

# ANÁLISIS DE LA TURBIDEZ ATMOSFÉRICA EN SALTA (ARGENTINA) DURANTE INCENDIOS OCURRIDOS EN LA ESTACIÓN SECA DE 2013.

**Germán Ariel Salazar** – salazarg@unsa.edu.ar, german.salazar@uv.es

Universidad Nacional de Salta (Argentina), Departamento de Física

**José Luis Gómez-Amo** – e-mail jose.l.gomez-amo@uv.es

ENEA, (Italy), Laboratory for Earth Observations and Analyses

Universitat de Valencia (España), Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica

**Resumen.** En este trabajo se analizan los valores estimados del coeficiente  $\beta$  de Ångström a partir de mediciones de irradiancia solar directa, irradiancia solar global, temperatura y humedad relativa en la ciudad de Salta (Argentina). Para realizar la determinación de  $\beta$  se utiliza el modelo de Yang. Se detectaron dos días de octubre d 2013 con alta carga de aerosoles y fueron seleccionados como caso de estudio. Se comprueba que gran parte de los mismos es producto de humo de incendios forestales. El análisis de la velocidad y dirección de los vientos confirma que el viento trasladó gran parte del humo de los incendios originados en la selva tucumano-boliviana hacia la ciudad de Salta. Este transporte origina un incremento en la carga de aerosoles con valores de turbidez de 0.39 y 0.46, y además supone una reducción diaria de la radiación global que llega a la superficie de 38 y 71.8 W/m<sup>2</sup> para los días 8 y 9 de octubre. Un análisis de los posibles valores del coeficiente  $\alpha$  de Ångström muestra que el considerar un valor constante  $\alpha = 1.3$  puede generar errores mayores al 10% en los estimados del coeficiente  $\beta$ .

**Palabras clave:** turbidez, directa, global, Yang,  $\beta$  de Ångström.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de transmisión radiativa en la atmosfera resulta de interés a varias disciplinas científicas, entre las que mencionamos la meteorología, la climatología, la ingeniería térmica y las ciencias ambientales en general. Este tipo de estudios sirven de herramientas para estudiar las características y alcances de ciertos fenómenos meteorológicos que ocurren durante ciclos climáticos definidos y en sitios específicos.

La estación seca es una temporada climática en el que las lluvias son escasas o nulas, contrario a lo que sucede durante la estación lluviosa. Esta oscilación es propia de las regiones tropicales (Critchfield, 1983). En el caso de la ciudad de Salta (24.7°S, 65.4°W, 1200 m.a.s.l.), la estación seca ocurre entre Abril y Octubre, aproximadamente. Promediando la temporada de la estación seca, en Salta, la falta de vapor de agua en el ambiente genera días de gran amplitud térmica, altas temperaturas y bajas humedades relativas. Además, la vegetación salvaje que rodea la ciudad (ladera de cerros, principalmente) se va secando lentamente, hasta llegar a niveles nulos de evapotranspiración.

Las ráfagas de viento de esos meses inducen la presencia de grandes cantidades de aerosoles en la atmosfera. El eventual ingreso desde el Oeste de aire calentado y sin humedad, por efecto Föhn, termina de completar las condiciones para que ocurran incendios forestales en los alrededores de la ciudad. Estos incendios suelen afectar extensiones de pastizales y matorrales secos. Las emisiones producidas en la combustión de esta vegetación incrementan sustancialmente la carga de aerosoles en la atmosfera de la ciudad de Salta.

El coeficiente de turbidez de Ångström ( $\beta$ ) se define como el espesor óptico de aerosol (AOD) para la longitud de onda  $\lambda = 1\mu\text{m}$ . Este valor está relacionado con la concentración de aerosoles mientras que el exponente de Ångström ( $\alpha$ ) está relacionada con el tamaño de las partículas. La relación propuesta por Ångström (Ångström, 1961) fue:

$$\delta_{a,\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda expresada en micrómetros. La ecuación 1 permite calcular el espesor óptico de aerosoles para cualquier longitud de onda conociendo los valores de los coeficientes  $\beta$  y  $\alpha$ .

Así, en este trabajo se han utilizado medidas efectuadas en la ciudad de Salta durante la estación seca de 2013. Durante este periodo se ha detectado un incremento de la turbidez atmosférica debido a diferentes eventos de polvo y humo que combinados con la acción del viento han incrementado la carga de aerosoles en Salta. En particular, el trabajo se centra en el estudio de la turbiedad atmosférica y los efectos radiativos producidos por los incendios que tuvieron lugar durante el mes de octubre de 2013 en las regiones aledañas a selva tucumano-boliviana (Suelos y Ambientes-[www.inta.gob.ar](http://www.inta.gob.ar)), entre la ciudad de Salta y Aguas Blancas. Para ello se ha utilizado el modelo híbrido de Yang (Yang *et al*, 2001). Este modelo ha sido catalogado entre los modelos con menor error en la estimación de la irradiancia directa (Gueymard, 2003).

