

## Reconstrucción de espectros de irradiancia solar global UV a partir de mediciones con radiómetro de banda angosta.

### Spectrum reconstructions of global solar UV irradiance using narrow band radiometer measurements

J. Salvador<sup>1,2</sup>, E. Wolfram<sup>2</sup>, J. Pedroni<sup>3</sup>, A. Rosales<sup>3</sup>, J. Tocho<sup>4</sup>, E. Quel<sup>2</sup>

1. Becario UNSAM-CONICET.

2. CEILAP (CITEFA-CONICET) Villa Martelli, Buenos Aires-Argentina.

3. Departamento de Física, Facultad de Ingeniería UNPSJB, Trelew, Chubut.

4. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP y CIOp (CONICET-CIC).

[jsalvador@citefa.gov.ar](mailto:jsalvador@citefa.gov.ar)

La medición de la región ultravioleta (UV) de la radiación solar ha sido motivo de sumo interés desde la aparición del fenómeno de adelgazamiento global de la capa de ozono. Diferentes propuestas tecnológicas fueron utilizadas para tal fin, desde radiómetros de banda ancha, hasta los costosos espectrorradiómetros. Los radiómetros de ancho de banda moderado (típicamente 10 nm) con canales centrados en las regiones UVA y UVB, son una solución intermedia entre las dos anteriores y están ampliamente distribuidos. En este trabajo se describe un método para realizar la reconstrucción del espectro UV entre 290 y 400 nm a partir de las mediciones de un instrumento de este tipo y de la utilización conjunta de un modelo de transferencia radiativa. A partir de la reconstrucción del espectro solar UV en superficie con una resolución de 1 nm es posible monitorear la estabilidad de los distintos canales de los radiómetros a lo largo del tiempo, y también calcular diferentes subproductos, como la irradiancia eritémica y el índice UV. Se presentan resultados para instrumentos GUV de Biospherical Instruments Inc., instalados en el país. También se comparan los valores de la radiación biológicamente efectiva (irradiancia eritémica) calculada por este método con la medida directa de diferentes biómetros de la estación de sensado remoto que el CEILAP tiene instalado en el sitio SOLAR en la ciudad patagónica de Rio Gallegos.

Palabras clave: ozono, radiómetro, irradiancia eritémica, índice UV.

The measurement of ultraviolet (UV) solar radiation has been a subject of great interest since the emergence of the global depletion of the ozone layer phenomenon. Different technological proposals were used to this purpose, from broadband radiometers to expensive spectroradiometers. Moderate bandwidth radiometers (typically 10 nm) with channels on regions UVA and UVB, are an intermediate solution between the two previous instruments, and they are widely distributed. This paper describes a method to carry out the reconstruction of the UV spectrum between 290 and 400 nm from measurements of this kind of instrument and the joint use of a radiative transfer model. From the reconstruction of UV solar spectrum in surface with a resolution of 1 nm it is possible to monitor the stability of the various channels of the radiometers over time, and also to calculate different subproducts, as erythemal irradiance and UV index. The results for GUV instruments from Biospherical Instruments Inc. installed in the country are presented. The values of biologically effective radiation (erythemal irradiance) calculated by this method with direct measurement from different biometers CEILAP has installed in the SOLAR site in the Patagonian city of Rio Gallegos, are also compared.

Key words: ozone, radiometer, erythemal irradiance, UV index.

#### I. INTRODUCCIÓN

Los radiómetros de ancho de banda moderados (entre 1 y 12 nm) usados frecuentemente en estudios de sensado remoto, son calibrados rutinariamente utilizando el método de exposición y contraste con estándares ópticos, compuestos de lámparas incandescentes. No obstante estos radiómetros son generalmente utilizados para medir irradiancias solares que poseen distribuciones espectrales que difieren significativamente de los espectros de las lámparas de calibración utilizados por la fábrica, por lo cual cuando estos instrumentos se utilizan para trabajar en regiones del espectro solar con grandes variaciones en intensidad en función de la longitud de onda como es el caso de la región UV de ese espectro, se pueden producir errores significativos en la medición, de más del 75% para el canal de 305 nm cuando son comparados con los medidos por un

espectrómetro de alta resolución<sup>1</sup>. En un intento de evitar estas diferencias, Biospherical Instruments implementa una calibración que consiste en combinar lámparas de calibración y calibraciones solares<sup>2</sup>, las cuales se realizan a través de la comparación directa con mediciones realizadas con un espectroradiómetro (SUV-100) con un ancho de banda de 1 nm.

