

Estimación de la irradiancia UV eritemática integrada incidente en planos verticales, mediante el modelo SMARTS2

G. Derouet¹, M. P. Utrillas¹, V. Estellés¹, A. R. Esteve¹, M. J. Marín², J. L. Gómez-Amo¹ y J. A. Martínez-Lozano¹

¹Grupo de Radiación Solar, Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia

²Departament de Matemàtiques per a l'Economia i l'Empresa, Universitat de València, Avda. Tarongers s/n, 46022 Valencia

Recibido: 17-V-2010 – Aceptado: 29-IX-2010 – Versión original

Correspondencia a: jmartine@uv.es

Resumen

Se ha utilizado el modelo SMARTS2 para estimar la irradiancia UV eritemática (UVER) integrada sobre un plano horizontal y sobre planos verticales orientados a norte y sur. Los valores obtenidos mediante el modelo se han comparado con los datos experimentales proporcionados por tres radiómetros YES-UVB-1 situados sobre estos planos. Para cuantificar los resultados se han considerado los parámetros estadísticos desviación media, desviación absoluta media y error cuadrático medio (RMSD). Los resultados sobre un plano horizontal muestran valores del RMSD de aproximadamente 10%, cuando se trabajaba con espesor óptico de aerosoles a 500 nm, y de 16%, cuando se trabajaba con el coeficiente β de Ångström. En cuanto a los resultados obtenidos para los planos norte y sur, alcanzan errores muy altos. El RMSD en estos casos es del 20,5% para el plano sur y del 32,5% para el plano norte, en el caso más favorable de que se disponga de valores del espesor óptico para cuantificar la cantidad de aerosoles. Estos resultados no mejoran ni considerando una evolución anual, teniendo en cuenta las distintas estaciones del año, ni considerando distintos períodos a lo largo del día. Por lo tanto consideramos que el SMARTS2 no es adecuado para estimar la UVER incidente sobre planos inclinados.

Palabras clave: irradiancia UV eritemática (UVER), planos verticales, modelo SMARTS2

1 Introducción

El efecto de la radiación ultravioleta sobre los seres vivos ha merecido la atención de los investigadores en los últimos treinta años (Frederick y Lubin, 1988; Scotto et al., 1988), llevando a recomendaciones acerca de la exposición a los rayos UV en orden a evitar daños agudos o crónicos (WMO, 1998; ICNIRP, 2004). De todos los efectos que la radiación UV provoca en los seres humanos, el más común es el eritema, o quemadura solar. En 1987 la *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE, 2000) adoptó una curva estándar de eritema (McKinlay y Diffey, 1987) que es la que se recomienda para determinar la radiación ultravioleta eritemática (UVER). Esta UVER se calcula convolucionando la curva estándar de eritema propuesta por la CIE (también denominada espectro de acción eritemático) con la radiación solar incidente a nivel del suelo.

Las medidas de irradiancia eritemática incidente sobre una superficie horizontal no constituyen, sin embargo, el método más adecuado para estimar la dosis real que reciben las personas. Para estudios dosimétricos es fundamental el cálculo de la radiación UVER sobre superficies inclinadas. Por desgracia existen pocos registros de medidas de UVER en planos distintos al horizontal, aunque algunos trabajos muestran que la UVER global incidente sobre un plano perpendicular al Sol llega a ser un 27% mayor que la incidente sobre uno horizontal (Parisi y Kimlin, 1999). Webb et al. (1999) realizaron medidas de UVER espectral sobre planos verticales para distintos planos azimutales a lo largo de un día (18 de agosto de 1995). La influencia de la topografía y la reflectividad del suelo han sido estudiadas también por Weihs (2002), quien obtiene que en algunas condiciones topográficas específicas la intensidad incidente en planos inclinados puede ser mayor que en superficies horizontales.

Ante esta falta de datos experimentales es preciso recurrir al uso de modelos que permitan estimar la UVER incidente en planos inclinados. Estos modelos están basados en distintas aproximaciones para resolver la ecuación de transferencia radiativa en la atmósfera. Pueden ser modelos de dispersión múltiple o de dispersión simple. Los modelos de dispersión múltiple, como su nombre indica, consideran una atmósfera multidispersiva, y normalmente resuelven la ecuación de transferencia radiativa aplicando el modelo de ordenadas discretas DISORT (Chandrasekhar, 1950). Modelos de este tipo, en el rango UV, son el SBDART (*Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer*) (Ricchiuzzi et al., 1998) o el UVSPEC (*UV Spectral*) (Meyer et al., 1997).

Los modelos de dispersión simple, también llamados espectrales rápidos, consideran que la atmósfera está constituida por una sola capa, es decir que es homogénea vertical y horizontalmente, y en ella se produce únicamente dispersión simple. Un ejemplo de este tipo de modelos es el SMARTS2 (*Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*) (Gueymard, 1995; 2005a), que además tiene la opción de proporcionar directamente UVER espectral sobre plano horizontal. Este modelo ha sido previamente utilizado por los autores para estimar la radiancia espectral global sobre un plano horizontal (Utrillas et al., 1998). En este trabajo se utiliza este modelo para estimar la UVB espectral incidente sobre dos planos verticales, norte y sur, a lo largo de un año. Posteriormente esta UVB se convolucionada con el espectro de acción eritemático, para obtener la UVER espectral. Finalmente esta irradiancia espectral se integra para disponer de valores de UVER integrada sobre planos verticales.

