

DETERMINACIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE LA ATMÓSFERA EN LA CIUDAD DE LA PAZ

R. Torrez, E. Palenque

*Laboratorio de Física de la Atmósfera
Carrera de Física—Instituto de Investigaciones Físicas, UMSA
La Paz—Bolivia*

RESUMEN

Por las especiales características de la ciudad de la Paz, ($16.5^{\circ}S$, $68.2^{\circ}W$) principalmente con respecto a su altura sobre el nivel del mar; por encima de los $3500m$, reducidos niveles de contaminación atmosférica, además de su prolongada época seca, se hace importante determinar la profundidad óptica de su atmósfera, y su variación anual, con el objeto de compararlos con el correspondiente a ciudades similares a nivel del mar. Para este propósito recurrimos a las conocidas expresiones de la atenuación atmosférica de Bouguer o Beer-Lambert, considerando que la atmósfera es una capa plana, de densidad homogénea, y donde no se considera la refracción de los rayos solares. Los resultados obtenidos son satisfactorios para una gran cantidad de casos, principalmente situados a principios y finales de año, sin embargo, en una cantidad considerable de días, principalmente de cielo muy claro y ángulos cenitales muy altos el modelo no satisface plenamente los valores observados, que consisten en una cantidad de radiación solar apreciable en contraste con cero del modelo tradicional. Este problema nos ha llevado a establecer, una nueva expresión para determinar la atenuación de la radiación solar, principalmente a ángulos cenitales muy altos, o lo que es lo mismo, elevaciones muy bajas del sol. Esta expresión toma en cuenta la esfericidad de la tierra, y por consiguiente hace posible obtener atenuaciones finitas aún a ángulos muy altos. El modelo está basado en el triángulo formado entre el camino directo cenital, el camino máximo sobre el horizonte, y la línea recta que une ambos puntos. En el presente trabajo se presenta estos valores evaluados para diferentes épocas del año, observándose un particular comportamiento de la atmósfera en la ciudad de La Paz.

El valor medio anual de la máxima radiación solar incidente en la ciudad de La Paz, vale aproximadamente $955W/m^2$, resultando un coeficiente de atenuación de 0.35 por unidad de columna atmosférica, y que varía entre 0.20 y 0.45, de acuerdo con los valores máximo y mínimo calculados de: $1120W/m^2$ en el primer trimestre y de $866W/m^2$, en el tercer trimestre.

1. LAS SERIES DE DATOS

El Laboratorio de Física de la Atmósfera localizado en la ciudad de La Paz ($16.5^{\circ}S$, $68.2^{\circ}W$ y $3420 m.s.n.m$) dispone de una estación meteorológica, entre otros varios equipos de medición de radiación ultravioleta, aerosoles, y algunos gases contaminantes como CO y CO₂. Los datos que entrega la estación meteorológica consisten de radiación solar global y directa, humedad, velocidad de viento, temperatura, presión atmosférica, y son registrados y almacenados cada minuto en un datalogger Campbell CR-10X. Las medidas de radiación solar directa que se emplean en este trabajo han sido obtenidas con un pirheliometro Eppley modelo NIP incluyendo su sistema de seguimiento solar.

La serie de datos de radiación solar directa consiste en aproximadamente 5×10^5 registros, y que datan desde noviembre de 1999. Algunos días típicos de esta serie se muestran en las figuras 1 y 2.

La figura 1 muestra tres días de radiación directa

registrada en los primeros días de abril del año 2000, se puede observar que la envolvente de esta curva tiene la forma de una parábola achatada, cuyo límite es una línea recta de valor constante, que correspondería al caso de una atmósfera totalmente transparente (sin absorción y sin dispersión).

Observando más detalladamente el primer día de esta serie (figura 2), la radiación solar se reduce o queda cortada abruptamente a ángulos cenitales muy altos, es decir a la salida y puesta del sol en el horizonte. Se puede observar entonces que ésto depende únicamente de la claridad de la atmósfera.

