
Determinación de parámetros atmosféricos procedentes de medidas de irradiancia espectral para su aplicación en modelos de calidad del aire

Alberto Pettazzi*, José Antonio Souto González

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Compostela.

C/ Lope Gómez de Marzoa, s/n, Campus Sur, Santiago de Compostela, 15782 (La Coruña) España.

Determination of Atmospheric Parameters from Spectral Irradiance Measurements for its Application in Air Quality Models

Determinació de paràmetres atmosfèrics procedents de mesures d'irradiancia espectral per a la seva aplicació en models de qualitat de l'aire

Recibido: 20 de noviembre de 2007; revisado: 11 de febrero de 2008; aceptado: 10 de marzo de 2008

RESUMEN

Con el objetivo de investigar los procesos de la radiación ultravioleta (UV) en la atmósfera y su impacto en la calidad del aire se ha dotado a la Estación de Observación de la Atmósfera de Santiago de Compostela (EOAS) de un radiómetro multifiltro, que proporciona medidas espectrales de irradiancia en seis longitudes de onda dentro del espectro UV

Basándose en los trabajos de Stamnes *et al.* (1991) y Dahlback (1996) y mediante la aplicación de un modelo de transferencia radiativa, se ha desarrollado un procedimiento para la determinación de los valores de columna total de ozono y de columna de agua líquida, de interés como parámetros de entrada en modelos de calidad del aire.

Los resultados obtenidos han sido validados utilizando distintas metodologías, dependiendo del parámetro derivado. En todos los casos, las tendencias de los valores estimados mediante la metodología descrita concuerdan con las obtenidas a partir de los parámetros de contraste empleados.

Palabras clave: Calidad del aire. Medidas de ozono. Modelización UV.

SUMMARY

Focused in the study of UV radiation processes in the atmosphere and its impact on air quality, a multifilter radiometer has been installed in the Site for Atmospheric Observation of Santiago de Compostela. This radiometer provides spectral measurements of irradiance in six wavelengths in the UV spectrum.

Following the works of Stamnes *et al.* (1991) and Dalback (1996) and applying a radiative transfer model, a procedure for the total column of ozone and the liquid water column calculation was developed, as these parameters are significant in air quality models.

Depending on the derived parameter, results were validated using different methodologies. In all cases, the trends of the estimated quantities by this methodology agree with the measurements obtained by specialized instruments.

Key words: Air quality. Ozone measurements. UV modelling.

RESUM

Amb l'objectiu d'investigar els processos de la radiació ultravioletada (UV) en l'atmosfera i el seu impacte en la qualitat de l'aire, s'ha dotat a l'Estació d'Observació de l'Atmosfera de Santiago de Compostela (EOAS) d'un radiòmetre multifiltre, que proporciona mesures espectrales d'irradiancia a sis longituds d'ona dintre de l'espectre UV.

Basant-se en els treballs de Stamnes *et al.* (1991) i Dahlback (1996), i mitjançant l'aplicació d'un model de transferència radiativa, es desenvolupa un procediment per a la determinació dels valors de columna total d'ozó i de columna d'aigua líquida, d'interès com a paràmetres d'entrada en models de qualitat de l'aire.

Els resultats obtinguts es validen utilitzant diferents metodologies, depenent del paràmetre derivat. En tots els casos, les tendències dels valors estimats mitjançant la metodologia descrita concorden amb les obtingudes a partir dels paràmetres de contrast emprats..

Mots clau: Qualitat de l'aire. Mesures d'ozó. Modelatge UV.

* Tel.: +34 981 563 100 Ext. 16770

E-mail: mrtepx@usc.es, jasouto@usc.es

INTRODUCCIÓN

La transmisión de la radiación solar en la región UV entre 280 nm y 315 nm a través de la estratosfera está fundamentalmente determinada por la cantidad total de ozono. En la troposfera (Jacobson, 2002), la atenuación se debe esencialmente a la difusión por las moléculas de aire (difusión Rayleigh) y por las nubes (partículas de agua o hielo). Alteraciones de la cubierta de nubes en la troposfera afectan a la penetración de la radiación UV.

