

Análisis de la irradiancia espectral solar UV en superficie medida con un espectro-radiómetro de banda angosta en el CEILAP, Buenos Aires

E.A. Wolfram^{1,2*}, R.D'Elía², L. Otero^{2,3}, R. D. Piacentini^{4,5} y E. Quel².

1. Becario CONICET
2. Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (CITEFA-CONICET), Villa Martelli, Argentina
3. Becaria CONAE
4. IFIR, Instituto de Física Rosario (Universidad Nacional de Rosario-CONICET)
5. FCEIA, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario
ewolfram@citefa.gov.ar

Se presenta el análisis de la irradiancia espectral solar UV medida con un espectro-radiómetro GUV-541 (Biospherical Instruments) ubicado en el Centro de Investigaciones en Láser y Aplicaciones CEILAP (CITEFA-CONICET), cercano a Buenos Aires. Este instrumento posee una serie de filtros que seleccionan distintas longitudes de onda en la región UV centrados en 305 nm, 313 nm, 320 nm, 340 nm y 380 nm y forma parte de la Red de Monitoreo Solar Argentina. Se estudió la influencia de las nubes en la distribución de la radiación solar UV en superficie así como el incremento de la misma en situaciones de cielos parcialmente cubiertos. Utilizando el modelo de transferencia radiativa TUV se realizaron cálculos teóricos de la irradiancia espectral en superficie para escenarios de distintas coberturas nubosas. En base a mediciones de las componentes directa y difusa de la irradiancia solar, se realizó un estudio de la distribución angular zenital. Los resultados muestran la influencia cada vez mayor del ozono y los aerosoles para las longitudes de onda menores en el rango UV. Éstos son de particular interés para el estudio de la contaminación por aerosoles, para la reconstrucción del espectro solar en este rango y para su empleo en la determinación de acciones biológicas y sobre materiales expuestos a la radiación solar.

The UV solar spectral irradiance analysis is presented. The data were measured with a spectroradiometer GUV-541 (Biospherical Instruments) placed at Centro de Investigaciones en Láser y Aplicaciones CEILAP (CITEFA-CONICET), near Buenos Aires. This instrument has filters that permits to select different wavelength in the UV region centered at 305 nm, 313 nm, 320 nm, 340 nm and 380 nm. The instrument integrates the Red de Monitoreo Solar Argentina. The influence of clouds in the distribution of ground solar UV radiation was studied, in particular the radiation increase in partially cloudy skies. The ground spectral irradiance was obtained using the TUV radiative transfer model for different cloud cover scenarios. The zenithal angular distribution was also studied using direct and diffuse solar irradiance measurements. The results indicate the important influence of ozone and aerosols at short wavelengths in the UV region. These results are of particular interest for the aerosols contamination studies, for the solar spectrum reconstruction at this wavelength region, for determination of biologically action and the influence over different materials exposed to solar radiation.

I. INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta ambiental es altamente variable. Algunas de estas variaciones son fácilmente cuantificables, como la elevación solar en función de la latitud, la hora del día y la estación del año. Variaciones en la columna de ozono estratosférico son de importancia directa en la distribución de la radiación UV en superficie. Observaciones continuas del ozono atmosférico están disponible desde la década del 50 en estaciones de observación en tierra para ciertos lugares del planeta, y más recientemente con otros métodos de sensado remoto como los satélites y los lidares. Otros factores tales como las nubes, son mucho menos predecibles, y sus distribuciones espacio-temporales son aun pobremente caracterizadas, especialmente a escala local y para fluctuaciones de periodos cortos. Adicionalmente, perturbaciones localizadas pueden provenir de elevaciones en la superficie, reflexiones y turbidez atmosférica, variable asociada con la contaminación del aire.