Para eliminar en las series de tiempo los momentos de interrupción o atenuación de la radiación directa debido a la interposición de nubes u otros fenómenos que hacen sombra al detector, se ha modelado la envolvente del registro anterior a una función potencial de exponente par, de la forma:

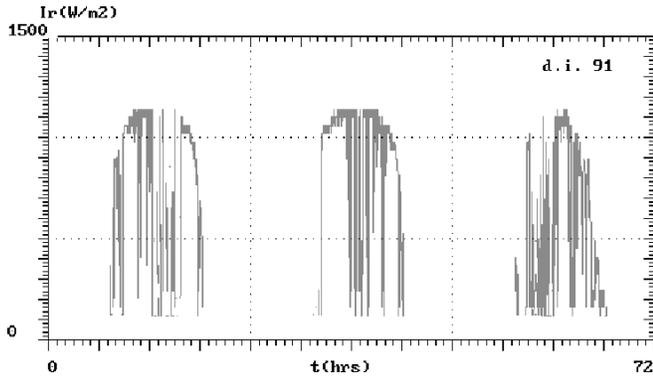


Figura 1. Registro de la radiación solar directa en Cota Cota durante los primeros días del mes de abril del año 2000.

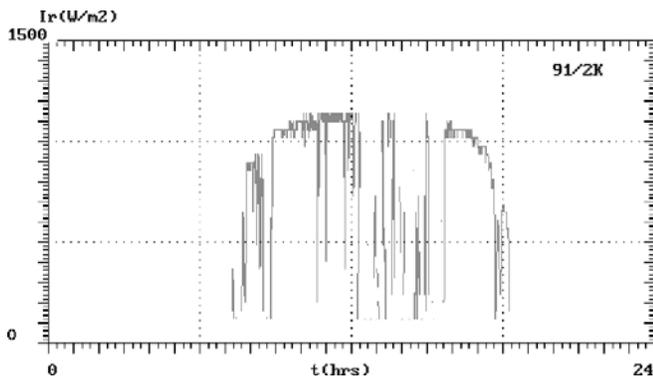


Figura 2. Registro de radiación solar directa del día 31 de marzo del año 2000 en Cota Cota, La Paz.

$$y = a + b\left(\frac{x}{c} - 1\right)^n. \quad (1)$$

Donde c representa la posición temporal en minutos correspondiente al medio día, b ajusta la curva a los puntos de salida y puesta del sol en el horizonte, a nos permite ajustar la máxima irradiancia solar diaria registrada, y finalmente el exponente n conforma el ancho de la curva hacia los valores máximos de la función.

Se ha realizado este proceso ajustando los valores de los registros a la función eliminando los datos más alejados, en un proceso iterativo hasta obtener los valores más altos en el coeficiente de correlación. La figura 3 muestra la función filtro aplicado a otro registro del mismo grupo.

De esta manera realizando el proceso para doce días consecutivos por trimestre, se han obtenido una serie de registros promedio para la radiación solar directa por periodo, de manera de obtener también promedios para los coeficientes de atenuación de la atmósfera.

La figura 4 muestra los resultados de este proceso, aplicado al primer grupo de registros (12 primeros días del mes de abril del 2000). Se puede observar en este gráfico que las perturbaciones han sido completamente filtradas.

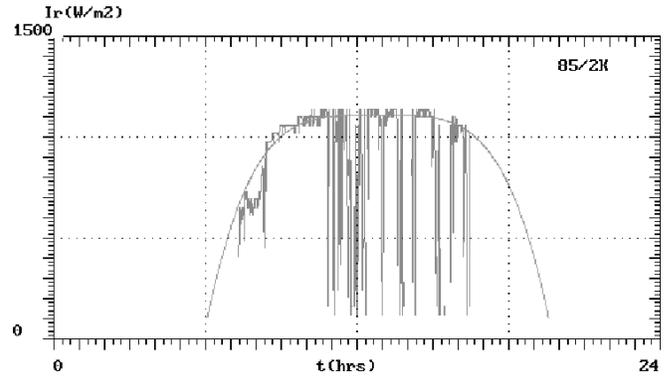


Figura 3. Registro de la radiación solar directa con la función filtro de perturbaciones.

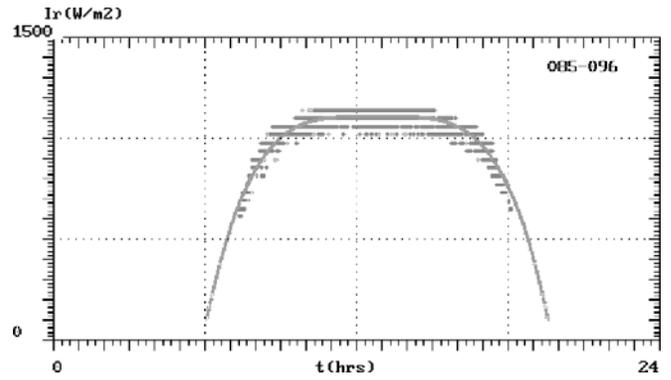


Figura 4. La radiación solar directa en los primeros doce días del mes de abril del 2000.