## 2. INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDAS

La estación de medidas se localiza en el Campus de la Universidad Nacional en la ciudad de Salta. En la estación se realizan, de forma rutinaria, medidas de irradiancia solar global y directa. Además se tienen medidas meteorológicas de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Para la realización de este trabajo se han empleado medidas de irradiancia solar global y directa obtenidas durante la estación seca de 2013. La componente directa ( $I_{nb}$ ) se mide con un pirheliómetro Eppley NIP con montura Eppley ST-1, mientras que para la irradiancia global ( $I_g$ ) se ha utilizado un piranómetro Eppley PSP. Ambos instrumentos de radiación solar se calibraron en 2012 contra el patrón argentino. La medida de la temperatura y la humedad relativa se realizan mediante sensores LM35 y HIH4000-01 respectivamente. El sensor LM35 fue calibrado contra un bloque termostático FLUKE mientras que el sensor HIH fue calibrado contra dos puntos de sales higroscópicas en soluciones saturadas. Además, todos estos sensores están conectados a un datalogger Campbell Scientifics CR1000. La frecuencia de adquisición fue de 1 minuto.

La velocidad y dirección del viento fueron medidas con una estación automática Pegasus ubicada a 10 metros de los sensores de radiación, temperatura y humedad relativa.

## 3. METODOLOGÍA

Existen varios métodos para estimar el coeficiente  $\beta$  de Ångström (conocido también como AOD<sub>1000</sub>), a partir de medidas de radiación solar en gran ancho de banda (Louche *et al.*, 1987; Pedros *et al.*, 1999; Gueymard, 2013). En este trabajo se utilizó el modelo híbrido de Yang (Yang *et al.*, 2001). Este modelo ha sido catalogado entre los modelos con menor error en la estimación de la irradiancia directa (Gueymard, 2003).

El modelo de Yang es un modelo híbrido que considera aspectos espectrométricos y globales para estimar valores de radiación solar directa y difusa, como componentes de la radiación solar global. A partir estimados de las transmitancias espectrales se infieren los valores de irradiancia solar directa ( $H_b$ ) utilizando la siguiente ecuación

$$H_b = \int I_0 \gamma \bar{\tau}_b \cos \theta_z dt \quad (2)$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital,  $\gamma$  es la corrección de la distancia media Tierra-Sol,  $I_0$  es la constante solar ( $1367 \text{ W/m}^2$ ),  $d$  es el día juliano,  $\bar{\tau}_b$  es la transmitancia directa que a su vez es función de la 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  $\bar{\tau}_a$ . Las expresiones de cada uno de estos términos se detallan a continuación:

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

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

$$\bar{\tau}_{oz} = \exp(-l m \bar{k}_{oz}) \quad (5)$$

$$\bar{k}_{oz} = 0.0365(ml)^{-0.2864} \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_w = \exp(-\bar{c}_w) \quad (7)$$

$$\bar{c}_w = -\ln[0.909 - 0.036 \ln(mw)] \quad (8)$$

$$\bar{\tau}_g = \exp(-\bar{c}_g) \quad (9)$$

$$\bar{c}_g = 0.0117 m^{0.3139} \quad (10)$$

$$\bar{\tau}_r = \exp(-0.008735 m \bar{\lambda}_r^{-4.08} P / P_0) \quad (11)$$

$$\bar{\lambda}_r = 0.547 + 0.014(mP/P_0) - 0.00038(mP/P_0)^2 + 4.6 \times 10^{-6} (mP/P_0)^3 \quad (12)$$

$$\bar{\tau}_a = \exp(-\beta m \bar{\lambda}_a^{-1.3}) \quad (13)$$

$$\bar{\lambda}_a = 0.6777 + 0.1464(m\bar{\beta}) - 0.00626(m\bar{\beta})^2 \quad (14)$$

$$l = 0.44 - 0.16 \sqrt{\left(\frac{\phi - 80}{60}\right)^2 + \left(\frac{y - 120}{263 - \phi}\right)^2} \quad (15)$$