Frederick et al.⁽¹⁾ notaron que la variabilidad en la cobertura nubosa está entre las fuentes más grandes de

variación en la irradiancia UV integrada en superficie. Por lo tanto para detectar tendencias en la radiación UV-B provocadas por cambios en el ozono total, se deben establecer redes de monitoreo capaces de medir radiación UV, ozono total y transmisión de nubes. En nuestro país existe la Red de Monitoreo Solar Argentina (<http://www.dna.uba.ar>), dotada de radiómetros GUV (ground-based UV) multicanales fabricados por Biospherical Instruments, San Diego. Distribuidos en el territorio argentino, sensan la radiación UVA y UVB a través de canales que cubren esta porción del espectro solar, con un ancho de banda moderado para cada uno de sus filtros de 10 nm (FWHM). Estos instrumentos han demostrado ser una solución aceptable para este tipo de monitoreos, entre los espectro-radiómetros UV muy costosos y de gran mantenimiento y los radiómetros de banda ancha que solo proveen información parcial debido a que no pueden distinguir entre variaciones de la radiación UV causadas por alteración en la cobertura nubosa y variaciones causadas por cambios en el contenido total de ozono.

Dahlback⁽²⁾ mostró que es posible estimar dosis UV, ozono total, espesor óptico de nubes y reconstruir espectros a partir de mediciones con radiómetros multicanal y modelos de transferencia radiativa. En este trabajo, son exploradas, a modo de introducción en estos temas, mediciones de casos de particular interés de un radiómetro multicanal GUV 541 montado en el CEILAP.

II. METODOLOGÍA

El instrumento utilizado para realizar las mediciones de la radiación ultravioleta es un radiómetro con filtros multicanal GUV-541. La parte óptica de este tipo de instrumentos consiste típicamente de un difusor de teflón o de cuarzo, filtros interferenciales y detectores fotosensibles. El GUV-541 posee cinco canales de medición UV con longitudes de onda centrales en 305, 313, 320, 340 y 380 nm y un ancho de banda de 10 nm (FWHM) aproximadamente. El instrumento está estabilizado térmicamente a 50 °C, y las mediciones poseen una resolución temporal de un minuto. En la figura 1 puede observarse la modelización de las funciones respuestas gaussianas para cada filtro con FWHM de 10 nm superpuestas a un espectro solar típico en el rango UV.

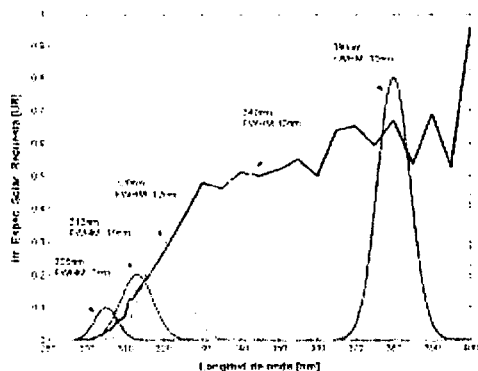


Figura 1. Respuesta espectral de los filtros de medición del GUV 541 del CEILAP y espectro solar típico.

Cabe destacar que las funciones respuestas reales de los filtros de este tipo de radiómetros multicanal son únicas de cada instrumento y se han detectado discrepancias significativas entre los valores medidos por este tipo de instrumento y las registradas por un espectro-radiómetro S100 de 1 nm de resolución, principalmente en el canal de 305 nm. Esto es debido principalmente a que este canal está lejos de ser monocromático y es también asimétrico con respecto a la longitud de onda central, ya que no existe una longitud de onda de corte efectiva hacia longitudes de onda menores⁽³⁾.

Las modelizaciones de la irradiancia espectral solar en superficie se llevaron a cabo con el modelo de transferencia radiativa TUV (Tropospheric Ultraviolet-Visible Model) desarrollado por Madronich et al⁽⁴⁾, el cual utiliza la aproximación del método two-stream en la cual la distribución angular de la intensidad (o

radiancia), está representada por una función simple que permite expresar la ecuación integro-diferencial de transferencia radiativa en términos matemáticamente resolubles, utilizando el esquema delta-Eddington⁽⁵⁾ para su resolución.