Recientemente el Grupo de Radiación Solar de Valencia ha puesto en funcionamiento una estación de medida de UVER integrada en la Facultad de Física (Utrillas et al., 2009). Los datos experimentales de esta estación han servido para validar los valores estimados mediante el SMARTS2. Como indicadores estadísticos de la precisión de la estimación se han tomado la desviación media (MBD), la desviación absoluta media (MAD) y la desviación cuadrática media (RMSD).

2 El modelo SMARTS2

El modelo SMARTS2 es un modelo de dispersión simple desarrollado en lenguaje FORTRAN, de libre acceso (<http://www.nrel.gov/rredc/smarts/>). Calcula la irradiancia espectral directa y difusa tanto en el plano horizontal como en planos inclinados. Está limitado a días despejados, no admitiendo la posibilidad de introducir nubosidad. La versión empleada en este trabajo, SMARTS2.9.5, dispone de una interfaz que permite fácilmente elegir entre diez tipos de atmósfera estándar, o una propia introducida por el usuario. El modelo dispone de albedos espectrales, así como datos de los coeficientes de absorción de los principales componentes atmosféricos. Ofrece la posibilidad de calcular medidas integradas de todo el rango espectral de la radiación solar (entre

Tabla 1. Valores mensuales del espesor óptico de aerosoles (AOD) a 500 nm y del coeficiente β de Ångström utilizados.

Mes	AOD (500 nm)	β de Ångström
Enero	0,127	0,050
Febrero	0,128	0,051
Marzo	0,103	0,044
Abril	0,129	0,053
Mayo	0,193	0,104
Junio	0,187	0,069
Julio	0,231	0,101
Agosto	0,208	0,092
Septiembre	0,199	0,091
Octubre	0,274	0,177
Noviembre	0,095	0,040
Diciembre	0,086	0,041

280 y 4000 nm), dosis eritemática, índice UV y otras medidas ponderadas con diferentes espectros de acción. Dispone de hasta siete espectros extraterrestres propuestos por distintos autores y uno propuesto por el propio autor del modelo SMARTS2 (Gueymard, 2005b), que es una combinación que engloba a los más utilizados en la bibliografía.

Este modelo se caracteriza por la multitud de opciones que considera en los parámetros de entrada. Como ejemplo cabe destacar que propone hasta nueve modelos diferentes de aerosoles: los cuatro tipos propuestos por Shettle y Fenn (1979), y los cinco propuestos por la *Standard Radiation Atmosphere* (WMO, 1986). Para una mayor información sobre el SMARTS2 puede consultarse el manual del usuario (Gueymard, 2005b).

3 Dispositivo experimental

Para estudiar los efectos de la irradiancia UVER sobre planos distintos al horizontal, se ha diseñado y puesto en funcionamiento una estación de medida instalada en la Facultad de Física de Valencia y que cuenta con seis radiómetros de banda ancha UVB-1 de YES. Las medidas se han llevado a cabo en el Campus de Burjassot (Valencia), que se encuentra situado a 39,5°N de latitud, 0,418°W de longitud y a 40 m de altura sobre el nivel del mar y donde los obstáculos del horizonte no superan la altura de 4°, con excepción de una pequeña banda en el noroeste (Esteve et al., 2006). Uno de los radiómetros mide la UVER global en el plano horizontal. Otro, tiene acoplada una banda de sombra anclada en unos brazos cuya inclinación es igual a la latitud. Dicha banda impide que la radiación proveniente directamente del Sol incida sobre el detector del aparato, por lo que realiza medidas de irradiancia difusa, también en el plano horizontal (Utrillas et al., 2007). Los otros cuatro instrumentos restantes toman medidas de irradiancia global sobre planos verticales, en las orientaciones norte, sur, este y oeste (Figura 1). En este trabajo sólo se han utilizado las medidas obtenidas con dos de estos cuatro radiómetros, los orientados al norte y al sur. En



Figura 1. Dispositivo experimental para medida de la radiación ultravioleta eritemática (UVER) en planos verticales (vista parcial).

la Figura 2 se ha representado la evolución de los valores de la UVER a las 12 GMT incidente sobre el plano horizontal y sobre los planos verticales norte y sur, para el periodo de medida considerado (año 2008).

