

**MEDICION ABSOLUTA Y MODELIZACION DE RADIACION SOLAR ESPECTRAL DIRECTA DE 305.5 nm EN ROSARIO, ARGENTINA**M. I. Micheletti<sup>1,2</sup>, E. A. Luccini<sup>1</sup> y R. D. Piacentini<sup>1,2,3</sup>

1. Grupo de Energía Solar, Instituto de Física Rosario (CONICET-UNRosario), 27 de febrero 210 Bis, 2000 Rosario, Argentina. Fax: 041-821772.
2. Fac. Cs. Exactas, Ing. y Agrim. (UNRosario), Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina. Fax: 041-802654.
3. Observatorio Astronómico de Rosario, CC 606, Parque Urquiza, 2000 Rosario, Argentina. Telefax: 041-802533/54. E-mail: ruben@ifir.ifir.edu.ar

**RESUMEN**

Se presentan resultados de mediciones efectuadas en el Observatorio Astronómico de Rosario (32.96° S, 60.62° W, 20 m. s.n.m.) con instrumento MICROTOPS II, medidor de radiación ultravioleta B (UVB) espectral directa y capa de ozono, desde el 20/03/98 hasta el 14/08/98. Se analiza, en particular, la dependencia de la intensidad de radiación de 305.5 nm con el ángulo zenital, discriminando épocas del año y valores de capa de ozono correspondientes. Durante el período de medición, a iguales ángulos zenitales, se obtienen progresivamente menores valores de radiación UVB, en concordancia con el comportamiento creciente de los valores promedio de ozono en el lugar. Se comparan los resultados medidos con los que proporciona un modelo de transferencia radiativa UV, para las condiciones de cielo claro en que se han realizado las mediciones.

**INTRODUCCION**

La capa de ozono estratosférica, constituida por moléculas de O<sub>3</sub> distribuidas mayoritariamente entre los 15 y 40 km de altura, es esencial para la vida en la Tierra, dado que reduce significativamente la intensidad de las radiaciones ultravioletas más energéticas (rango UVB: 290-320 nm). El deterioro que dicha capa ha sufrido durante las últimas décadas, trae como consecuencia un incremento en los niveles de UVB que puede resultar muy perjudicial para los sistemas biológicos del planeta (Informes UNEP 1991, 1994). Es por ello que cobra creciente importancia determinar la irradiancia solar en este rango espectral que llega a la superficie terrestre y correlacionarla con los valores de la capa de ozono. El conocimiento detallado de la radiación solar próxima a 305 nm es de gran importancia, ya que tiene una marcada implicancia biológica, por estar cerca del máximo de efecto de daño al ADN y de carcinogénesis (Jagger, 1985).

En trabajos anteriores (Alfano et al., 1994; Piacentini, 1995a) se realizaron mediciones de las intensidades solares en 305 nm y 315 nm en el Observatorio Astronómico de la Ciudad de Rosario (32.96° S, 60.62° W, 20 m. s.n.m.) y se compararon con resultados obtenidos en otros puntos geográficos (Piacentini et al., 1995; Díaz et al., 1996). Sin embargo, en tales casos sólo se disponía de valores *relativos*, medidos con un instrumento desarrollado por Tocho y colaboradores en el CIOp/La Plata, para inferir columna vertical de ozono a través de la razón de dos intensidades en diferentes longitudes de onda en el rango UVB. Además, el ancho de banda (8 nm) y el campo de visión del instrumento eran sensiblemente mayores, y se empleó un modelo paramétrico, de Bird y Riordan (1986), para describir las intensidades solares ultravioletas directas. En este trabajo se presentan para Rosario valores *absolutos* de estas intensidades, medidas con un instrumento MICROTOPS II en 305.5 nm, con un ancho de banda de sólo 2.6 nm y campo de visión de 2.5°. Dichos valores se comparan con cálculos realizados mediante el modelo de transferencia radiativa de Madronich (1998), considerando los parámetros correspondientes a las condiciones en que se ha medido, para determinar la intensidad solar de 305.5 nm en función del ángulo zenital.