El modelo tiene como variables de entrada parámetros geográficos y temporales y columna total de ozono, además de poder incluir la atenuación producida por aerosoles y capas estratificadas de nubes de diferentes espesores ópticos.

III. RADIACIÓN UV GLOBAL, DIRECTA Y DIFUSA

La radiación que arriba desde el hemisferio superior sobre la superficie de un detector horizontal es llamada radiación global (G). Generalmente, ésta es la suma de una contribución del sol mismo, llamada radiación directa (S), y de una contribución desde el cielo llamada radiación difusa (D). La radiación difusa ha sido medida utilizando un disco sombreador que evita que la radiación directa llegue al sensor. De esta forma, y restando los valores de radiación global adyacentes a la medición de la radiación difusa, es posible estimar la componente directa.

Este proceso fue realizado para dos días, seleccionados con condiciones atmosféricas estables y cielos limpios, pudiéndose evaluar las tres componentes de la radiación y así explorar sus contribuciones relativas. Se muestran los resultados de las mediciones realizadas el 2 de mayo de 2003, a partir del mediodía solar y hasta el atardecer.

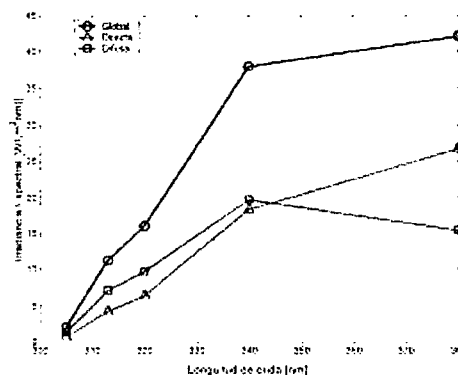


Figura 2. Irradiancia espectral global, difusa y directa para los cinco canales del GUV para el ángulo zenital 52°, hora local: 13:58

En la figura 2 se ha graficado los valores de las irradiancias espectral global, directa y difusa medida por los 5 canales del GUV en función de la longitud de onda para un ángulo zenital igual a 52°, cercano al mediodía solar para esta época del año en esta latitud. En la figura 3 se representa lo mismo para un ángulo zenital mayor, es decir cerca del atardecer ($\theta = 71^\circ$).

De estas figuras es posible observar cómo es la contribución de las componentes difusa y la directa a la radiación global en función de la longitud de onda y de la elevación solar. Debido a la dispersión molecular,

más intensa para longitudes de onda menores, la porción de la radiación difusa en la global se incrementa a menores longitudes de onda. Más aún, la contribución de la radiación difusa en la global crece con el ángulo zenital, debido a longitudes de caminos ópticos mayores.

En las figuras 4 y 5 se grafican la irradiancia espectral de los canales de 340 nm y 380 nm del GUV en función del ángulo zenital. Junto a cada valor medido se modelizó las componentes global, directa y difusa con el TUV. Es posible ver cómo el modelo ajusta razonablemente bien los valores medidos. Hay que destacar que la modelización se realizó con una atmósfera libre de aerosoles, lo cual no representa las condiciones reales del día elegido, aunque sí un valor aproximado, debido a la limpieza y visibilidad del mismo.

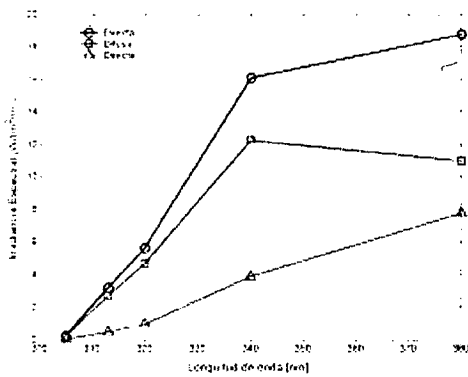


Figura 3. Irradiancia espectral global, difusa y directa para los cinco canales del GUV para el ángulo zenital 71°, hora local: 16:10.