La radiación UV de tipo B (280-315 nm) incide a nivel de la troposfera favoreciendo la aparición de oxidantes fotoquímicos y contaminantes atmosféricos altamente perjudiciales, como el propio ozono troposférico, que pueden causar irritaciones en el aparato respiratorio y daños en la vegetación.

A partir de la segunda mitad del siglo XX (Jacobson, 1999), se han desarrollado los modelos de calidad del aire que relacionan, mediante algoritmos matemáticos, las emisiones de contaminantes con las concentraciones que éstos alcanzan en el aire cuando llegan a los posibles receptores. Si están correctamente calibrados, estos modelos proporcionan una relación directa entre fuente y receptor (Martínez Ataz *et al.*, 2004). Por lo tanto, resulta fundamental aportar un conjunto de datos de entrada lo más preciso y completo posible (Schwander *et al.*, 1997).

En el caso de modelos de calidad del aire a escala global y continental, los datos de entrada relacionados con la meteorología incluyen la columna total de ozono y parámetros que caracterizan la cubierta nubosa, como la columna de agua líquida y el espesor óptico de nubes. Estos datos se pueden obtener de modelos meteorológicos, de medidas de satélite o de medidas en superficie. Estas últimas destacan por su elevada precisión y resolución, ya que permiten monitorizar las variables atmosféricas en intervalos temporales reducidos.

Con el objetivo de investigar los efectos de la radiación UV-B en la atmósfera y su impacto en la calidad del aire se ha dotado a la Estación de Observación de la Atmósfera de Santiago de Compostela (EOAS) (Pettazzi *et al.*, 2006) de un radiómetro GUV 2511 (Biospherical Instruments Inc., San Diego, California). Por medio de la metodología expuesta en los trabajos de Stamnes *et al.* (1991) y Dahlback (1996) y mediante la aplicación del modelo de transferencia radiativa FastRT (Engelsen *et al.*, 2005), se ha desarrollado un procedimiento operativo para la determinación de los valores de columna total de ozono, columna de agua líquida y espesor óptico de nubes a partir de las medidas de irradiancia espectral proporcionadas por el radiómetro. Los parámetros que se derivan no solo pueden emplearse como entrada en los modelos de calidad de aire, sino

encuentran utilidad en modelos meteorológicos y de transferencia radiativa. Así, a partir de los valores de la columna total de ozono es posible deducir la concentración de ozono troposférico, según la metodología expuesta por Fishman *et al.* (2003).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos a partir de las medidas recopiladas en Santiago de Compostela durante los años 2005 y 2006. Los valores de la columna total de ozono se han comparado con los proporcionados por los Satélites Earth Probe y OMI del programa TOMS (<http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>) de la agencia espacial estadounidense (NASA). Los valores de la columna de agua líquida se han comparado con la evolución diaria del Índice Ultravioleta. La evaluación abarca los años 2005 y 2006.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 Radiómetro GUV 2511

El radiómetro GUV 2511 (Fig. 1) es un dispositivo para la medida de la radiación UV en superficie; pertenece a la clase de instrumentos llamados "radiómetros de múltiples longitudes de onda". Se trata de un instrumento único en su género, apto para monitorizaciones de radiación UV a largo plazo (Webb, 2003), que mide simultáneamente valores espectrales de irradiancia en seis longitudes de onda (305, 313, 320, 340, 380, 395 nm) dentro del espectro UV. Un séptimo canal aporta la radiación visible fotosintética. El dispositivo ha sido calibrado por medio del estándar de irradiancia espectral referenciable del NIST (Nacional Institute of Standards and Technology) de 100 W tipo FEL. La recogida de los datos medidos por el GUV 2511 se realiza a través de un software, proporcionado por la empresa fabricante, instalado en un ordenador PC conectado al controlador de temperatura del sensor por medio de un cable serie RS-232.