El YES UVB-1 es un radiómetro de banda ancha, cuyo intervalo espectral es 280-400 nm. Utiliza filtros de vidrio coloreado y un fósforo sensible a la UVB. La luz visible, excepto una pequeña fracción en el rango de la luz roja, es absorbida por un primer filtro, un vidrio negro que transmite sólo UV. La luz transmitida a través del filtro impresiona al fósforo, sensible a la UVB. Este material absorbe la componente UVB y reemite esta luz en luz visible, predominantemente en longitudes de onda correspondientes al verde. Un segundo filtro de vidrio verde deja pasar la luz fluorescente procedente del fósforo mientras que absorbe la luz roja que puede haberse transmitido a través del primer filtro negro. La intensidad de la luz fluorescente es medida por un fotodiodo de estado sólido.

La salida del YES-UVB-1 es una señal analógica en voltios. Para convertirla en unidades de irradiancia se utiliza un factor de conversión que viene dado por el cociente entre la energía medida por el detector con una respuesta de coseno espectral ideal y la energía medida por el UVB-1. En la práctica, este factor se determina tomando el cociente entre la irradiancia total UVB y el valor de la señal de salida del instrumento UVB-1 en el tiempo de medida. Este factor de conversión depende del intervalo espectral considerado y del ángulo cenital.

La respuesta espectral del instrumento puede cambiar con el tiempo, variando la transmitancia del primer filtro, por lo que es necesario recalcularse los factores de conversión. Esto es en realidad una recalibración del instrumento y se realiza periódicamente. Los radiómetros YES UVB-1 utilizados para las medidas de UVER de este trabajo se calibran anualmente en la Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo” perteneciente al INTA (Instituto Nacional de

Técnica Aeroespacial) que depende del Ministerio de Defensa. Esta calibración implica actuaciones de laboratorio así como medidas de campo, realizando un análisis de la desviación del espectro de acción eritemático de la CIE, así como una intercomparación con un espectrorradiómetro Brewer (Vilaplana et al., 2006).

En primer lugar se mide la respuesta espectral relativa del radiómetro (RSE) para compararla con la respuesta del espectro eritemático de la CIE, de manera que una respuesta ideal sería aquella cuyo cociente entre ambas fuera la unidad. La matriz dada por la Ecuación 1, cuantifica la medida en que la irradiancia, pesada por la RSE del instrumento, se aparta de la irradiancia eritemática, pesada por el espectro de acción eritemático de la CIE en función del ángulo cenital solar y del contenido total de ozono.

La irradiancia espectral (I) necesaria para hallar dicha matriz se obtiene con el modelo de transferencia radiativa TUV (*Tropospheric Ultraviolet and Visible Radiation Model*) (Madronich, 1987).

$$ADA(\theta, O_3) = \frac{\int_{\lambda} I \cdot CIE \cdot d\lambda}{\int_{\lambda} I \cdot RSE \cdot d\lambda} \quad (1)$$

En segundo lugar se realiza una intercomparación a la intemperie con el espectrorradiómetro Brewer MKIII#150. Mediante esta intercomparación se observa que la señal del radiómetro es proporcional a la irradiancia integrada del espectrorradiómetro, lo que permitirá calcular la irradiancia eritemática. El resultado final es otra matriz, (Figura 3), que dependerá del ángulo cenital solar y de la columna total de ozono.

Con esto se reduce el error coseno de las medidas hasta un máximo de 4,2%. Esta caracterización del error coseno está incluida en la matriz de calibración del radiómetro. De este modo, la incertidumbre relativa al error angular en las medidas del radiómetro transformadas en unidades físicas mediante esta matriz será en todos los casos inferior al 4,5%.

Para determinar el espesor óptico de los aerosoles (AOD) se utiliza un Cimel CE318. Este es un fotómetro solar diseñado para la medida autónoma y automática de la radiancia solar directa y de cielo, convertido en el estándar de la red AERONET (Holben et al., 1998) para la medida de aerosoles. El fotómetro consta básicamente de: a) una caja electrónica de control, b) un robot, consistente en dos motores eléctricos que controlan las coordenadas azimutal y zenital y c) un cabezal más unos colimadores. La cabeza sensora se encuentra a su vez equipada con un doble colimador de 1,2° de ángulo de visión (*Field of View*, FOV).

El sistema sensor lo constituyen dos fotodiodos de silicio dedicados a la medida de radiancia directa y de cielo. La selección de las longitudes de onda se realiza por medio de filtros interferenciales insertados en una rueda de filtros con hasta nueve posiciones. Las longitudes de onda básicas son 440, 670, 870, 940 y 1020 nm; el ancho de banda o *Full Width at Half Maximum* (FWHM) depende del canal, aunque varía entre 2-40 nm según la región del espectro (Estellés et al., 2007).

Tabla 2. Resultados de la comparación del modelo SMARTS2 con los valores experimentales obtenidos para el año 2008 en los planos horizontal, orientado al norte y orientado al sur, usando como parámetro de entrada de aerosoles: espesor óptico de aerosoles a 500 nm y coeficiente β de Ångström. N pares de valores utilizados en la comparación.