Se compara la intensidad solar de 305.5 nm en función del ángulo zenital con la curva teórica que resulta de aplicar el modelo de Madronich y considerando los parámetros correspondientes a las condiciones en que se ha medido.

**INSTRUMENTO**

El MICROTOPS II es un fotómetro solar manual que mide radiación solar UVB directa y ozono, así como otros parámetros atmosféricos tales como columna de vapor de agua y espesor óptico de aerosoles. El instrumento está equipado con 5 colimadores ópticos, alineados con precisión, con un campo visual total de 2.5° y aletas que eliminan las reflexiones internas, que permiten medir radiación espectral en tres longitudes de onda UV (300±1.2, 305.5±1.2 y 312.5±1.2 nm), y dos IR (940±5 y 1020±5 nm, opcionales en este caso). Cada canal se ajusta con un filtro de interferencia de banda angosta y un fotodiodo adecuado para el rango de longitud de onda particular. Además, el instrumento consta de un blanco solar, de manera tal que cuando la imagen del Sol está centrada en dicho blanco, todos los canales ópticos están apuntando en forma directa al disco solar. También es parte de la medición una pequeña cantidad de radiación circumsolar, pero la misma contribuye muy poco a la señal.

La radiación capturada por los colimadores y luego filtrada, incide en los fotodiodos produciendo una corriente eléctrica proporcional a la energía radiante interceptada por dichos fotodiodos. Estas señales son luego convertidas a la forma digital.

El principio en el que se basa la medición de la Columna total de ozono del MICROTOPS II es el siguiente: el ozono absorbe mucho más las radiaciones UV de longitud de onda pequeña que las de longitud de onda grande, por lo cual la razón entre las intensidades en dos longitudes de onda de radiación solar UVB es proporcional a la columna de ozono en la atmósfera.

Dado que con el instrumento disponible sólo se cuenta con dos de sus tres canales UV (300 y 305.5 nm) durante el período de medición, los valores de ozono obtenidos tienen una desviación sistemática que requiere un estudio exhaustivo. Además, teniendo en cuenta la alta precisión que han alcanzado las mediciones de ozono con instrumentos satelitales, se han utilizado en el modelo teórico los valores obtenidos por el instrumento TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)/Earth Probe, para el pixel correspondiente a las coordenadas de Rosario, durante los mismos días que midió el MICROTOPS II.

## MODELO MATEMATICO

El modelo utilizado, provisto por el Dr. Sasha Madronich, se basa en la resolución explícita de las ecuaciones de transferencia radiativa en el rango UV. Considera la esfericidad de la atmósfera en la radiación directa y emplea el algoritmo two-stream en la resolución de las ecuaciones en atmósfera plano-paralela para la contribución difusa. Mediante el modelo se calcula la irradiancia espectral directa con separación espectral de 1 nm.

Tal cual lo indicado en el manual del instrumento, se construyó una función respuesta gaussiana de acuerdo al filtro espectral de cada canal, normalizada a 1 en el máximo y ancho espectral en el semi-máximo de 2.6 nm.

La irradiancia absoluta, a comparar con lo medido por el instrumento, es entonces la integral en longitudes de onda del producto entre la irradiancia espectral calculada con el modelo y la respuesta espectral del instrumento.

## ANALISIS

### 1.) Nubosidad sobre Sol directo

Se analizaron las mediciones de irradiancia absoluta en 305.5 nm correspondientes a Sol directo descubierto, sin niebla o bruma, y nubosidad menor o igual que 25%, en función del ángulo zenital. Los ajustes polinómicos de segundo grado en los casos de nubosidad 0% y en aquellos con nubosidad parcial muestran muy buena coincidencia, como se aprecia en la figura 1.