con  $y = d$  si  $d < 300$ ,  $y = d - 366$  si  $d > 300$

$$w = 0.00493 HR T^{-1} \cdot \exp(26.23 - 5416 T^{-1}) \quad (16)$$

donde  $l$  es el espesor de la capa de ozono (en cm.),  $\phi$  la latitud (en grados),  $w$  es la cantidad vapor de agua precipitable (en cm.),  $T$  es la temperatura (en K),  $HR$  es la humedad relativa (%),  $\beta$  es el coeficiente de Turbiedad de Ångström,  $m$  es la masa óptica relativa sin corrección por presión atmosférica,  $P$  es presión atmosférica del sitio y  $P_0$  la presión atmosférica a nivel del mar (ambas en hPa). El exponente de Ångström se ha considerado constante e igual a 1.3 (ecuación 13).

La metodología de cálculo sigue un proceso iterativo que permite determinar los valores instantáneos de los coeficientes  $\beta_e$  de Ångström. Para ello se parte de los datos experimentales  $I_{nb,m}$ ,  $T_m$  y  $HR_m$  (el subíndice  $m$  indica “medidos”) en un instante determinado. Se estima la cantidad de agua precipitable ( $w_e$ , el subíndice  $e$  indica “estimado”)

utilizando las medidas de  $T_m$  y  $HR_m$ . Se introducen valores de  $\beta_e$  de manera iterativa, haciéndolo variar desde 0 hasta 0.8, aumentando 0.001 en cada iteración. El proceso se detiene cuando la diferencia entre la irradiancia directa medida y estimada sea a  $2 \text{ W/m}^2$ .

#### 4. SITUACIÓN ATMOSFÉRICA

La situación atmosférica durante la estación seca de 2013 se caracteriza por altas temperaturas y bajas humedades relativas. Además la tasa de precipitaciones anuales no llego a los valores normales hacia fines de 2012, indicando el inicio de una sequía (inta.gob.ar, 2013) que todavía no ha sido superada.

En la Fig. 1 se muestran los valores medios de irradiancia solar global medidos en la ciudad de Salta durante los meses de agosto, septiembre y octubre de 2013 (línea continua). Además se muestran los valores estimados para un día claro y limpio usando el modelo ARG-P (Salazar *et al*, 2010). Se observa que el mes de septiembre fue un mes bastante limpio ya que la curva experimental se acerca a la simulada por el modelo. Sin embargo los meses de agosto y octubre estuvieron más afectados por atenuaciones atmosféricas, ya sea por nubes o aerosoles. En particular, durante el mes de octubre se observa una importante reducción de la irradiancia solar global, comparado con el valor medio mensual esperado para día claro.

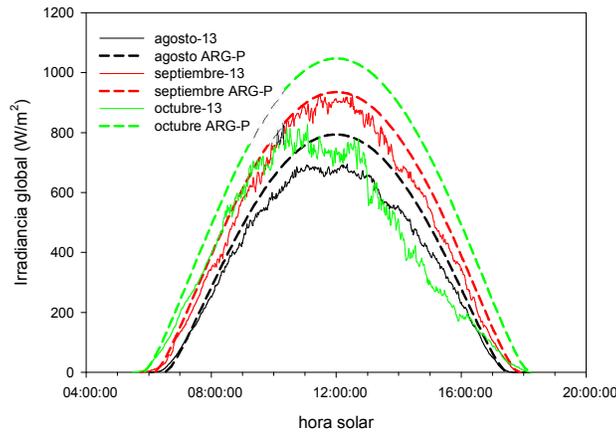


Figura 1. Irradiancia solar Global para un día Promedio (IDP) para los meses de agosto, septiembre y octubre de 2013, en la ciudad de Salta.

Los valores medios mensuales de temperatura y humedad relativa para estos tres meses se muestran en la Tabla 1. Puede apreciarse como los valores de la temperatura y la humedad relativa van incrementándose a medida que se acerca el solsticio del verano austral (21 de diciembre).

Tabla 1. Valores medios mensuales, máximo y mínimos de la temperatura y la Humedad Relativa durante los meses de agosto, septiembre y octubre de 2013 en la ciudad de Salta. Las cifras entre paréntesis indican los valores medios para cada mes en el periodo 1981-1990 (SMN)

	Agosto 2013	Septiembre 2013	Octubre 2013
T promedio	13.0 (12.7)	15.9 (14.5)	21.0 (18.9)
T máxima	34.8	33.9	39.7
T mínima	-3.2	1.0	5.8
Desv. Standard T	7.7	7.9	5.6
HR promedio	44 (66)	52 (62)	58 (61)
HR máxima	86	93	98
HR mínima	3	7	11
Desv. Standard HR	19	21	23

La reducción en la irradiancia observada durante el mes de octubre de 2013 se debe fundamentalmente al aporte de partículas producidas por la gran cantidad de incendios que se dieron al NorEste de Salta, en la selva tucumano-boliviana, aledaña al trazado de la ruta nacional 34.