2.2 Columna de ozono y cubierta nubosa

A partir de las medidas de irradiancia espectral del GUV 2511 es posible derivar distintos parámetros meteorológicos e, incluso, relacionados con la calidad del aire. El cálculo de estos parámetros se realiza utilizando la metodología expuesta en los trabajos de Stamnes *et al.* (1991) y Dahlback (1996).

Para derivar la columna total de ozono, este método se basa en la comparación de los valores de irradiancia en dos longitudes de onda distintas, una que es apreciablemente absorbida por el ozono, y la otra que no lo es. Se han considerado, por ello, las irradiancias a 305 nm y 340 nm, que es o no absorbida por el ozono, respectivamente.

Por lo tanto, es necesaria la aplicación de un modelo de transferencia radiativa que permita construir una tabla sintética de los ratios entre las dos irradiancias, para distintos valores de ozono, en función del ángulo cenital solar (SZA).

A partir del ratio entre los valores de irradiancia medidos y del valor del ángulo cenital asociado al instante de la medida, se busca en la tabla el valor de ozono más próximo al punto de coordenadas (SZA, ratio), como se muestra en Fig. 2.



Figura 1. El radiómetro GUV 2511 (a) y su instalación en la Estación de Observación de la Atmósfera de Santiago (b).

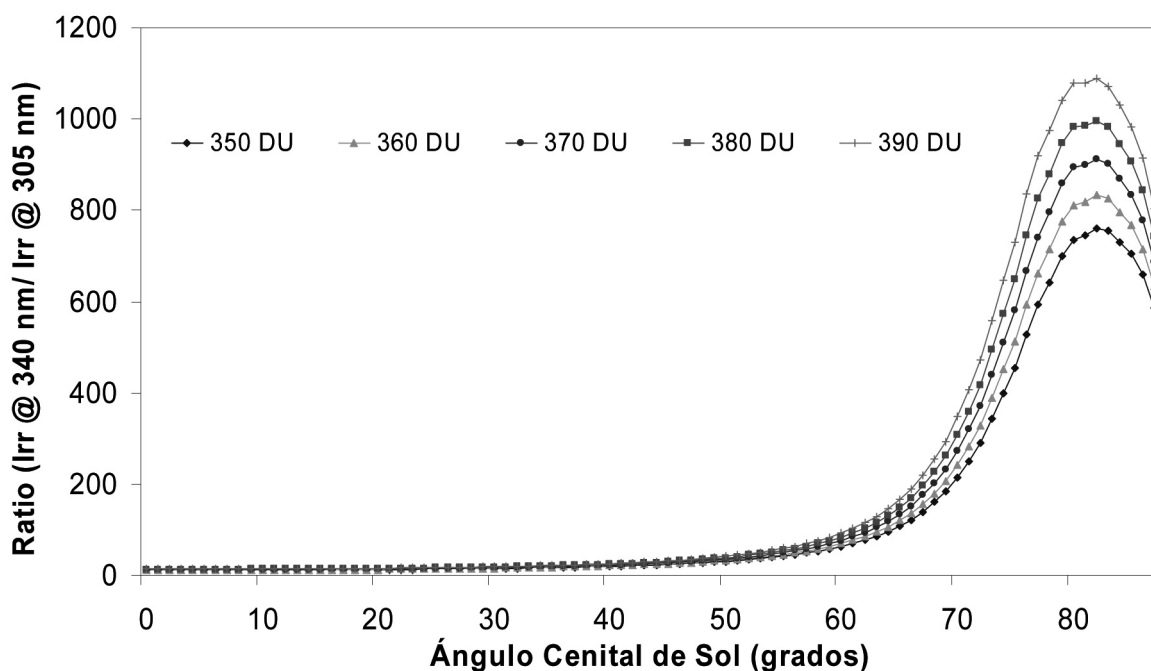


Figura 2. Ilustración esquemática de la tabla sintética para derivar los valores de la columna total de ozono.