Aerosoles Indicador estadístico	AOD a 500 nm			β de Ångström		
	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)
Plano horizontal (N = 7312)	-0,8	6,9	10,3	-0,6	10,3	15,8
Plano norte (N = 7312)	-24,6	25,1	32,5	-23,5	25,8	33,4
Plano sur (N = 3346)	-5,9	14,9	20,5	-5,2	17,3	24,5

Tabla 3. Resultados de la comparación del modelo SMARTS2 con los valores experimentales obtenidos para el año 2008 en los planos horizontal, orientado al norte y orientado al sur, según las distintas estaciones del año. Parámetro de entrada de aerosoles: espesor óptico de aerosoles a 500 nm y coeficiente β de Ångström. N pares de valores utilizados en la comparación. (*) Sin datos experimentales.

	Aerosoles Indicador estadístico	AOD a 500 nm			β de Ångström		
		MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)
Verano	Plano horizontal (N = 2186)	4,3	8,7	11,9	7,4	13,3	20,1
	Plano norte (N = 2186)	-22,4	23,0	29,0	-17,1	25,1	31,0
	Plano sur (N = 1105)	1,4	14,6	19,7	4,7	19,1	27,2
Invierno	Plano horizontal (N = 1570)	-6,1	6,4	7,3	-8,0	8,9	9,9
	Plano norte (N = 1570)	-28,3	28,3	31,8	-28,7	28,7	32,3
	Plano sur (*) (N = 0)	-	-	-	-	-	-
Primavera y otoño	Plano horizontal (N = 3556)	-2,7	6,1	9,5	-3,4	9,1	14,0
	Plano norte (N = 3556)	-25,4	25,8	33,7	-25,5	26,1	34,1
	Plano sur (N = 2240)	-9,4	15,4	21,2	-9,6	16,9	23,7

4 Metodología y resultados

El modelo SMARTS2 se ha empleado para obtener valores cinco-minutales de UVB global horizontal, que se toma como referencia, y valores de UVB sobre planos verticales orientados a norte y sur. La frecuencia de estos valores viene dada por la frecuencia de nuestros valores experimentales. Hay que señalar, como ya se ha indicado, que el modelo SMARTS2 no calcula irradiancia eritemática integrada inclinada, sino valores espectrales de ultravioleta. Estos valores espectrales de UVB se convolucionan con la curva del espectro de acción eritemático para obtener UVER espectral, y posteriormente se integran para calcular la UVER integrada. El modelo se ha utilizado sólo para días claros, debido a que no se considera la nubosidad.

En el algoritmo se ha introducido el modelo del perfil en altura de una atmósfera estándar correspondiente a la *Mid-Latitude*, alternativamente en su versión Winter (otoño-invierno) o Summer (primavera-verano), donde se incluyen, para diferentes alturas, los valores de presión, temperatura y humedad relativa. Como modelo de aerosoles, en base a los resultados obtenidos previamente para Valencia (Utrillas et al., 1998), se han utilizado los valores correspondientes al modelo urbano (SU) de la *Standard Radiation Atmosphere* (SRA) (WMO, 1986). Estos valores se han normalizado a las características locales mediante el espesor óptico de

aerosoles a 500 nm o el valor del coeficiente β de Ångström, proporcionados por el Cimel CE318, situado en la terraza del bloque C de la Facultad de Física en Burjassot. En la Tabla 1 se indican los valores mensuales del espesor óptico de aerosoles a 500 nm y del coeficiente β de Ångström utilizados. Para el ozono se han tomado los valores diarios del OMI (*Ozone Monitoring Instrument*), sensor a bordo del satélite Aura de la NASA. Como albedo del suelo se ha utilizado el valor medido de 0,1, obtenido previamente por los autores, para el rango UV (Utrillas et al., 2010).

Los valores obtenidos mediante el modelo se han comparado con los datos experimentales proporcionados por tres radiómetros YES-UVB-1, situados sobre los planos horizontal, vertical orientado al norte y vertical orientado al sur. Estos radiómetros se encuentran en la misma terraza que el radiómetro Cimel. Para validar el modelo se han utilizado los datos registrados en estos tres planos durante los días claros del año 2008. Para seleccionar estos días claros se ha utilizado el índice de claridad modificado k'_t , que presenta la ventaja con respecto al índice de claridad de disminuir la dependencia con el ángulo cenital solar, y se define como (Pérez et al., 1990):

$$k'_t = \frac{k_t}{1,031e^{-1,4/(0,9+9,4/m)} + 0,1} \tag{2}$$

donde k_t es el índice de claridad (I/I_0) y m es la masa óptica. Se han elegido aquellos datos cuyo $k'_t > 0,7$, que