En particular y como caso de estudio se han elegido los días 8 y 9 de octubre. En la Fig. 2 se muestra una imagen de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) en la que se aprecia claramente el humo desprendido por los incendios, que han marcado con puntos rojos (<http://rapidfire...>, GIOVANNI). Estos incendios se encuentran en dirección NorNorEste (NNE) respecto de la posición de la ciudad de Salta. Allí se aprecia lo mencionado anteriormente: corresponde a la región de selva tucumano-boliviana, que es una zona de transición entre las regiones desérticas de altura del oeste y las planicies del este.

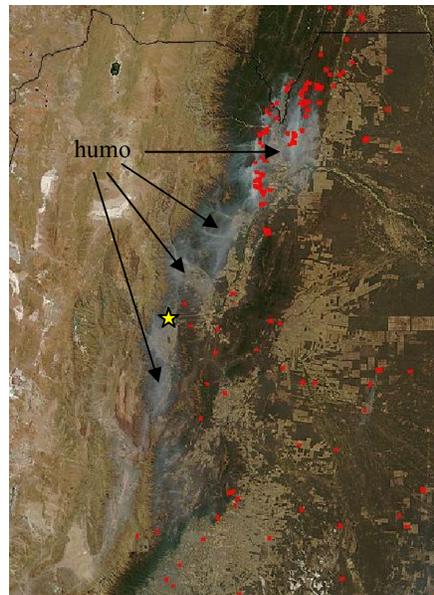


Figura 2. Imagen MODIS del norte de Argentina para el día 8/10/2013. La estrella amarilla indica la posición de la ciudad de Salta. Los puntos rojos indican incendios.

El día 8 de octubre a las 17:20 hora solar, desde la terraza del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Salta, se tomó una fotografía (Fig. 3). La reducción de la intensidad luminosa del disco solar, así como su color rojizo, delatan la presencia de una gran cantidad de aerosoles en la atmosfera. En primer plano, se observa un complejo de aulas del Campus de la Universidad Nacional de Salta. En segundo plano se observan edificios de la Ciudad Judicial de la ciudad de Salta, a 400 metros del sitio de observación. Con flechas negras se indica el horizonte, que corresponde a una lomada ubicada a aproximadamente 2 km del sitio de observación: esa era la “visibilidad” a esa hora.



Figura 3. Fotografía del disco solar, a las 17:20 (Hora solar) del 8/10/2013.

La Fig. 4 muestran las masas de aire que llegaron el día 8 de Octubre de 2013 a las 15h UTC (12h hora solar en Salta, que es hora UTC – 3 horas). Las retrotrayectorias se han simulado para 3 alturas diferentes (500, 1500 y 3000 m) sobre el nivel de suelo utilizando el modelo HYSPLIT (Draxler y Rolf, 2013). Las trayectorias muestran como la masa de aire que llega a Salta a 500m procede de la zona donde se produjeron los incendios. De forma que el origen de la escasa visibilidad observada en la Fig. 3 sobre la ciudad de Salta se atribuye al aumento en carga de aerosoles producido por las emisiones de los incendios al NNE de la ciudad.

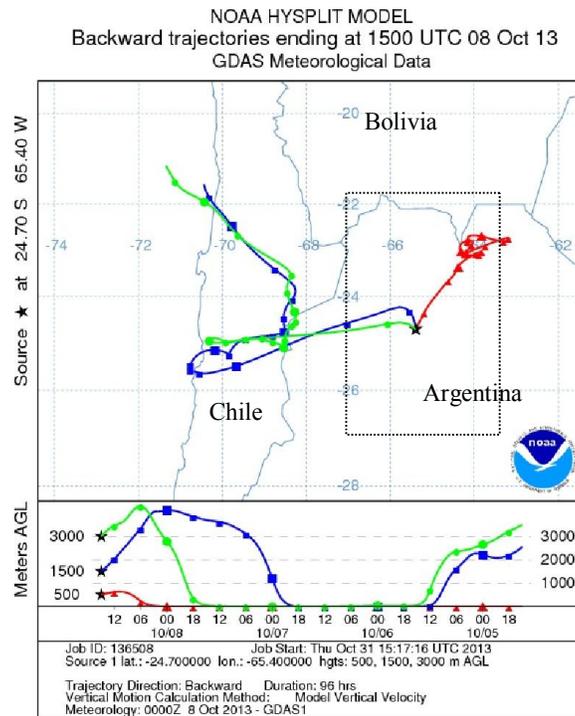


Figura 4. Retrotrayectorias de masas de aire del modelo HYSPLIT, para la ciudad de Salta, para el día 8/10/2013. El recuadro de línea punteada corresponde al área mostrada en la Fig. 4.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN DE LOS MISMOS