El método propuesto resulta, en una primera aproximación, insensible a la presencia de nubes y de aerosoles en la atmósfera, pues estos dos componentes actúan de la misma manera sobre las dos longitudes de onda consideradas.

Se define columna de agua líquida como la cantidad de agua contenida en las nubes en una imaginaria columna vertical con sección unitaria. El trabajo de Stamnes *et al.* (1991) permite calcular el espesor óptico de las nubes a partir de medidas espectrales de irradiancia. Basándose en este método, se plantea la estimación de la columna de agua líquida, en lugar del espesor óptico, ya que ambos parámetros son directamente proporcionales (<http://zardoz.nilu.no/~olaeng/fastrt/fastrt.html>).

El método de Stamnes representa una aproximación del efecto que las nubes ejercen sobre la radiación UV. Es evidente que este efecto depende del tipo de nubes, de su altura y morfología; sin embargo, si no se dispone de esta información, se puede cuantificar la influencia de las nubes sobre la radiación que alcanza el suelo comparando la irradiancia medida con su valor para cielo despejado, de manera análoga al método anteriormente expuesto. Por ello, se ha de considerar la irradiancia asociada a una longitud de onda donde la absorción por el ozono es mínima: por ejemplo, a 340 nm.

Los resultados así obtenidos se han de interpretar como si el cielo estuviese uniformemente cubierto por una nube caracterizada por los valores de columna de agua líquida obtenido.

2.3. Medidas operativas

Los valores de columna total de ozono y de columna de agua líquida se calculan de forma automática y en tiempo real por medio de un programa implementado en lenguaje FORTRAN, instalado en el ordenador situado en la EOAS. El programa se ejecuta a intervalos diezminutales programados.

Las tablas necesarias para deducir los valores de ozono y de cubierta nubosa (columna de agua líquida) se han construido previamente utilizando como modelo de transferencia radiativa el FastRT (Engelsen *et al.*, 2005). La efica-

cia del FastRT en la modelización de la radiación UV que alcanza la superficie terrestre en Galicia ha sido verificada en trabajos anteriores (Pettazzi *et al.*, 2004).

Las tablas se han construido variando el ángulo cenital (Iqbal, 1983) para cada valor de concentración de ozono y de columna de agua líquida, asumiendo una visibilidad constante de 20 km. Este valor resulta acorde con las medidas históricas disponibles para cielo despejado.

Siguiendo las indicaciones de la empresa fabricante (Bernhard, 2005), de Stamnes (1991) y de Dalback (1996) para derivar los parámetros deseados con buena precisión, se han considerado solo medidas de irradiancia espectral asociadas a SZA inferiores a 60 grados.

3. RESULTADOS

La recogida de medidas operativas de irradiancia para deducir la columna de ozono, la columna de agua líquida y el UVI comenzó a mediados de abril de 2005. De acuerdo con experiencias anteriores (Biospherical Instruments Inc., 1998), se estabilizó la temperatura del GUV 2511 a 50 °C.

En la Fig. 3 se representa la evolución de la columna total de ozono para el periodo 26 de abril-27 de octubre 2005. Los valores medios diarios deducidos a partir de las medidas del radiómetro han sido comparados con las medidas de ozono proporcionados por los satélites TOMS Earth Probe y OMI.

Como se puede observar, el ozono deducido a partir del radiómetro es sistemáticamente mayor que el medido por los satélites TOMS, aunque las tendencias sean las mismas.

A fin de corregir este error sistemático, inicialmente se ha focalizado la atención sobre la tabla sintética creada. Para averiguar la exactitud de la tabla, se han usado los datos de irradiancia medidos por la red de monitorización UV de la Nacional Science Fundation (NSF-UV). Estos datos, disponibles a través de su página web (<http://www.biospherical.com/nsf/login/update.asp>), proceden de radiómetros

GUV situados en distintos lugares del globo. A través de las medidas de estos radiómetros, se han deducido por medio de la tabla sintética los valores de ozono correspondientes y comparados con los proporcionados por la red de monitorización UV. Los resultados, obtenidos analizando los datos procedentes de la estación de San Diego (California) el día 12 de marzo de 2006, se ilustran en la Fig. 4. Se puede observar que la concordancia entre los valores de ozono calculados por la red de monitorización UV y los derivados con la tabla sintética es muy bueno, dentro de la resolución de la tabla sintética. Estos resultados permitieron descartar como causa de las diferencias entre estimación y medida posibles fallos en la construcción de la tabla sintética para deducir los valores de ozono.