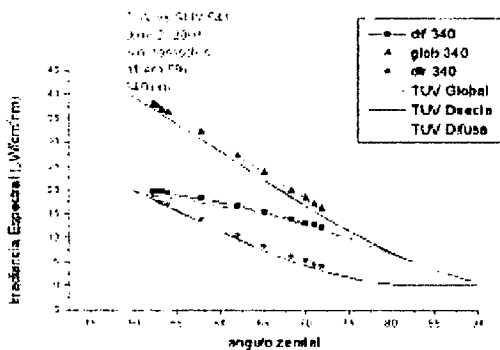


Figura 4. Irradiancia espectral en 340 nm en función del ángulo zenital directa, difusa y global. Modelización de las mismas con modelo TUV (líneas continuas)

En la figura 5 se observa, para esta época del año y en esta latitud, un ángulo zenital en el cual las componentes directa y difusa se igualan ($\theta^* = 67^\circ$) para el canal de 380 nm. Para ángulos zenitales menores (elevaciones mayores), la componente directa es mayoritaria, invirtiéndose el resultado para ángulos zenitales mayores que $\theta^* = 67^\circ$. Para el canal de 340 nm, y para

esta época del año y latitud, la componente difusa siempre es mayoritaria, con una contribución relativa a la radiación global incrementándose hacia ángulos zenitales crecientes, confirmando lo antes expresado (Figura 4).

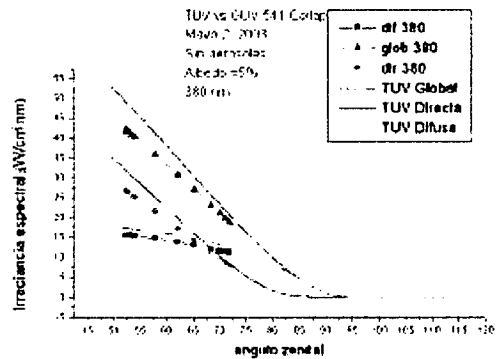


Figura 5. Irradiancia espectral en 380 nm en función del ángulo zenital directa, difusa y global. Modelización de las mismas con el modelo TUV (líneas continuas)

IV. ANÁLISIS DE LA ATENUACIÓN POR NUBES

Las nubes usualmente reducen la radiación UV, pero en presencia de superficies altamente reflectoras, estas reducciones pueden ser relativamente pequeñas, aún para coberturas nubosas espesas, debido al efecto de atrapado de la radiación entre la nube y la tierra. Las coberturas nubosas parciales son extremadamente difíciles de modelar, debido tanto a la naturaleza tridimensional inherente del problema, como a la enorme variedad de las diferentes morfologías de las mismas.

Un aspecto interesante de los cielos parcialmente nublados, es la posibilidad de obtener irradiancias superficiales más grandes que las obtenidas con cielos despejados, suponiendo los demás parámetros que afectan la radiación sin cambios. Aumentos de hasta el 30% han sido observados y han sido explicados por las reflexiones de los costados de las nubes⁽⁶⁾.

En el presente trabajo, se ha estudiado un evento de cielo parcialmente nublado con el registro del aumento de la irradiancia espectral en 380 nm de un 14% con respecto a las condiciones de cielo despejado. Este evento se produjo el 26 de febrero de 2003 a la hora 12:49 (Hora Local, 15:49 GMT) y fue producido por el borde de una nube tipo cumulus. Incrementos tan importantes que logran superar la "constante solar" (irradiancia solar extraterrestre) han sido medidos por Piacentini y colaboradores⁽⁷⁾ en la Puna de Atacama.

La irradiancia espectral medida por el canal de 380 nm del GUV instalado en el CEILAP para este día, conjuntamente con la modelización de la irradiancia para condiciones de cielo despejado, se muestran en la figura 6. El contenido integrado de ozono para ese día fue extraído de los datos TOMS/NASA, siendo de 255 DU. El espesor óptico de aerosoles se extrajo del radiómetro solar perteneciente a la red AERONET⁽⁸⁾,

instalado en el CEILAP, con un valor promedio para ese día en el canal de 340 nm de 0.39.