### 5.1 Obtención del parámetro de turbidez

Se ha aplicado el modelo de Yang para estimar la turbidez atmosférica para los días objeto del análisis (1, 8 y 9 de octubre 2013). Todos estos días son de cielo claro, es decir, no hubo nubes, salvo esporádicas excepciones, que se han eliminado del cálculo. Los resultados se muestran en la Fig. 5. Como era de esperar, los valores de  $\beta$  para el 1 de octubre son relativamente bajos, obteniéndose un valor medio diario de 0.06. Los otros dos días presentan valores mucho más altos, alcanzando valores medios de 0.34 y 0.46 respectivamente para el 8 y el 9 de octubre. Asimismo el 9 de octubre fue el día con mayor cantidad de aerosoles. Estos valores superan el valor medio de  $\beta$  para la estación seca del año 2009 (Salazar *et al*, 2010) que fue de 0.21.

En general se observa una tendencia de aumento en la carga de aerosoles por la tarde. Esta tendencia se observa incluso el día 1 de octubre aunque es mucho más pronunciada el 8 y el 9 de octubre. El aumento en el contenido de aerosoles está relacionado con el régimen de vientos. El patrón de velocidades y dirección de los vientos en la Universidad Nacional de Salta para los días 1, 8 y 9 de octubre de 2013 se muestra en la Fig. 6. Las figuras indican que la velocidad del viento es mayor durante el día y casi nula durante la noche. Los valores máximos se dan entre las 11h y las 16h, alcanzando valores entre 6 y 12 km/h. Además se tiene que durante los tres días predomina el viento de componente norte. En particular, la dirección preponderante resultan ser NNE para los días 8 y 9 y representa el 50% de los casos el día 8 y 30% de los casos el día 9. El aumento en la velocidad del viento y la dirección prevalente indican que las partículas de humo procedentes de los incendios originados en la selva tucumano-boliviana fueron transportadas a la ciudad de Salta. Este transporte podría explicar el incremento observado en la carga de aerosoles a partir del mediodía.

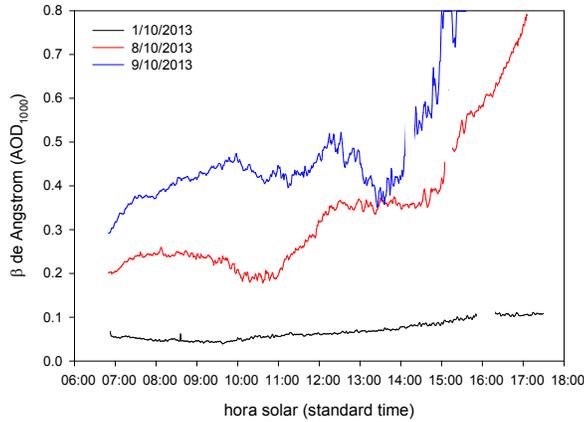


Figura 5. Valores del coeficiente  $\beta$  de Ångström para los tres días analizados, estimados según el método de Yang. Las interrupciones en los datos corresponden a momentos de irrupción de nubes. La escala de los  $\beta$  se consideró con un máximo = 0.8

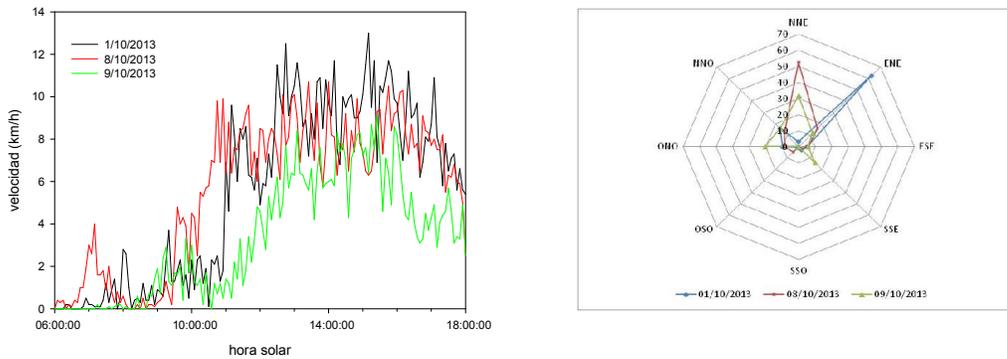


Figura 6. Velocidad de viento y dirección, de los días 1,8 y 9 de noviembre de 2013 medidos en la ciudad de Salta.