2. EL MODELO DE CAPA ATMOSFÉRICA

El modelo tradicional de capa atmosférica plana (M. Iqbal p.97-99), presenta limitaciones hacia elevaciones del sol muy pequeñas, estableciendo una completa opacidad de la atmósfera en estas posiciones, resultado que no es satisfactorio, especialmente para las condiciones de la mayor parte de regiones de nuestro altiplano, donde el cielo es particularmente claro, la atmósfera considerablemente seca una gran parte del año, y en un terreno prácticamente plano. Con estas condiciones es previsible tener valores de radiación solar directa considerables con el sol en el horizonte, tanto a la salida como a la entrada del sol.

De esta manera, en lugar de una capa horizontal plana, consideramos una capa de atmósfera en forma de cuña, cuya altura es la elevación de la atmósfera sobre el punto de observación, y cuya base es la mitad de la secante a la atmósfera que pasa por el punto indicado, que a la vez es el punto tangente a la tierra en el mismo lugar (fig. 5).

Por consideraciones trigonométricas, el camino óptico a elevación cero, o lo que es lo mismo, al ángulo cenital máximo, puede ser expresado en términos del radio de la Tierra (R), y la altura de la atmósfera (h) en la siguiente forma:

$$L = \sqrt{h(2R + h)}. \quad (2)$$

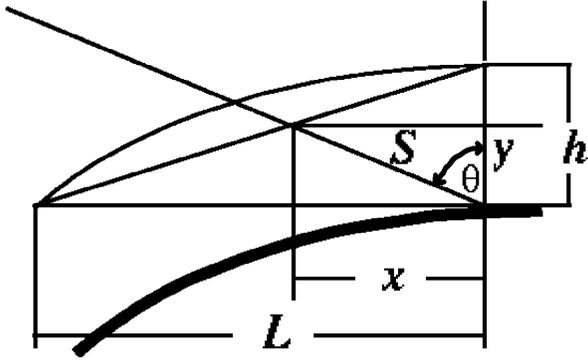


Figura 5. Diagrama de distancias para el modelo de cuña propuesto. Se puede observar que la aproximación a la trayectoria real es mayor a elevaciones menores.

Que se puede aproximar a:

$$L = \sqrt{2Rh}. \quad (3)$$

Por semejanza de triángulos:

$$\frac{h}{L} = \frac{y}{L-x}. \quad (4)$$

Luego:

$$S = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (5)$$

o sea:

$$S = h \left(\frac{1}{\frac{h}{L} \text{sen}\theta + \text{cos}\theta} \right). \quad (6)$$

Luego, la diferencia de camino óptico respecto al camino cenital será:

$$S - h = h \left(\frac{1}{Q \text{sen}\theta + \text{cos}\theta} - 1 \right), \quad (7)$$

donde:

$$Q = \sqrt{\frac{h}{2R}}. \quad (8)$$

Luego, por la ley de Beer-Lambert aplicada a la irradiancia medida en función del incremento del camino óptico, tendremos:

$$I_S = I_0 e^{-mh \left(\frac{1}{Q \text{sen}\theta + \text{cos}\theta} - 1 \right)}. \quad (9)$$

Donde m es el coeficiente de atenuación por unidad de distancia, e I_S la irradiancia medida en función del ángulo cenital conforme al movimiento diario del sol.

Cambiando mh por α , es decir, atenuación por unidad de columna atmosférica, y denominando x a la expresión:

$$x = \left(\frac{1}{Q \text{sen}\theta + \text{cos}\theta} - 1 \right), \quad (10)$$

la irradiancia solar puede expresarse entonces como:

$$I_S = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (11)$$

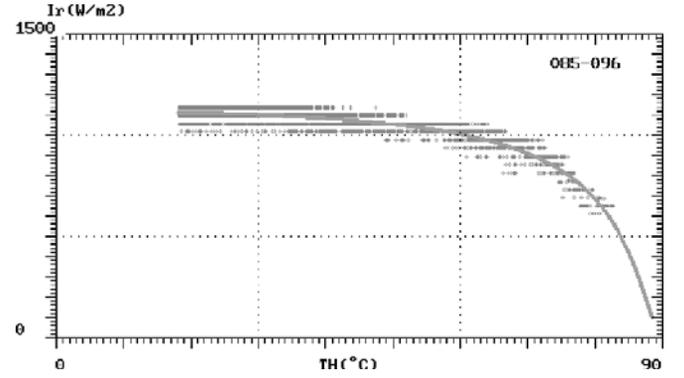


Figura 6. Dispersión de los registros y curva de ajuste para el modelo propuesto.