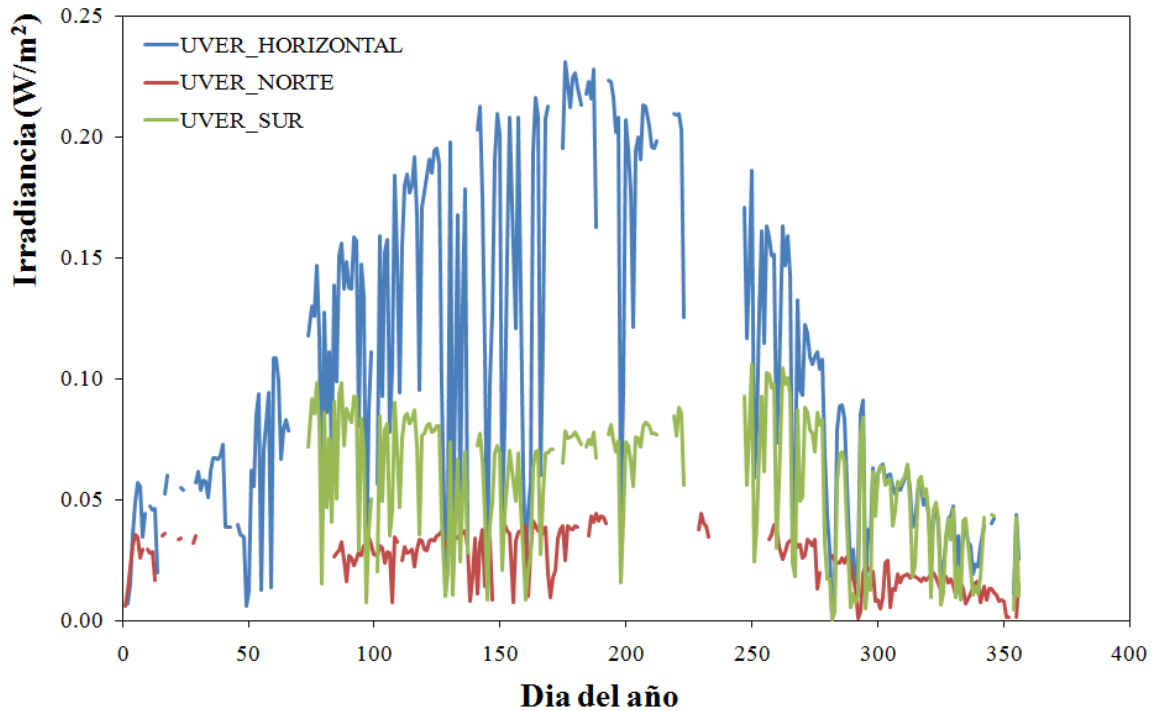


Figura 2. Evolución de los valores de la UVER a las 12 GMT, incidente sobre el plano el horizontal y sobre los planos verticales norte y sur, para el periodo de medida considerado (año 2008).

es un criterio usualmente utilizado para seleccionar datos sin nubosidad (Serrano et al., 2010).

Para cuantificar los resultados del estudio se han considerado los parámetros estadísticos: desviación media (MBD), desviación absoluta media (MAD) y error cuadrático medio (RMSD) relativos. Estos vienen dados por las ecuaciones:

$$MBD = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N \bar{x}} \quad (3)$$

$$MAD = 100 \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|}{N \bar{x}} \quad (4)$$

$$RMSD = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N \bar{x}}} \quad (5)$$

Siendo:

- y_i : valor estimado de UVER i -ésimo
- x_i : valor experimental de UVER i -ésimo
- \bar{x} : valor experimental medio diario de UVER
- N : número de pares de valores (experimentales y estimados) de UVER utilizados

Tanto el MBD como el MAD y el RMSD así definidos son adimensionales, y se expresan en %. En la Tabla 2 se

recogen los resultados correspondientes a los datos cinco-minutales de todo el período considerado (días claros del año 2008) utilizando para cuantificar los aerosoles tanto el AOD a 500 nm como el coeficiente β de Ångström. Los resultados de la UVER sobre plano horizontal sirven de comparación con los resultados obtenidos previamente para irradiación global sobre un plano horizontal en el rango 300 nm a 1100 nm (Utrillas et al., 1998). En este caso se obtuvo un RMSD 5,4% (cuando se trabajaba con espesor óptico de aerosoles a 500 nm) y de 6,4% (cuando se trabajaba con el coeficiente β de Ångström). En el rango UV estos errores prácticamente se duplican, especialmente los referidos a los valores obtenidos utilizando el coeficiente β de Ångström. Esto es debido a que el SMARTS2 no funciona de manera totalmente adecuada en el rango UV, como indica su propio autor que considera que introduce un error del 20% en dicho rango (Gueymard, 1995). La razón de esta diferencia de funcionamiento estriba en el intervalo espectral utilizado en este caso, que únicamente es de 280 a 400 nm. En este intervalo la dispersión adquiere una importancia mucho mayor, por lo que es preciso una caracterización más detallada de los aerosoles, además de tener que tener en cuenta la multidispersión, cosa que el SMARTS2 no hace, ya que es un modelo monodispersivo.

En cuanto a los resultados obtenidos para los planos norte y sur, ambos subestiman la UVER incidente sobre ellos

Tabla 4. Resultados de la comparación del modelo SMARTS2 con los valores experimentales obtenidos para el año 2008 en los planos horizontal, orientado al norte y orientado al sur, según las distintas estaciones del año, para distintos periodos del día. Parámetro de entrada de aerosoles: espesor óptico de aerosoles a 500 nm. *N* pares de valores utilizados en la comparación. (*) Sin datos experimentales.