El problema se ha expuesto a los técnicos de la empresa fabricante del radiómetro que aconsejaron estabilizar la temperatura del GUV 2511 a 40 °C (Bernhard, comunicación personal, 2006). En la Fig. 5 se ilustran los valores de ozono deducidos del instrumento estabilizado a la nueva temperatura. Estos valores han sido comparados con los proporcionados por los satélites del programa TOMS. A pesar del reducido conjunto de valores disponibles, se puede notar una sensible mejora en la calidad de los datos. Las discrepancias que aún persisten se deben al hecho de que una concordancia perfecta (error menor de 1-2%) se alcanza solo en días despejados (Mayer, 1998; Mayer, comunicación personal, 2005), y este periodo de análisis se caracterizó por la presencia de nubes. Aún se podrían mejorar los resultados con una calibración más precisa del radiómetro y su comparación con las medidas con las de un espectrorradiómetro (Bernhard, comunicación personal, 2006). Dicha calibración permitiría derivar valores de ozono con buena precisión, también cuando el sol está próximo al horizonte. Los valores de la columna de agua líquida han sido evaluados comparando la evolución diaria de los valores de la columna de agua líquida con la evolución diaria del Índice Ultravioleta (UVI). Este parámetro, creado por la Organización Mundial de la Salud y la Organización Meteorológica

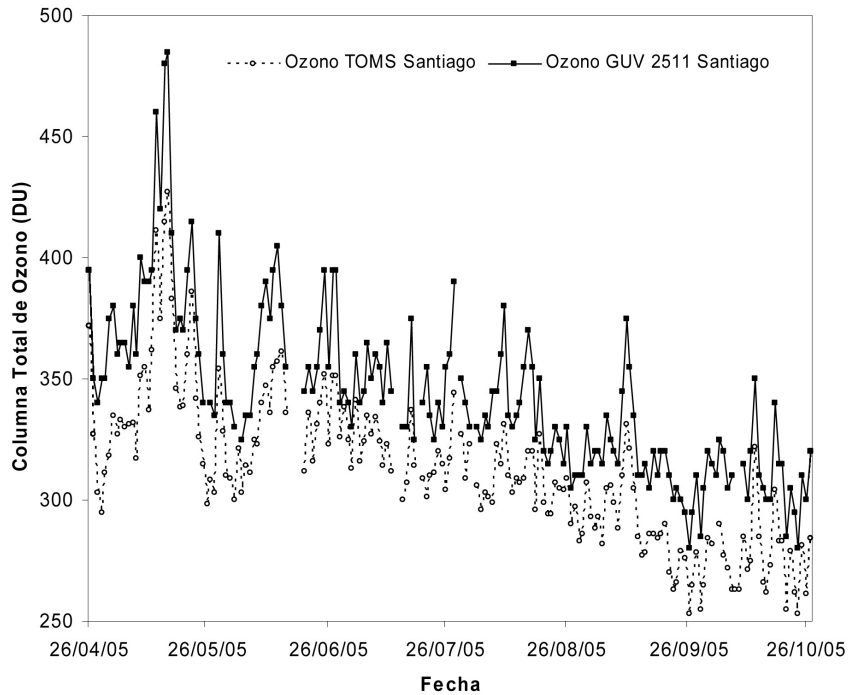


Figura 3. Evolución anual de la columna total de ozono en Santiago de Compostela. Comparación entre el ozono deducido por el radiómetro GUV 2511 y el ozono medido por los satélites TOMS.