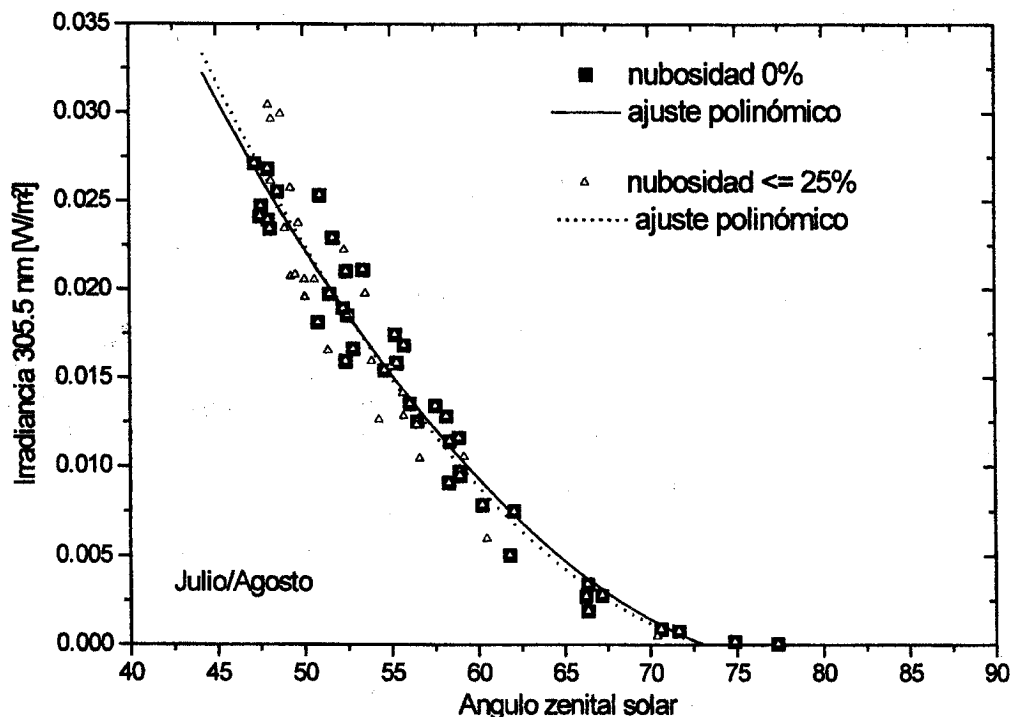


Figura 1. Irradiancia absoluta directa medida en 305.5 nm en función del ángulo zenital, distinguiendo los casos de nubosidad nula y nubosidad parcial, junto con los polinomios de ajuste correspondientes. Datos de julio-agosto 1998.

Se deduce que, en general, la nubosidad parcial localizada que no obstruye el Sol directo no presenta "entre-nubes" relevantes que interfieran en mediciones de radiación UV directa. Por consiguiente, para este tipo de mediciones no es necesario contar con la situación extrema de cielo completamente despejado sino que se tiene un espectro más amplio de situaciones en las que es posible efectuar las mismas.

## 2.) Dependencia con el ángulo zenital y capa de ozono

Con el fin de analizar la respuesta de la radiación en 305.5 nm al comportamiento estacional de la capa de ozono, las mediciones fueron agrupadas por bimestres: Marzo/Abril, Mayo/Junio y Julio/Agosto, como se aprecia en la figura 2. Las condiciones climáticas estuvieron caracterizadas por un elevado número de días nublados y lluviosos, lo que redujo las posibilidades de medición. En la modelización se utilizaron los valores promedios de las mediciones satelitales de ozono sobre la zona correspondiente a Rosario de los días en que se midió con MICROTUPS II de cada bimestre, correspondiendo 277 U.D. a Marzo/Abril, 290 U.D. a Mayo/Junio y 314 U.D. a Julio/Agosto. Los valores fijos de parámetros de Angstrom de aerosoles empleados fueron  $\alpha=1.3$  y  $\beta=0.074$