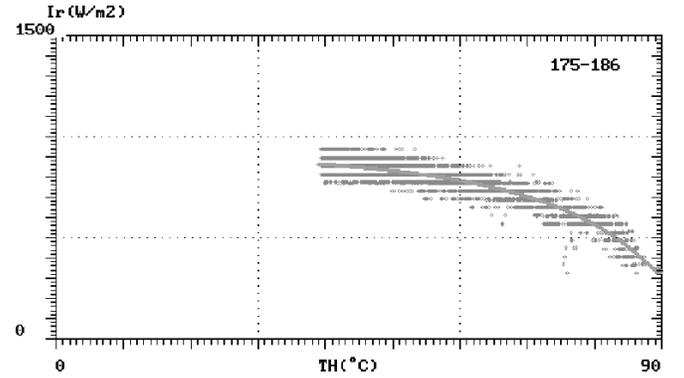


Figura 7. Dispersión de los registros y curva de ajuste para el grupo de datos correspondiente al tercer trimestre.

que ajustando por mínimos cuadrados a los datos reales nos permitirá determinar las constantes I_0 y α . I_0 es la irradiancia cenital, y x es el aumento de la profundidad atmosférica en otras posiciones del sol, en unidades de columna atmosférica, es decir, de la profundidad óptica.

Debido a que α contiene en su expresión al término h que se desconoce, Q se estimará por un proceso iterativo que dé como resultado el mayor coeficiente de correlación.

3. RESULTADOS DEL MODELO

Para realizar el ajuste de los datos al modelo requerimos determinar previamente el valor de Q , que depende de la altura de la capa de la atmósfera. Para tal efecto partiremos de la condición de atmósfera plana, $Q = 0$, incrementando gradualmente su valor hasta obtener el mayor coeficiente de correlación.

Realizado este proceso, las figuras 6 y 7 muestran la dispersión de los datos y la curva ajustada para dos de los grupos considerados. Como se puede ver en estas gráficas el ajuste es completamente satisfactorio, presentando coeficientes de correlación superiores a 0.9. La Tabla 1 muestra los valores de I_0 , la atenuación correspondiente, y el valor del parámetro Q .

Tomando en consideración el valor de la constante solar, y los valores de I_0 obtenidos anteriormente, podemos determinar los coeficientes de atenuación absoluta para cada uno de los cuatro grupos considerados. Normalizan-

TABLA 1

Irradiancia cenital (I_0) y atenuación relativa (α).

$I_0(W/m^2)$	$\alpha(1/atm)$	Q
1121,03	1,00	0,02
891,32	2,16	0,19
866,97	2,30	0,15
941,05	1,88	0,19

do éstos a la condición de menor atenuación nos permite obtener los correspondientes coeficientes relativos para los otros grupos.

4. CONCLUSIONES

Como se puede observar en las gráficas, el modelo refleja satisfactoriamente los registros reales, observándose que evidentemente sobre el horizonte o a elevaciones muy reducidas la radiación solar es apreciable.

Sin embargo los resultados obtenidos presentan

algunos problemas de interpretación, como que siendo el coeficiente de atenuación relativo superior a 1, la radiación directa sobre el horizonte sea aún muy apreciable, ésto sugiere el efecto de una obstrucción a la radiación, muy localizada y orientada en la dirección de la vertical, como podría ser la presencia de aerosoles y otros contaminantes sobre la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

Merecen especial reconocimiento los colegas del Laboratorio de Física de la Atmósfera, por toda la colaboración prestada en la realización del proyecto que ha dado lugar a este artículo.

REFERENCIAS

- [1] M. Iqbal. *An Introduction to Solar Radiation*. 1983. Academic Press.
- [2] K. Coulson. *Solar and Terrestrial Radiation*. 1975. Academic Press.
- [3] N. Robinson. *Solar Radiation*. 1966. Elsevier.
- [4] E.J. McCartney. *Optics of the Atmosphere*. 1976. Jhon Wiley and Sons.