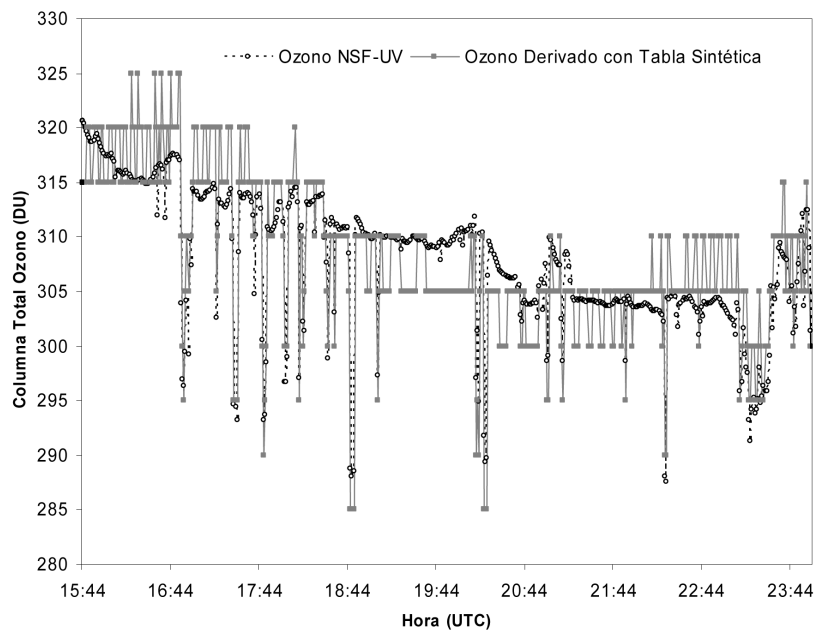


Figura 4. Comparación de la columna total de ozono medida por la red de monitorización de la red NSF-UV y deducida por medio de la tabla sintética.

lógica Mundial (Organización Mundial de la Salud, 2002), considera solo el rango UV de la radiación solar incidente, rango que mide el radiómetro GUV 2511. Las medidas de UVI se han llevado a cabo por medio de un radiómetro UV de banda ancha SL 501 A (Solar Light, Glenside, PA, USA) que ha sido calibrado en el año 2006 en el World Radiation Centre de Davos (Suiza) en el ámbito de la Acción COST 726.

La Figura 6-a representa los resultados obtenidos para un típico día de verano; como se puede observar, existe una buena correlación entre el UVI y la columna de agua líquida: tanto la evolución a lo largo del día del Índice UV como los bajos valores de columna de agua líquida, que se mantienen prácticamente constantes, se corresponden con un día despejado.

La presencia de nubes incrementa los valores de columna de agua líquida, tal como se observa en la Figura 6-b; en esta se muestra el caso de un día despejado en el que progresivamente va aumentando su cobertura nubosa. Se observa el efecto de esta cobertura nubosa en el UVI, al provocar una variación más irregular y una disminución del Índice a medida que varían las condiciones nubosas.