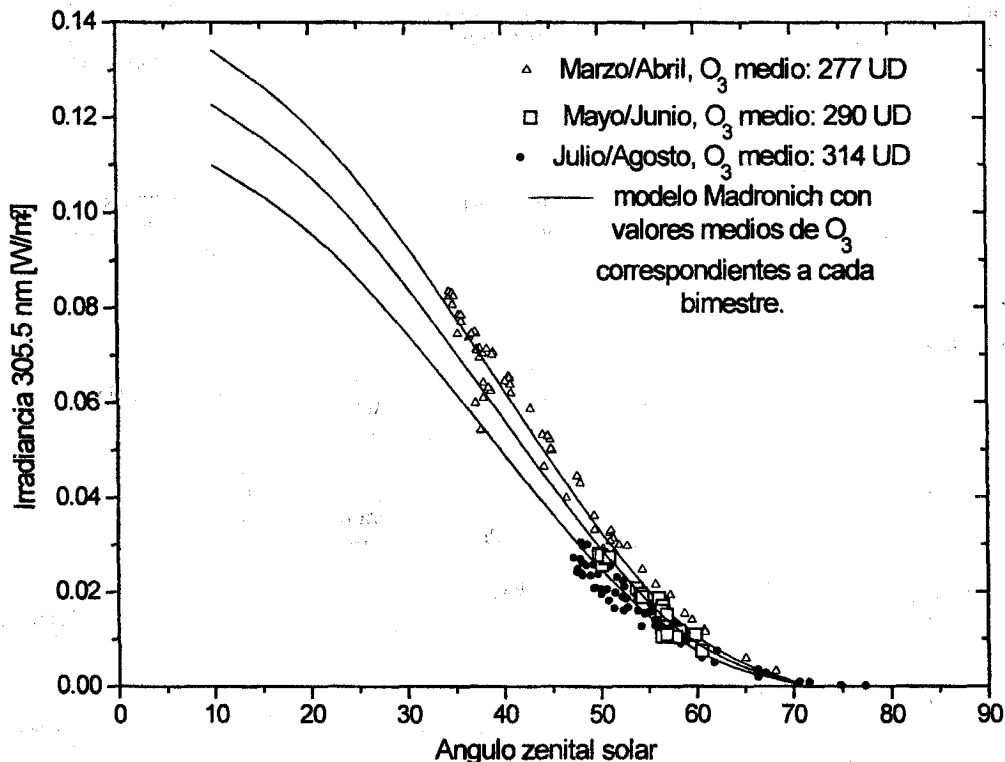


Figura 2. Irradiancia solar directa en 305.5 nm medida y modelizada en función del ángulo zenital, distinguiendo periodos bimestrales con sus correspondientes valores medios satelitales de ozono. Las curvas se extienden hasta el ángulo zenital mínimo para Rosario, de modo de dar una representación en otros periodos del año con valores de ozono similares a los indicados.

La dependencia de la irradiancia con el ángulo zenital muestra un comportamiento típico, que se revela coincidentemente en las mediciones y en la modelización. La utilización de un único valor de ozono, el valor medio de cada bimestre, en la modelización da como resultado que las curvas teóricas representen el comportamiento medio de las mediciones en cada periodo. Las curvas teóricas se extendieron hasta los valores de ángulo zenital más pequeños, característicos de primavera/verano en la región, para los espesores de capa de ozono considerados. Datos para otros espesores pueden obtenerse por interpolación.

La capa de ozono presenta una estacionalidad característica que implica, a latitudes medias, un mínimo en otoño y un máximo en primavera en ambos Hemisferios. Esto se revela en los valores medios en cada bimestre, con un progresivo incremento de Marzo/Abril a Julio/Agosto. Las mediciones de irradiancia UV en 305.5 nm se comportan en directa respuesta a esa estacionalidad, que se manifiesta en la figura 2 con una sistemática disminución de la irradiancia en ángulo zenital fijo conforme avanzan los periodos, con las curvas teóricas representando el comportamiento medio, tal como se señaló.

## CONCLUSIONES

El empleo de modelos probados como referencia para la verificación de instrumentos que miden variables geofísicas (intensidad de radiación solar, capa de ozono, etc.) ha sido propuesto por diferentes autores (Barthia y Herman, 1998). La medición espectral absoluta de irradiancia solar UVB es altamente difícil debido, principalmente, a las bajas intensidades involucradas y a la degradación de los detectores por acción de la radiación.