Periodo Aerosoles	Indicador estadístico	10 h a 14 h UTC AOD a 500 nm			Antes de 10 h UTC AOD a 500 nm			Después de 14 h UTC AOD a 500 nm		
		MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)
Todo el año	Horizontal(N = 7312)	-0,7	6,8	9,7	2,4	6,6	9,9	-4,4	7,3	9,8
	Norte (N = 7312)	-28,8	29,2	33,8	-18,5	18,9	24,5	-18,6	19,1	23,8
	Sur (N = 3345)	-5,2	15,0	18,5	1,2	11,0	15,9	-16,8	18,3	23,0
Verano	Horizontal (N = 2186)	5,1	8,7	10,8	7,7	9,6	13,9	-1,7	7,2	9,5
	Norte (N = 2186)	-26,9	27,4	29,5	-14,6	16,0	30,0	-18,0	18,1	22,7
	Sur (N = 1105)	2,2	14,6	17,2	11,0	13,8	20,0	-11,9	14,9	20,5
Invierno	Horizontal (N = 1570)	-5,9	6,1	6,5	-5,9	6,0	6,6	-6,9	8,2	9,5
	Norte (N = 1570)	-31,4	31,4	31,8	-22,1	22,1	23,9	-21,4	21,4	23,8
	Sur (*) (N = 0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Primavera y otoño	Horizontal (N = 3556)	-2,7	6,0	9,1	0,5	5,4	8,0	-5,6	7,2	9,9
	Norte (N = 3556)	-29,5	29,9	35,5	-19,7	19,8	25,7	-18,8	19,5	24,2
	Sur (N = 2240)	-8,7	15,7	19,4	-3,3	9,8	14,4	-19,8	20,5	24,5

(MBD negativo), siendo mucho mayores los errores correspondientes al plano norte que al plano sur. Es de señalar que en todos los planos se obtienen mejores resultados cuando se usa el AOD de 500 nm que cuando se usa el coeficiente β de Ångström.

Los resultados se han agrupado estacionalmente, teniendo en cuenta nuevamente como parámetro indicador de la cantidad de aerosoles el espesor óptico y el coeficiente β de Ångström. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en esta agrupación, que considera separadamente los valores correspondientes a verano, invierno y primavera-otoño. Hay que indicar que el radiómetro situado en el plano sur tuvo un problema de funcionamiento en invierno y no hay bastantes datos experimentales para obtener valores significativos estadísticamente. Los demás valores siguen las mismas tendencias que se observaban cuando se consideraban conjuntamente. Sobre el plano horizontal se tienen valores del RMSD que oscilan entre 7% y 12%, y sobre los planos verticales se observa que, excepto para el plano sur en verano, el modelo subestima los valores experimentales, con valores del RMSD que oscilan entre el 29% y el 34% para el plano norte y entre el 20% y el 21% para el plano sur considerando para la simulación el espesor óptico de aerosoles a 500 nm. Al igual que antes, los errores obtenidos usando el coeficiente β de Ångström son sensiblemente mayores que los obtenidos usando el AOD a 500 nm, especialmente en verano. En cuanto al MBD se observa que existe un cambio de signo desde la estación de verano a la de invierno. Esto puede deberse a la gran diferencia de turbiedad existente en Valencia durante las dos estaciones (cómo puede verse en la Tabla 1). Durante los meses de verano el espesor óptico de aerosoles es máximo, aumentando más todavía la cantidad

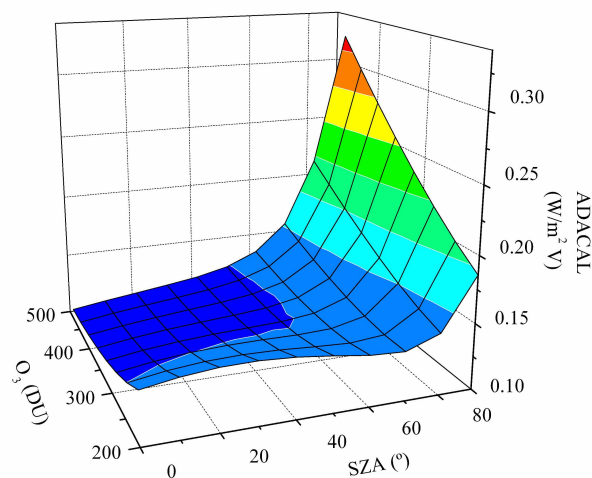


Figura 3. Matriz de calibrado para el radiómetro UVB-1. ADACAL es el factor de calibrado para cada valor de ozono (O_3) y ángulo cenital (SZA).

de radiación difusa en la atmósfera, con lo cual es más difícil modelizarla. En este caso la mayor parte de los valores experimentales están por debajo de los valores modelizados lo que hace que al final el conjunto sobreestime las medidas. En el invierno, la turbiedad es menor y en la mayor parte de los casos el proceso se invierte.