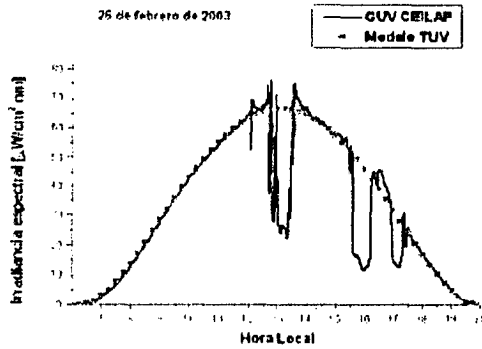


Figura 6. La irradiancia espectral medida por el canal de 380 nm del GUV y modelo TUV para el día 26/2/2003

El problema de ciclos parcialmente nublados puede ser examinado con un modelo que, aunque altamente simplificado, ilustra varios conceptos relacionados con la radiación difusa (dispersada). La radiación global es la suma de dos componentes,

$$G_0 = S_0 + D_0 \quad (1)$$

para cielos despejados,

$$G_1 = S_1 + D_1 \quad (2)$$

para cielos completamente cubiertos.

Las nubes atenúan los rayos solares directos de tal forma que S_1 es mucho más pequeña que S_0 (condición que se da principalmente para nubes de gran desarrollo vertical). Por otro lado, mucha de la radiación incidente en el tope de la nube es transmitida a través de ella como luz difusa, de tal forma que D_1 puede llegar a ser mayor que D_0 . Así, la base de la nube puede aparecer más brillante que la radiación difusa correspondiente a cielo claro, como frecuentemente lo confirma la experiencia directa. Nack y Green⁽⁹⁾ y Lantz et al.⁽¹⁰⁾ también notaron la posibilidad del incremento de la radiación para cielos parcialmente nublados, basados en una simple suposición en la cual la radiación total se estima por la superposición de las componentes S_0 , D_0 , S_1 y D_1 , en proporción a la fracción de cielo, c , que está cubierta por las nubes.

Siguiendo este modelo, podemos expresar la radiación global que llega a la superficie incrementada por las reflexiones en los bordes de la nube como:

$$G_c^{max} = S_0 + (1-c)D_0 + cD_1 \quad (3)$$

para el caso en que el sol no esté oculto. Haciendo uso de la ecuación 1, la ecuación 3 puede expresarse como:

$$G_c^{max} = G_0 + c(D_1 - D_0) \quad (4)$$

Utilizando este modelo, se calcularon los valores de S_0 y D_0 , así como los correspondientes para el cielo completamente cubierto (S_1 y D_1) eligiendo un

espesor óptico de nubes efectivo que ajuste al valor de irradiancia medido por el GUV, luego de que el sol es ocultado por la nube completamente. El espesor óptico efectivo debido a nube que mejor ajustó para este caso de estudio fue de $\tau_c = 14$ (Figura 7).

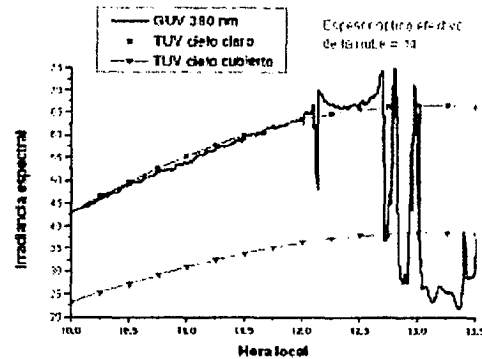


Figura 7. Ampliación de la zona de análisis. La línea continua corresponden a la irradiancia medida. La línea con cuadrados corresponde a la modelización sin nubes y la línea con triángulos corresponde a la modelización con una capa horizontal infinita de nubes (ver texto).