El hecho que el modelo de Yang considere el valor de  $\alpha$  constante facilita el proceso iterativo para determinar  $\beta$ . Sin embargo los valores de  $\beta$  obtenidos usando el modelo de Yang podrían tener mayor incertidumbre cuanto más se aleje el valor de  $\alpha$  real del utilizado para el cálculo. Por este motivo se han utilizado las medidas del parámetro  $\alpha$  proporcionados por el sensor MODIS para determinar este error (GIOVANNI). MODIS proporciona valores de  $\alpha$  de 1.14, 1.66 y de 0.8 para los días 1, 8 y 9 de octubre. El mayor valor de  $\alpha$  para el 8 de octubre indica una importante contribución de las partículas finas al contenido total de aerosoles que se asocia a las emisiones típicas de la quema de biomasa (Dubovik *et al.*, 2002). Sin embargo el hecho de que el valor observado para el 9 de octubre sea menor podría indicar que también hubiera una contribución de partículas mayores, quizá de origen diferente al incendio.

En la Fig. 7 se muestran los valores de  $\beta$  estimados usando los valores de  $\alpha$  proporcionados por MODIS en el modelo de Yang. Además los resultados se comparan con los valores estimados a partir del procedimiento habitual ( $\alpha = 1.3$ ). La diferencia entre esos valores fue del 7% para el día 1, del 9% para el día 8 y del 14% el día 9/10/2013. De esta forma si el valor real de  $\alpha$  es menor que 1.3, el modelo de Yang subestima el valor de la turbidez atmosférica. Y si el valor real de  $\alpha$  es mayor de 1.3 el modelo de Yang sobrestima el contenido de aerosoles. El tomar un  $\alpha$  constante resulta de utilidad para estimar el valor de la turbidez, pero el error que se comete puede superar el 10% cuanto mayor sea la diferencia del  $\alpha$  real respecto del valor prefijado en el modelo de Yang.

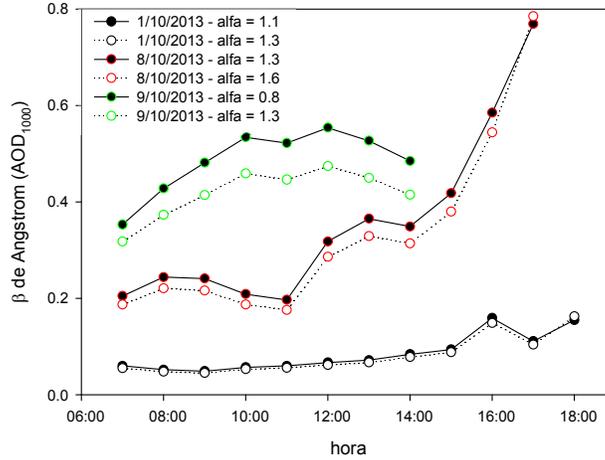


Figura 7. Comparación entre los valores estimados del coeficiente  $\beta$  considerando un  $\alpha = 1.3$  (modelo de Yang) y un  $\alpha$  igual al promedio estimado por MODIS para cada día analizado. Para el caso del día 9/10/2013 los valores llegan hasta la hora 14:00 ya que a partir de las 15:00 el valor es superior a 0.8

### 5.2 Efectos radiativos

En la Fig. 8 se muestran los valores medidos de  $I_g$  e  $I_{bn}$  de los días 1, 8 y 9 de octubre de 2013, en la ciudad de Salta. Los pequeños picos de disminución de irradiancia el 1 de octubre hacia las 16h, el 8 de octubre hacia las 15:15h y el 9 de octubre hacia las 14h se corresponden con los momentos nublados. Además se muestra la irradiancia difusa ( $I_d$ ) calculada como la diferencia entre  $I_g$  y la proyección de  $I_{bn}$  sobre un plano horizontal (ec.17).

