. *Solar Energy* **38**, 89-96 (1987).
- Piacentini R. D. 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 (1992).
- Pinazo J. M., Cañada J. y Bosca J. V. A New Method to Determinate Ångström's Turbidity Coefficient: its Applications for Valencia. *Solar Energy* **54**, 219-226 (1995).