Luego, utilizando la ecuación 4 se calcularon las irradiancias globales máximas para tres valores de coberturas nubosas, $c=0.2$, $c=0.5$ y $c=0.9$, es decir 20, 50 y 90 %, respectivamente. Se observa cómo este simple modelo ajusta satisfactoriamente el incremento de la radiación medida, en este caso para $c=0.5$, correspondiente a un incremento del 14 % con respecto a la irradiancia de cielo claro (Figura 8).

V. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE AEROSOL

Es bien conocido que la suspensión de partículas de diferentes tamaños en la atmósfera produce atenuación de la radiación solar. Al igual que las nubes, los aerosoles manifiestan efectos que son relativamente independientes de la longitud de onda, aunque son mayores a longitudes de onda menores. Por lo tanto, la región UVB es seriamente afectada por los aerosoles. No obstante, la atenuación producida por el ozono y la dispersión molecular son mucho más importantes para esta región del espectro. Es por ello que es difícil aislar la influencia de los aerosoles sobre el flujo de radiación UVB.

Para ejemplificar la atenuación que producen estas partículas en suspensión, y en especial en las mediciones realizadas por el GUV 541, se ha seleccionado un día particular (14/04/03) en el cual se detectó un incremento considerable en el espesor óptico de aerosoles AOT, registrado por el fotómetro solar robotizado de la red AERONET de la NASA ubicado en el CEILAP.

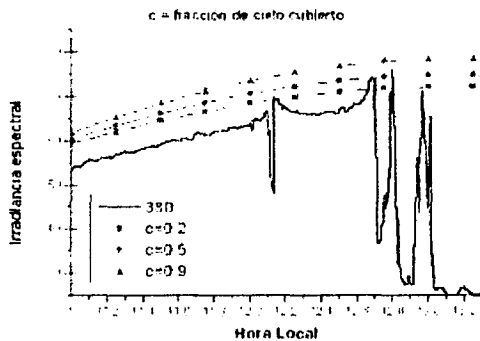


Figura 8. Modelización del incremento de la radiación por el efecto de la nube para diferentes coberturas nubosas

La figura 9 corresponde al registro del AOT para los diferentes canales de medición del fotómetro solar, en donde puede apreciarse el incremento del espesor óptico a medida que transcurren las horas del día, llegando a un máximo de AOT (340nm) = 0.4, alrededor de las 17 hs Hora Local (20:00 hs GMT).

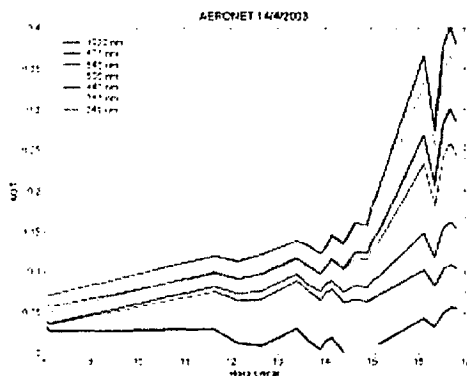


Figura 9. Espesor óptico de aerosoles AOT medido por el fotómetro solar de la red AERONET para las diferentes longitudes de onda entre 1020 nm (curva inferior) y 340 nm (curva superior)

En la figura 10 se ha graficado el canal de 340 nm medido por el GUV 541 del CEILAP, conjuntamente con la modelización de la irradiancia espectral con el modelo TUV para las condiciones de ese día (Ozono total = 253 DU), y diferentes valores de AOT para esta longitud de onda. Si bien el valor modelado que mejor ajusta, corresponde a un AOT mayor que el medido por el fotómetro solar para esa hora, el objetivo de este análisis es ejemplificar la morfología de la atenuación en un canal de UV del espectrorradiómetro, pudiéndose observar como éste tipo de apantallamiento es similar al que producen nubes tenues y altas como los cirrus, a diferencia de otro tipo de nubes más densas que generan bruscas variaciones de la radiación global en periodos de tiempo cortos.