El procedimiento estandarizado de comparación con lámparas produce buenos resultados si los canales calibrados tienen longitudes de ondas mayores que 320 nm, pero resultan problemáticos para longitudes de onda menores que este valor, ya que el espectro solar es radicalmente diferente del espectro de la lámpara de calibración.

Uno de los problemas frecuentes que se presentan con el mantenimiento y monitoreo de la estabilidad de estos instrumentos en países con bajos recursos radica en que no es posible reenviar los instrumentos a fábrica o

intercompararlos con patrones secundarios viajeros debido a que ambos procedimientos son costosos. Esta es la motivación fundamental de este trabajo, el cual a través de la utilización de un modelo de transferencia radiativa se obtiene un método alternativo de calibración y monitoreo de la estabilidad temporal de los filtros de estos instrumentos que, suelen degradarse con el tiempo.

## II. MÉTODO DE ANÁLISIS

En el presente trabajo, el instrumento utilizado para realizar las mediciones de la radiación ultravioleta es un radiómetro con filtros multicanal GUUV-541 fabricado por la compañía Biospherical Instruments, San Diego. La parte óptica de este tipo de instrumentos consiste típicamente en un difusor de teflón o cuarzo, filtros interferenciales y detectores fotosensibles. El GUUV-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 (figura 1). Este instrumento integra la Red de Monitoreo Solar Argentina (<http://www.dna.uba.ar>) y es parte de la estación de sensado pasivo del CEILAP en Río Gallegos, Pcia. de Santa Cruz.

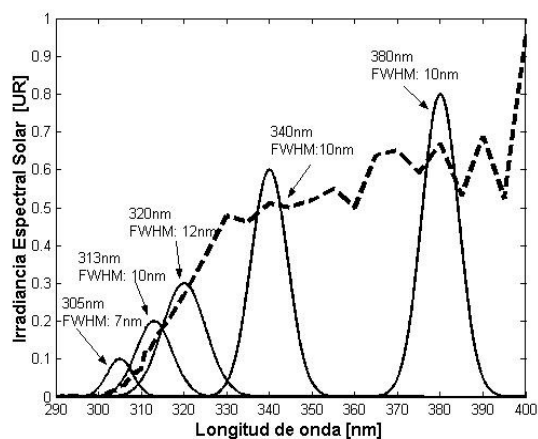


Figura 1: Representación esquemática de la ubicación y distribución espectral de los filtros de los 5 canales del Instrumento GUUV 541 de Biospherical Instrument.

La metodología aplicada en el presente trabajo para calibrar o pasar de voltajes a valores de irradiancia espectral, consiste en comparar las tensiones medidas por el instrumento en los 5 canales con las irradiancias modeladas<sup>3</sup>. Para ello el primer paso es seleccionar un conjunto de días despejados distribuidos durante el año, y armar juegos con valores que correspondan al mismo ángulo cenital, mezclando los distintos días. En el presente trabajo se tuvieron en cuenta doce ángulos cenitales entre 30° y 85° cada 5°. De esta forma, se asegura que la modelización de la atmósfera sea representada por las condiciones medias de los parámetros de entrada del modelo, como el albedo en superficie, y el contenido de aerosoles, que serán los mismos para todos los cálculos.