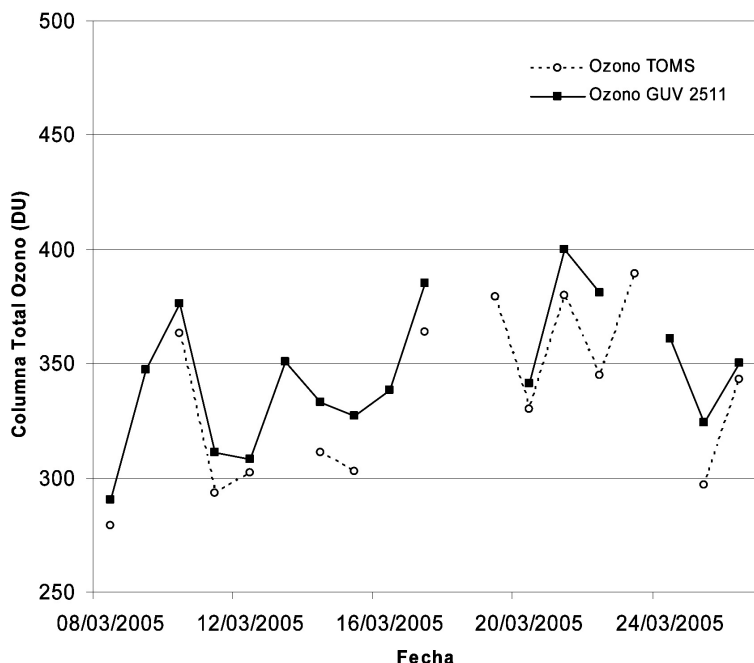


Figura 5. Evolución de la columna total de ozono estimada en Santiago de Compostela.

6. CONCLUSIONES

Basándose en los métodos de Stamnes *et al.* (1991) y de Dahlback (1996), se ha elaborado un procedimiento operativo para la recogida de datos de un sensor GUV2511 y estimación en tiempo real de columna total de ozono y de la columna de agua líquida.

Los primeros resultados expuestos en este trabajo validan dichos métodos en Santiago de Compostela, lo que permite estimar de forma rápida parámetros meteorológicos de notable importancia en el análisis de la calidad del aire. Además, los valores de ozono y de cubierta nubosa derivados se pueden aplicar como parámetros de entrada en los modelos de transferencia radiativa, para obtener con buena precisión el espectro completo de irradiancias UV. Los primeros resultados evidenciaron la importancia de una calibración precisa del radiómetro GUV2511 para

garantizar que las medidas fuesen derivadas lo más correctas posible. Una calibración más precisa también permitiría extender las estimaciones de ozono, cubierta nubosa y UVI a alturas solares menores, por debajo de los 60°.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Ola Engelsen (Norwegian Institute for Air Research, NILU), Bernhard Mayer (Instituto Aeroespacial Alemán, DLR), Germar Bernhard y Michael Holas (Biospherical Instruments, Inc.), por compartir su experiencia y conocimientos durante el desarrollo de este trabajo.

El contrato de investigación de Alberto Pettazzi ha sido financiado dentro del Convenio de Colaboración «MeteoGalicia», financiado por la Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible de la Xunta de Galicia, con la colaboración de la Universidad de Santiago de Compostela.

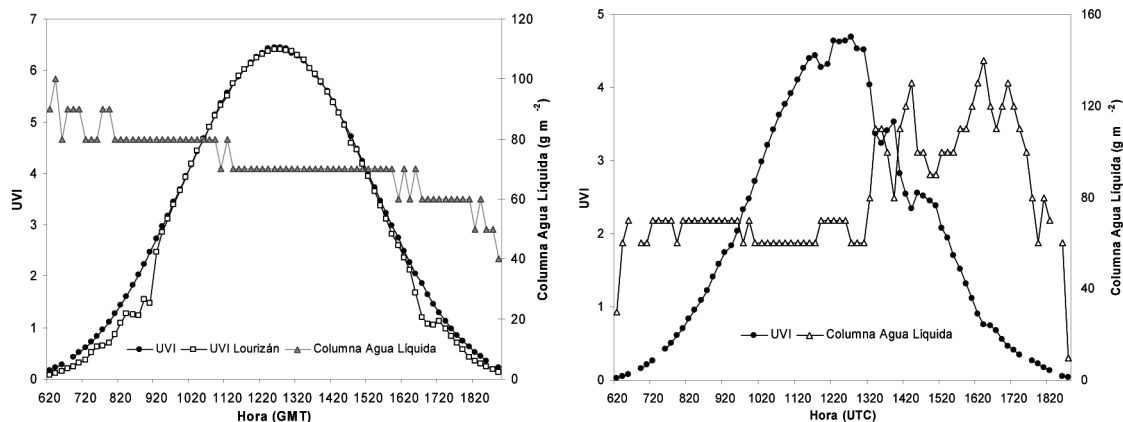


Figura 6. Evolución diaria de la columna de agua líquida vs. Índice UV: (a) día despejado (9 de Julio 2005) y (b) día con cubierta nubosa creciente (13 de Abril 2005).