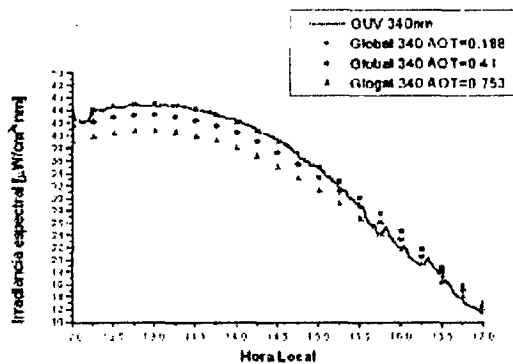


Figura 10. Modelización de la irradiancia espectral en superficie para tres espesores ópticos de aerosoles diferentes

VI. CONCLUSIONES

Se estudió la radiación UV que llega a la superficie terrestre a través del análisis de mediciones realizadas con un espectro-radiómetro multicanal con filtros de moderado ancho de banda, GUV 541. En particular, se seleccionaron días específicos de estudio considerados adecuados para ejemplificar el fenómeno analizado. Se pudo comprobar que la componente difusa es dominante, en esta época del año, para longitudes de onda cortas (UVB), siendo su relación con la radiación global, dependiente de la longitud de onda analizada y el ángulo zenital. Es de esperar que cuando los ángulos zenitales disminuyan, en las estaciones estivales, estos comportamientos varíen. Es de gran importancia recalcar la contribución de la componente difusa en la región UVB a la radiación global, y notar que podrían resultar dosis relativamente altas de radiación UVB a la sombra (y por ende relativo alto riesgo de exposición al Sol).

Se analizó y modeló el incremento de la radiación UV producido por nubes en cielos parcialmente cubiertos, pudiéndose arribar a interpretaciones satisfactorias de este fenómeno, obteniéndose un incremento de la radiación solar del 14% con respecto al esperado en iguales condiciones atmosféricas sin nubes presentes. Esto pone de manifiesto la importancia de maximizar los pronósticos de índices de radiación UV emitidos por los organismos oficiales (ver por ejemplo el pronóstico desarrollado en el Instituto de Física de Rosario (IFIR) y transmitido diariamente por el Servicio Meteorológico Nacional a través de su página web www.meteofa.mil.ar) en los periodos estivales, cuando las condiciones de máxima radiación, conjuntamente con nubes de gran desarrollo vertical y con coberturas parciales del cielo son más frecuentes.

Por último, se puso de manifiesto un caso típico de atenuación de la radiación UV producida por aerosoles atmosféricos en suspensión, corroborado por un fotómetro solar de la red AERONET-NASA ubicado junto al espectro-radiómetro de banda angosta GUV.

Se propone para futuros trabajos incrementar la sinergia entre estos dos instrumentos para profundizar el estudio de la distribución de la radiación UV producida por los aerosoles.

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto contó con el apoyo de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del subsidio PICT 6760 y de la JICA (Japan International Cooperation Agency).

REFERENCIAS

1. Frederick, J. E., H. E. Snell, and E. K. Haywood, *Photobiol.* 50:443-450 (1989)
2. Dahlback A., *Appl. Opt.* 35, 6514-6521 (1996)

3. Booth C, R., T. Mestechkina, and J.H. Morrow, *Ocean Optics XII*, J.S. Jaffe, ed. Proc. SPIE 2258, 654-663 (1994)
4. Madronich, S., TUV model. Web page: <http://www.acd.ucar.edu/TUV/>.
5. Joseph, S, W. Wiscombe, and J. Wienman, *J. Atmos. Sci.*, 33, 2452-2459, (1976)
6. Mims, F y J. Frederick, *Nature*, 371, 291, (1994)
7. Piacentini, R. D., A. Cede y H. Bárcena, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65/6, 727 - 731, (2003).
8. Holben, B.N., T.F. Eck and R.S. Fraser, *Remote Sens.* 12, 1147-1163, (1991)
9. Nack, M. y Green, *Appl. Opt.* 12, 2405-2415, (1974)
10. Lantz, K., R. Shetter, C.A. Cantrell, S. Floke, j. Calvert, and S. Madronich, *J. Geophys. Res.* 101, 14613-14629, (1996)