La modelización se realiza entonces para cada ángulo cenital, con el valor de ozono correspondiente al mismo, extraídos del instrumento OMI/AURA para la posición de Río Gallegos. Los espectros modelados se pesan con filtros gaussianos de FWHM 10 nm centrados en la longitud de onda de cada canal.

De esta forma se obtiene para cada ángulo cenital y para cada canal del GUUV,  $n$  valores de voltajes y  $n$  valores de irradiancias modeladas, con  $n$  igual al número de días. Los factores de calibración (FC) para cada canal en función del ángulo cenital son entonces calculados, ver Ecuación 1.

$$FC_{canal}(\theta) = \frac{V_{canal}(\text{volts}) - V_{offset}(\text{volts})}{I_{modelado}(\mu W / (cm^2.nm))} \quad (1)$$

## III. RESULTADOS

La figura 2 muestra el resultado de los factores de calibración (FC) en función del ángulo cenital, no considerando los ángulos cenitales por debajo de 30° debido a que a la latitud de Río Gallegos, la elevación máxima que alcanza el sol nunca es superior a 70°.

La variabilidad de los FC con la posición relativa del sol es evidente para los canales en el UVB, especialmente 305 nm. Este resultado está en acuerdo con los errores reportados para este tipo de instrumento en distintas condiciones atmosféricas.

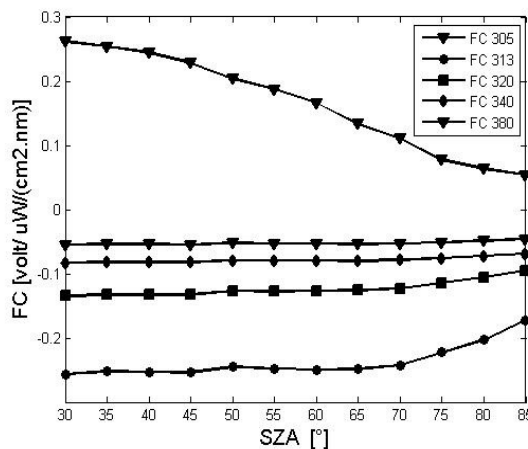


Figura 2: Factores de calibración (FC) para cada canal del GUUV 541 en función del ángulo cenital.

En la Tabla I se detallan los valores de los factores de calibración originales, es decir los provistos por la calibración de fábrica comparados con los valores de FC obtenidos por este método como promedio de los FC para todos los ángulos cenitales estudiados. Los errores relativos entre los FC originales y FC medios calculados por este método crecen monótonamente hacia canales con longitudes de onda menores, confirmando que las menores discrepancias entre el valor de calibración de fábrica y el método propuesto se encuentra en los canales del UVA. El error relativo crece al 79% para el canal de 305 nm considerado como la media de todos los SZA (ángulo solar cenital). Sin embargo si los FC calculados con el

método solo tienen en cuenta valores de ángulos cenitales hasta 40°, el error relativo disminuye considerablemente, alcanzando el 17% en 305 nm (Tabla II).

Tabla I

Canales	Scale Factor Biospherical Volt/ ( $\mu\text{W}/(\text{cm}^2.\text{nm})$ )	Scale Factor Método Volt/ ( $\mu\text{W}/(\text{cm}^2.\text{nm})$ )	Error Relativo (FCbios-FCmétodo) /FCmétodo
305	0.2973	0.1655	79.6%
313	-0.2558	-0.2374	7.7%
320	-0.1324	-0.1231	7.5%
340	-0.0811	-0.0785	3.3%
380	-0.0505	-0.0525	-3.8%

Comparación entre calibración obtenida desde Biospherical y la calculada a través del método propuesto considerando todos los ángulos cenitales (SZA).

Tabla II

Rango SZA	Scale Factor Biospherical Volt/ ( $\mu\text{W}/(\text{cm}^2.\text{nm})$ )	Scale Factor Método Volt/ ( $\mu\text{W}/(\text{cm}^2.\text{nm})$ )	Error Relativo (FCbios-FCmétodo) /FCmétodo
50°	0.2973	0.2386	24.6%
45°	0.2973	0.2472	20.3%
40°	0.2973	0.2534	17.3%

Comparación entre calibración obtenida desde Biospherical y la calculada a través del método propuesto considerando la media de los FC para ángulos cenitales desde 30° hasta 40°, 45° y 50° en el canal de 305 nm.