Por último, dada la importancia que la UVER adquiere en las horas centrales del día (Martínez-Lozano et al., 2002), se han agrupado los resultados que proporciona el modelo en tres periodos diarios, alrededor del mediodía (de 10 h a 14 h

UTC), y antes (hasta las 10 h) y después de este intervalo temporal (después de las 14 h), todo ello considerando la división estacional establecida anteriormente. A la vista de los resultados anteriores, para este análisis se han considerado únicamente los valores obtenidos utilizando como indicador de la cantidad de aerosoles el AOD a 500 nm. En la Tabla 4 se resumen los resultados de la comparación con los valores experimentales. Los resultados no muestran ninguna tendencia nueva. Son aceptables, como en los casos anteriores, para el plano horizontal, pero sobre los planos norte y sur se tienen errores considerables, con RMSD del orden del 23% al 36% para el plano norte y del 14% al 25% para el plano sur.

5 Conclusiones

El modelo SMARTS2 es un modelo desarrollado para determinar la irradiancia espectral sobre un plano horizontal en todo el rango espectral de la radiación solar (280–4000 nm). También es válido para determinar la irradiancia espectral sobre planos verticales en dicho rango espectral.

En este caso se ha empleado para determinar la irradiancia eritemática (UVER), tanto sobre un plano horizontal como sobre planos verticales orientados al norte y al sur. Los resultados sobre un plano horizontal se pueden considerar aceptables obteniéndose, para la comparación con los valores experimentales, valores del RMSD relativo de 10,3%, cuando se trabajaba con espesor óptico de aerosoles a 500 nm, y de 15,8%, cuando se trabajaba con el coeficiente β de Ångström. En cuanto a los resultados obtenidos para los planos norte y sur, alcanzan desviaciones muy altas. El RMSD relativo en estos casos es del 20,5% para el plano sur y del 32,5% para el plano norte, en el caso más favorable de que se disponga de valores del espesor óptico para cuantificar la cantidad de aerosoles.

Estas desviaciones medias son mucho mayores que las que se obtienen cuando el modelo se aplica a planos horizontales y en el rango de la radiación visible. En este caso se obtienen valores del RMSD del orden del 5% al 7%, según el parámetro utilizado para cuantificar los aerosoles (Utrillas et al., 1998).

Los resultados obtenidos para los planos verticales no mejoran ni considerando una evolución anual, teniendo en cuenta las distintas estaciones del año, ni considerando distintos períodos a lo largo del día. Por lo tanto consideramos que el SMARTS2 no es adecuado para estimar la UVER incidente sobre planos inclinados. Esto podría explicarse en base a que la estimación de la radiación sobre planos verticales supone la estimación de la radiación directa y de la radiación difusa, alcanzando la difusa una gran importancia en el intervalo espectral UVB, del orden del 60% de la radiación total (Utrillas et al., 2007). La modelización de la difusa sobre planos verticales en el rango espectral UVB es un problema no resuelto todavía, ya que los algoritmos empleados para su cálculo son los mismos que los que se emplean para calcular la radiación de banda ancha de todo el rango espectral (Serrano et al., 2010).

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) a través de los proyectos CGL2007-60648 y CGL2009-07790 y por la Generalitat Valenciana a través del proyecto PROMETEO-2010-064. La colaboración de A. R. Esteve ha sido posible gracias a la beca BES-2006-12521.

Referencias

- Chandrasekhar, S., 1950: Radiative transfer, Oxford Univ. Press, UK. Republished by Dover, New York, USA (1960).
- CIE, 2000: Erythema Reference Action Spectrum and Standard Erythema Dose, Commission Internationale de l'Éclairage Publications, Vienna, ISO 17166 CIE S 007 / E, CIE Standard., 4 pp.
- Estellés, V., Martínez-Lozano, J. A., Utrillas, M. P., y Campanelli, M., 2007: *Columnar aerosol properties in Valencia (Spain) by ground-based Sun photometry*, J Geophys Res, **112**, doi: 10.1029/2006JD008167.
- Esteve, A. R., Marín, M. J., Martínez-Lozano, J. A., Tena, F., Utrillas, M. P., y Cañada, J., 2006: *UV index on tilted surfaces*, Photochem Photobiol, **82**, 1047–1052.
- Frederick, J. E. y Lubin, D., 1988: *The budget of biologically active radiation in the earth atmosphere system*, J Geophys Res, **93**, 3825–3832.
- Gueymard, C. A., 1995: Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, version 2 (SMARTS2): Algorithms description and performance assessment, Report FSEC-PF-270-95, Florida Solar Energy Center.
- Gueymard, C. A., 2005a: *Interdisciplinary applications of a versatile spectral solar irradiance model: A review*, Energy, **30**, 1551–1576.
- Gueymard, C. A., 2005b: User's manual SMARTS, Solar consulting services, USA.
- Holben, B., Eck, T., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., y Smirnov, A., 1998: *AERONET-a federate instrument network and data archive for aerosol characterization*, Rem Sens Environ, **66**, 1–16.
- ICNIRP, 2004: *Guidelines on limits of exposure of UV radiation*, Health Phys, **87**, 171–186, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.
- Madronich, S., 1987: *Photodissociation in the atmosphere. Part I. Actinic flux and the effect of ground reflections and clouds*, J Geophys Res, **92**, 9740–9752.
- Martínez-Lozano, J. A., Marín, M. J., Tena, F., Utrillas, M. P., Sánchez-Muniosguren, L., González, C., Cuevas, E., Redondas, A., Lorente, J., de Cabo, X., Cachorro, V., Vergaz, R., de Frutos, A., Díaz, J. P., Expósito, F. J., de la Morena, B., y Vilaplana, J. M., 2002: *UV Index experimental values during the years 2000 and 2001 from the Spanish broadband UVB radiometric network*, Photochem Photobiol, **76**, 181–187.
- McKinlay, A. F. y Diffey, B. L., 1987: *A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin*, CIE Journal, **6**, 17–22.
- Meyer, B., Seckmeyer, G., y Kylling, A., 1997: *Systematic long-term comparison of spectral UV measurements and UVSPEC modelling results*, J Geophys Res, **102**, 8755–8766.
- Parisi, A. V. y Kimlin, M. G., 1999: *Horizontal and sun-normal spectral biologically effective ultraviolet irradiances*, J Pho-