$$I_d = I_g - I_{bn} \cdot \cos \theta_z \quad (17)$$

El efecto radiativo producido por el aumento en la carga de aerosoles durante los días 8 y 9 de octubre se puede estimar a través de las diferencias observadas en la irradiancia respecto a una referencia. En este trabajo se ha tomado el día 1 de octubre como día referencia, ya que el contenido de aerosoles es mucho menor y permanece más o menos constante durante todo el día. En ambos días (8 y 9 de octubre) este efecto radiativo disminuye la radiación directa mientras aumenta la radiación difusa que alcanza la superficie, respecto a los valores obtenidos para el 1 de octubre. De esta forma, para la altura solar máxima el efecto neto sobre la radiación global es la reducción de unos  $50 \text{ W/m}^2$  y  $100 \text{ W/m}^2$  respectivamente para el 8 y el 9 de Octubre respectivamente. Puesto que todos los días analizados son días limpios (sin nubes), las variaciones observadas en las componentes de la radiación solar son debidas a la variación del coeficiente de turbidez  $\beta$ . Así pues cuanto mayor es el valor de  $\beta$  obtenido mayor efecto se observa sobre la radiación solar.

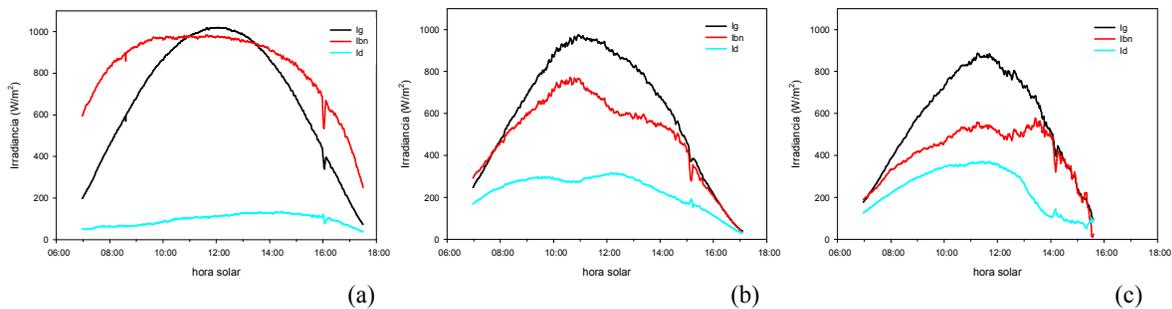


Figura 8. Graficas de la Irradiancia solar global ( $I_g$ ), Irradiancia Solar directa ( $I_{bn}$ ) e Irradiancia solar difusa ( $I_d$ ) de los días (a) 1/10/2013, (b) 8/10/2013, (c) 9/10/2013

El efecto radiativo diario de los aerosoles se ha cuantificado para todas las componentes de la radiación solar. Primero se integra la irradiancia medida durante las horas de sol y posteriormente se relativiza a las 24h siguiendo la ecuación 18. De forma que el efecto radiativo diario para un día dado (8 y 9 de octubre) se obtiene como diferencia entre la irradiancia medida el respecto la medida el día de referencia (1 de octubre). El superíndice  $i$  indica la componente utilizada ( $i$  = global, difusa y directa).

$$ER^i = \frac{1}{24} \int_{orto}^{ocaso} I^i_{dia}(t) dt - \frac{1}{24} \int_{orto}^{ocaso} I^i_{referencia}(t) dt \quad (18)$$

Tabla 2. Efecto radiativo para las componentes global ( $ER^g$ ), directa normal al haz ( $ER^{bn}$ ) y difusa ( $ER^d$ ) para el 8/10/2013 y 9/10/2013 estimado respecto de los valores de esas magnitudes registrados el día 1/10/2013.

	$ER^g$ (W/m <sup>2</sup> )	$ER^{bn}$ (W/m <sup>2</sup> )	$ER^d$ (W/m <sup>2</sup> )
08/10/13	-38.9	-151.5	57.2
09/10/13	-71.8	-176.9	52.8

El efecto radiativo diario debido al exceso de aerosoles provocado por el transporte de biomasa sobre la ciudad de Salta varía entre -38.9 y -71.8 W/m<sup>2</sup> para los días 8 y 9 de octubre. Asimismo se tiene un incremento diario de la radiación difusa entre 52.8 y 57.2 W/m<sup>2</sup>. Este efecto es comparable o mayor al producido por la intrusión de partículas de polvo desértico en latitudes medias (Hess *et al*, 1998)

## 6- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado el aumento en la turbidez atmosférica y los efectos radiativos producidos por el transporte de partículas sobre la ciudad de Salta (Argentina). Como casos de estudio se han empleado los días 8 y 9 de octubre de 2013. Los incendios originados en la selva tucumano-boliviana y la dinámica dominante incrementaron el transporte de humo sobre la ciudad. Se aplicó metodología híbrida de Yang para determinar los valores del coeficiente  $\beta$  de Ångström, que toma valores medios diarios de 0.39 y 0.46 respectivamente para los días 8 y 9 de octubre. El exceso de partículas produjo un efecto radiativo notable en Salta. Este efecto se ha determinado por comparación de los casos de estudio con el 1 de octubre en el que el coeficiente de turbiedad es de 0.06, considerándose como un día extremadamente limpio. Así pues este efecto supone un efecto neto de reducción de la radiación global que llega a la superficie de 38.9 y 71.8 W/m<sup>2</sup> para los días 8 y 9 de octubre.