Una vez obtenidos los FC, se procedió a reconstruir el espectro. Para ello se generaron gráficos de dispersión entre los valores medidos por el GUV en los 5 canales y el espectro modelado para el mismo ángulo cenital y el contenido de ozono promedio de ese día (figura 3). Un ajuste de cuadrados mínimos de un polinomio de grado 4 se utilizó para pesar el espectro modelado con los valores medidos por el GUV, entre 305 y 380 nm, con el objetivo de poder ajustar el espectro modelado a los valores adquiridos por el GUV.

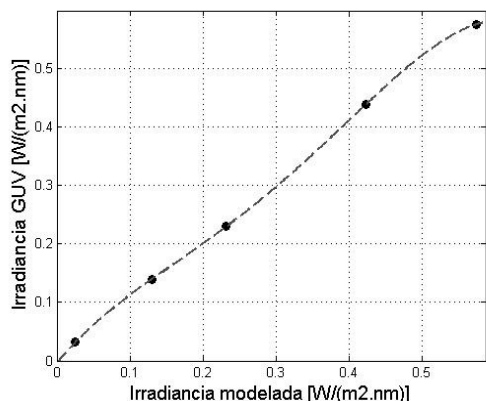


Figura 3: Gráfico de dispersión entre los valores medidos por el GUV y los modelados para las 5 longitudes de onda centrales de los filtros del GUV.

Una vez reconstituido el espectro UV total (figura 4), y debido a que no se posee de un espectrorradiómetro para evaluar la calidad del

espectro obtenido, se procedió a calcular la irradiancia eritémica. Para ello se realizó la convolución del espectro obtenido con la curva de respuesta de la piel CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) empleado como referencia internacional<sup>4</sup>, y luego integrado entre 290 y 400 nm.

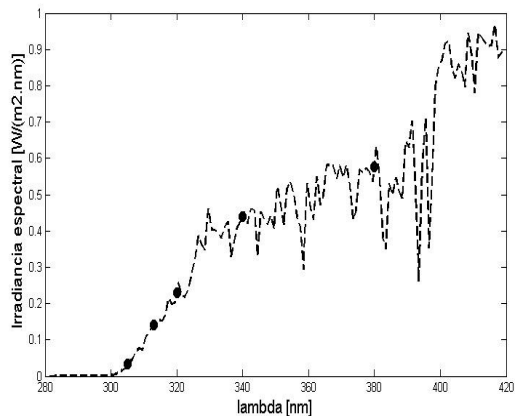


Figura 4: Espectro modelado con el modelo TUV con superposición de los valores medidos por el GUV 541 (círculos negros) en las 5 longitudes de onda para SZA=50°.

Este procedimiento se repitió para los distintos ángulos cenitales y se comparó con los valores del biómetro YES UVB1 instalado conjuntamente al GUV 541 en Río Gallegos. Los resultados pueden verse en las figuras 5 y 6 para los días 29 de septiembre de 2006 y 1 de febrero de 2007 respectivamente, mostrando un acuerdo aceptable dentro de la precisión de los instrumentos y el error del método de reconstrucción del espectro hasta 40°. Debido a que en el método de reconstrucción de espectros no son tenidos en cuenta los efectos de las nubes, la obtención de productos integrados como la dosis eritémica o el UVA solo son aplicables a días despejados. La comparación con el biómetro YES es aceptable, lográndose de esta forma ampliar las utilidades de un radiómetro como el GUV en la obtención de productos derivados.