- tochem Photobiol B-Biol, **53**, 70–74.
- Pérez, R., Ineichen, P., Seals, R., y Zelenka, A., 1990: *Making full use of the clearness index for parametering hourly insolation conditions*, Sol Energy, **45**, 111–114.
- Ricchiuzzi, P., Yang, S., Gautier, C., y Sowle, D., 1998: *SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere*, Bull Amer Meteorol Soc, **79**, 2101–2114.
- Scotto, J., Cotton, G., Urbach, F., Berger, D., y Fears, T., 1988: *Biologically effective ultraviolet radiation: surface measurements in the United States. 1974 to 1985*, Science, **239**, 762–764.
- Serrano, D., Marín, M. J., Utrillas, M. P., Tena, F., y Martínez-Lozano, J. A., 2010: *Measurement and modelling of global erythemal irradiance on inclined planes*, Tethys, **7**, 57–66, doi: 10.3369/tethys.2010.7.05.
- Shettle, E. P. y Fenn, R. W., 1979: *Models for the aerosol of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties*, AFGL-TR-79-0214, Environmental Res. Paper no. 676, Hanscom AFL, MA.
- Utrillas, M. P., Boscá, J. V., Martínez-Lozano, J. A., Tena, F., y Pinazo, J. M., 1998: *A comparative study of SPEC-TRAL2 and SMARTS2 parameterised models based on spectral irradiance measurements at Valencia, Spain*, Solar Energy, **63**, 161–171.
- Utrillas, M. P., Marín, M. J., Esteve, A. R., Tena, F., Cañada, J., y Martínez-Lozano, J. A., 2007: *Diffuse UVER radiation experimental values*, J Geophys Res, **112**, doi:10.1029/2007JD008846.
- Utrillas, M. P., Marín, M. J., Esteve, A. R., Estellés, V., Tena, F., Cañada, J., y Martínez-Lozano, J. A., 2009: *Diffuse ultraviolet erythemal irradiance (UVER) on inclined planes: a comparison of experimental and modelled data*, Photochem Photobiol, **20**, 1245–1253, doi: 10.1111/j.1751-1097.2009.00573.x.
- Utrillas, M. P., Martínez-Lozano, J. A., y Nuñez, M., 2010: *Ultraviolet radiation protection by a beach umbrella*, Photochem Photobiol, **86**, 449–456, doi: 10.1111/j.1751-1097.2009.00677.x.
- Vilaplana, J. M., Cachorro, V. E., Sorribas, M., Luccini, E., de Frutos, A. M., Berjón, y de la Morena, B., 2006: *Modified calibration procedures for a Yankee Environmental System UVB-1 biometer based on spectral measurements with a Brewer spectrophotometer*, Photochem Photobiol, **82**, 508–514.
- Webb, A., Weihs, P., y Blumthaler, M., 1999: *Spectral UV irradiance on vertical surfaces: A case study*, Photochem Photobiol, **69**, 464–470.
- Weihs, P., 2002: *Influence of ground reflectivity and topography on erythemal UV radiation on inclined planes*, Int J Biometeorol, **46**, 95–104.
- WMO, 1986: *A preliminary Cloudless Standard for Radiation Computation*, World Climate Programme, WCP-112. WMO/TD-No.24. WMO (World Meteorological Organization), Geneva, Switzerland.
- WMO, 1998: *Report of the WMO-WHO Meeting of Experts on Standardization of UV Indices and Their Dissemination to the Public*, WMO Global Atmosphere Watch No. 127, WMO/TD No. 921. WMO (World Meteorological Organization), Geneva.