En base al buen acuerdo logrado en la comparación entre mediciones con el instrumento MICROTUPS II y los cálculos de la simulación teórica con un modelo ampliamente reconocido (Madronich, 1998; Madronich y Flocke, 1997), puede concluirse que, al menos en el rango de variables y parámetros geofísicos considerados, el equipo mide con marcada precisión la

irradiancia absoluta directa en la banda angosta investigada, 305.5 nm.

Las mediciones revelan, en cerrada coincidencia con los cálculos del modelo a valores medios, la dependencia de la irradiancia solar UVB al contenido de ozono atmosférico. Los valores de ozono respondieron durante el período de medición, a la estacionalidad característica en latitudes medias, con un progresivo incremento desde otoño hacia primavera, con la consiguiente disminución de radiación solar UVB directa para idénticos ángulos zenitales observada en las mediciones.

La relevancia de estas mediciones radica en estar realizadas en una región altamente poblada del país, y que pueden servir como parámetro sobre los niveles de irradiancia UV en una amplia zona y posible daño ante sobre-exposiciones a la radiación solar. El presente trabajo da muestras de la utilidad recíproca de las mediciones y la modelización teórica, sirviendo mutuamente como elementos de contrastación. Entre otras aplicaciones, permite verificar indirectamente el modelo del Índice Solar Ultravioleta (ISUV) desarrollado en el Observatorio Astronómico de Rosario (Piacentini, 1995b) y pronosticado diariamente por el Servicio Meteorológico Nacional, así como también los mapas de radiación solar ultravioleta y dosis eritémica desarrollados por Cede, Piacentini y Stengel (1998) para su aplicación en la determinación del riesgo solar en Argentina.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen muy especialmente al Sr. José Pomar por el apoyo técnico en las mediciones, al Sr. Pablo García por su colaboración en la tarea informática, al Dr. Sasha Madronich por importantes discusiones relativas a su modelo y al tema del presente trabajo, al Lic. en Meteorología y Vco. Gustavo Talamoni (Aeropuerto Córdoba) y al Sr. Saúl Berger de Solar Light, EUA, por facilitar el equipo MICROTOPS II.

## REFERENCIAS

- Alfano O., Albizzati E., Piacentini R.D. y Tocho J. (1994). "Medición y modelización de la radiación UVB solar incidente sobre Rosario y Mar del Plata (Argentina) en período estival." *Actas de ASADES* 2 763.
- Barthia P. y Herman J. (1998). Goddard Space Flight Center/NASA. Comunicación privada.
- Bird R.E. y Riordan C. (1986). "Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres". *J. Climate Appl. Meteor.* 25 87.
- Cede A., Piacentini R.D. y Stengel F. (1998). "Método simplificado para que los dermatólogos realicen el pronóstico de riesgo solar en Argentina". Comunicación presentada en el Congreso Argentino de Dermatología". Buenos Aires, Agosto de 1998.
- Díaz S.B., Frederick J.E., Timothy L., Booth C. y Smolskaia I. (1996). "Solar ultraviolet irradiance at Tierra del Fuego: Comparison of measurements and calculations over a full annual cycle". *Geophys. Res. Letters*, 23 355.
- Jagger J. (1985) "*Solar UV actions on living cells*". Editorial Praeger, N. York, EUA.
- Madronich S. (1998). Comunicación privada.
- Madronich, S. y Flocke, Siri. "Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the earth's surface", en el libro "Solar Ultraviolet Radiation". Editores: C. Zerefos y A. Bais. Editorial Springer-Verlag (1997), y referencias citadas en este libro.
- Piacentini R.D. (1995a). "Las radiaciones ultravioletas solares B (UVB) y sus acciones sobre la piel en primavera-verano." *Actualizaciones Terapéuticas Dermatológicas. (Revista del Colegio Ibero-Latinoamericano de Dermatología)* 18 449.
- Piacentini R.D. (1995b). "Método simple para la determinación del Índice Solar Ultravioleta (ISUV)". Informe Interno OAMR/IFIR 1/95.
- Piacentini R.D., Alfano O., Albizzati E. y Aisse M. (1995). "Radiaciones ultravioletas solares incidentes sobre el Estado de Paraná, Brasil". *Actas de ASADES* 1. 04. 23.
- United Nations Environment Program Report (1991), (1994).