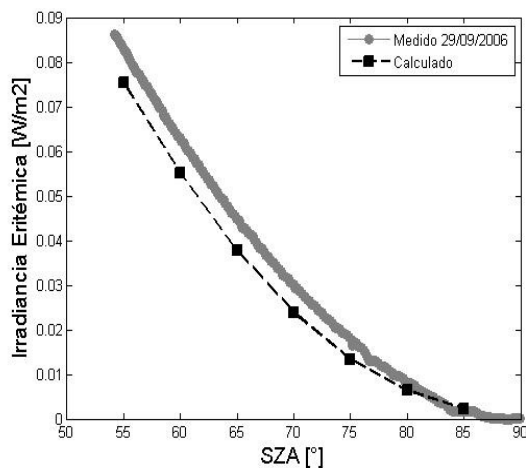


Figura 5: Comparación entre el biómetro YES y la irradiancia eritémica calculada a partir de la reconstrucción de espectro para septiembre 29, 2006.

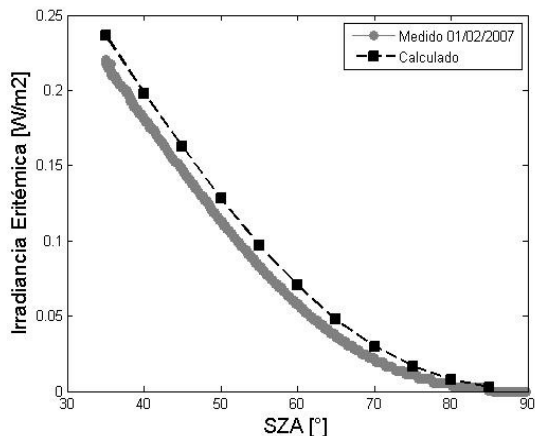


Figura 6: Comparación entre el biómetro YES y la irradiancia eritémica calculado a partir de la reconstrucción de espectro para Febrero 1, 2007.

#### IV. CONCLUSIONES

Se ha puesto en práctica un método para obtener los factores de calibración de instrumentos de ancho de banda moderado como son los radiómetros GUV, y reconstruir el espectro entre 290 y 400 nm. A través de este procedimiento es posible evidenciar la respuesta coseno que tienen los distintos canales, demostrando que los FC de los canales más en el UVB tienen grandes variaciones que discrepan del valor constante divulgado por la fábrica debido principalmente a la respuesta espectral de sus filtros, típicamente para el canal de 305 nm. Los errores relativos entre los FC de fábrica y los calculados llegan al 76% en el canal de 305 nm si todo el rango de ángulos cenitales es considerado, y disminuyen al 17% si solo se consideran en el cálculo de los FC, ángulos

cenitales hasta 40°. Debido a que en el método de reconstrucción de espectros no son tenidos en cuenta los efectos de las nubes, la obtención de productos integrados como la dosis eritémica o el UVA solo son aplicables a días despejados. La comparación con el biómetro YES es aceptable, lográndose de esta forma ampliar las utilidades de un radiómetro como el GUV en la obtención de productos derivados. Se pretende en el futuro sistematizar los métodos presentados para ser aplicados a otros instrumentos GUV 541 presentes en el país.

#### VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la JICA (Japanese International Cooperation Agency), Argentina, por la financiación de la campaña SOLAR, a UNSAM-CONICET por el sustento económico de uno de sus becarios, y al proyecto AURA de NASA por el suministro de datos del instrumento OMI.

#### VII. REFERENCIAS

- Booth, C. R. et. Al. , Errors in the reporting of solar spectral irradiance using moderate band-width radiometers and experimental investigation. Ocean Optics XII, J.S. Jaffe. Ed. Proc. SPIE 2258, (1994)
- Booth, C. R. et. Al. “ A new profiling Spectroradiometer Optimized for use in the Ultraviolet”. SPIE Vol. 1750, Ocean Optics XI, pp. 354-365, 1992.
- Madronich, S., TUV model. Webpage: <http://www.acd.ucar.edu/TUV/>.
- McKinlay A.F, Diffey B. A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. CIE J. 6, 17-22, 1987.