Por otro lado, el análisis de los valores del coeficiente  $\alpha$  de Ångström indica que el error cometido al utilizar un valor constante ( $\alpha = 1.3$ ) puede llegar a ser mayor al 10 % si el valor de  $\alpha$  real difiere excesivamente de 1.3, lo que puede suceder con relativa facilidad en el caso de eventos extremos.

## 7- Agradecimientos

Este trabajo fue realizado dentro del Proyecto 1988/3, financiado por el Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta (Argentina). Los datos de dirección y velocidad de viento fueron cedidos por el Dr. Alejandro Hernández (U.N.Sa.)

## REFERENCIAS

- Critchfield, H. J., 1983. General Climatology. Prentice Hall.
- Ångström, A., 1961. Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus* 13, 214-223.
- Suelos y Ambiente – Salta – Argentina. INTA. <http://inta.gob.ar/imagenes/salta.JPG/view>
- Yang K., G. W. Huang, Tamai N., 2001. A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy* 70 (1), 13–22.
- Gueymard C., 2003. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74, 355-379.
- Louche A., Maurel M., Simonnot O, Peri G., Iqbal M., 1987. Determination of Angstrom's turbidity coefficient from direct solar irradiance measurements. *Solar Energy* 38, 89-96.
- Pedros R., Utrillas M., Martínez-Lozano J., Tena F., 1999. Values of broadband turbidity coefficients in a mediterranean coastal site. *Solar Energy* 66 (1), 11-20.
- Gueymard C., 2013. Aerosol turbidity derivation from broadband irradiance measurements: Methodological advances and uncertainty analysis. ASES Solar Conf., Baltimore, MD.
- <http://inta.gob.ar/documentos/situacion-climatica-cultivos.-provincia-de-salta-campana-2012-2013/>
- Salazar G., Hernández A., Saravia L., 2010. Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results. *Renewable Energy* 35, 2452-2460.
- Draxler R., Rolph G., 2013. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, USA.
- Salazar G., Farfan F., Raichijk C., 2010. Estimación del coeficiente de turbidez  $\beta$  de Ångström a partir de mediciones de irradiancia global y directa. Caso de estudio: ciudad de Salta (Argentina). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14. ISSN 0329-5184. <http://www.asades.org.ar/averma.php>
- Dubovik O., Holben B., Eck T., Smirnov A., Kaufman Y., King M., Tarré D., Slutsker I., 2002. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations *Journal of the Atmospheric Sciences* 59 (3), 590-608.
- <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>

<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/imagery/single.cgi?image=Argentina.A2013281.1430.1km.jpg>

Hess M., Koepke P., Schult I., 1998. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. Bull. Am. Met. Soc., 79, 5.

#### **ANALYSIS ON ATMOSPHERIC TURBIDITY DURING FOREST FIRES OCCURRED IN THE DRY SEASON 2013 IN SALTA CITY (ARGENTINA).**

**Abstract.** Values of the Ångström turbidity coefficient ( $\beta$ ) were analysed using measurements of the solar irradiance components (direct and global), and ancillary measurements of temperature and relative humidity at Salta (Argentina). The Yang method was used to determine  $\beta$ . Two days with high aerosol load were selected as cases studies. The increase of the aerosol burden is originated by wildfires in the Tucumano-Bolivian jungle. The analysis of the wind speed and direction confirms that a large amount of smoke was transported towards Salta city. This transport originates a increase of the aerosol load which take values of 0.39 and 0.46 on 8 and 9 october, respectively. Moreover, this increase of particles produced a daily reduction of the solar radiation on surface up to 38 and 71.8  $W/m^2$  on 8 and 9 October, respectively. The analysis of the possible values of the Ångström exponent ( $\alpha$ ) shows that the uncertainties of considering a constant value of  $\alpha$  may produce uncertainties larger than 10% in the determination of  $\beta$ .

**Key words:** turbidity, direct, global, Yang, Ångström coefficient  $\beta$ .