BIBLIOGRAFÍA

Bernhard, G.; Booth, C.R.; Ebrahimian, J.C., 2005: *Real-time ultraviolet and column ozone from multichannel UV radiometers deployed in the National Science Foundation's ultraviolet monitoring network*. *Optical Engineering*, 44, 04101 (1-11).

Bernhard, G., 2006: *Spectral Response*. Comunicación Personal.

Biospherical Instruments Inc., 1998: *GUV data processing and quality control procedures*.

Dahlback, A., 1996: *Measurements of biologically effective UV doses, total ozone abundances, and cloud effects with multichannel, moderate bandwidth filter instruments*. *Applied Optics*, 35, 6514-6521.

Engelsen, O.; Kylling, A., 2005: *Fast simulation tool for ultraviolet radiation at the earth's surface*. *Optical Engineering*, 44, 041012 (1-7).

GUV 2511 High speed ground-based Ultraviolet radiometer User's manual. Biospherical instruments Inc., San Diego, California.

Página web oficial del modelo de transferencia radiactiva FastRT: <http://zardoz.nilu.no/~olaeng/fastrt/fastrt.html>

Página web de la Red de monitorización UV de la Nacional Scientific Foundation (NSF-UV) <http://www.biospherical.com/nsf/login/update.asp>

Hu, Y.-X.; Stamnes, K., 1993: *An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models*. *J. Climate*, 6(4), 728-742.

Iqbal, M., 1983: *An introduction to solar radiation*. Academic Press, San Diego.

Jacobson, M.Z., 1999: *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Jacobson, M.Z., 2002: *Atmospheric Pollution*. Cambridge University Press, Cambridge.

Logger, Data acquisition software, software manual. Biospherical instruments Inc., San Diego, California.

Martínez Ataz, E.; Díaz de Mera Morales, Y., 2004: *Contaminación Atmosférica*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, Cuenca.

Mayer, B.; Seckmeyer, G.; Kylling, A., 1997: *Systematic long-term comparison of spectral UV measurements and UVSPEC modeling results*. *Journal of Geophysical Research*, 102, D7, 8755-8767.

Mayer, B.; Kylling, A.; Madronich, S.; Seckmeyer, G., 1998: *Enhanced absorption of UV radiation due to multiple scattering in clouds: experimental evidence and theoretical explanation*. *Journal of Geophysical Research*, 103, D23, 31241-31254.

Mayer, B., 2005: *A question on ozone retrieval method* (by Stamnes, 1991). Comunicación personal.

Pettazzi, A.; Montero, P.; Balseiro, C.; Souto, J.A.; Pérez Muñozuri, V., 2004: *Evaluation of a radiative transfer model for UVI operational forecast in Galicia (Spain)*. Proceeding of European Geosciences Union 1st Assembly. Nice (France), 24-29 April 2004.

Pettazzi, A.; Souto, J.A.; Salsón, S., 2006: *EOAS, a shared joint atmospheric observation site of MeteoGalicia*. Proceedings of 4th ICEAWS - International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, Lisboa, Portugal.

Schwander, H.; Koepke, P.; Ruggaber, A., 1997: *Uncertainties in modelled UV irradiances due to limited accuracy and availability of input data*. *Journal of Geophysical Research*, 102, D8, 9419-9429.

Stamnes, K.; Slusser, J.; Bowen, M., 1991: *Derivation of total ozone abundances and cloud effects from spectral irradiance measurements*. *Applied Optics*, 30, 4418-4426.

Urback, F., 1989: *Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer*. *Photochemistry and Photobiology*, 50, 507-513.

Webb, A., 2003: *UV instrumentation for field and forest research*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 120, 27-38. World Health Organization. Global solar UV Index. WHO, 2002 (Fact Sheet, No. 271).