Tethys
Revista de meteorologia
i climatologia mediterrània

Tethys 2011, **8**, 13–20
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2011.8.02
Revista editada per **ACAM**

Estimació de la irradiància UV eritemàtica integrada incident en plans verticals, mitjançant el model SMARTS2

G. Derouet[1], M. P. Utrillas[1], V. Estellés[1], A. R. Esteve[1], M. J. Marín[2], J. L. Gómez-Amo[1] i J. A. Martínez-Lozano[1]

[1]Grup de Radiació Solar, Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia

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

Rebut: 17-V-2010 – Acceptat: 29-IX-2010 – **Versió Traduïda**

Correspondència a: jmartine@uv.es

Resum

S'ha utilitzat el model SMARTS2 per estimar la irradiància UV eritemàtica (UVER) integrada sobre un pla horitzontal i sobre plans verticals orientats a nord i sud. Els valors obtinguts mitjançant el model s'han comparat amb les dades experimentals proporcionades per tres radiòmetres YES-UVB-1 situats sobre aquests plans. Per quantificar els resultats s'han considerat els paràmetres estadístics desviació mitja, desviació absoluta mitja i error quadràtic mig (RMSD). Els resultats sobre un pla horitzontal mostren valors del RMSD d'aproximadament 10%, quan es treballa amb espessor òptica d'aerosols a 500 nm, i de 16% quan es treballa amb el coeficient β d'Ångström. Pel que fa als resultats obtinguts per als plans nord i sud, assoleixen errors molt alts. El RMSD en aquests casos és del 20,5% per al pla sud i del 32,5% per al pla nord, en el cas més favorable que es disposi de valors de l'espessor òptica per calcular la quantitat d'aerosols. Aquests resultats no milloren ni considerant una evolució anual, tenint en compte les diferents estacions de l'any, ni considerant períodes diferents al llarg del dia. Per tant, considerem que el SMARTS2 no és adient per estimar la UVER incident sobre plans inclinats.

Paraules clau: radiació UV eritemàtica (UVER), plans verticals, model SMARTS2

1 Introducció

L'efecte de la radiació ultraviolada sobre els éssers vius ha merescut l'atenció dels investigadors en els darrers trenta anys (Frederick i Lubin, 1988; Scotto et al., 1988), portant a recomanacions sobre l'exposició als raigs UV per tal d'evitar danys aguts o crònics (WMO, 1998; ICNIRP, 2004). De tots els efectes que la radiació UV provoca en els éssers humans, el més comú és l'eritema, o cremada solar. El 1987, la *Commission Internationale de l'Éclariage* (CIE, 2000) va adoptar una corba estàndard d'eritema (McKinlay i Diffey, 1987) que és la que es recomana per determinar la radiació ultraviolada eritemàtica (UVER). Aquesta UVER es calcula convolucionant la corba estàndard d'eritema proposada per la CIE (també anomenada espectre d'acció eritemàtic) amb la radiació solar incident a nivell del terra.

Tanmateix, les mesures d'irradiància eritemàtica incident sobre una superfície horitzontal no constitueixen el mètode més adient per estimar la dosi real que reben les persones. Per als estudis dosimètrics és fonamental el càlcul de la radiació UVER sobre superfícies inclinades. Per desgràcia, existeixen pocs registres de mesures d'UVER en plans diferents de l'horitzontal, tot i que alguns treballs mostren que l'UVER global incident sobre un pla perpendicular al Sol arriba a ser un 27% més gran que la incident sobre un d'horitzontal (Parisi i Kimlin, 1999). Webb et al. (1999) van realitzar mesures d'UVER espectral sobre plans verticals per a diferents plans azimutals al llarg d'un dia (18 d'agost de 1995). La influència de la topografia i la reflectivitat del terra han estat estudiades també per Weihs (2002), que obté que en algunes condicions topogràfiques específiques la intensitat incident en plans inclinats pot ser més gran que en superfícies horitzontals.

Davant d'aquesta manca de dades experimentals cal recórrer a l'ús de models que permetin estimar l'UVER incident en plans inclinats. Aquests models es basen en diferents

2011 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".

aproximacions per resoldre l'equació de transferència radiativa en l'atmosfera. Poden ser models de dispersió múltiple o dispersió simple. Els models de dispersió múltiple, tal com el seu nom indica, consideren una atmosfera multidispersiva, i normalment resolen l'equació de transferència radiativa aplicant el model d'ordenades discretes DISORT (Chandrasekhar, 1950). El SBDART (*Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer*) (Ricchiazzi et al., 1998) o el UVSPEC (*UV Spectral*) (Meyer et al., 1997) són models d'aquest tipus, en el rang UV.

Els models de dispersió simple, també anomenats espectrals ràpids, consideren que l'atmosfera està constituïda per una sola capa, és a dir que és homogènia verticalment i horitzontal, i en ella es produeix únicament dispersió simple. Un exemple d'aquest tipus de models és el SMARTS2 (*Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*) (Gueymard, 1995; 2005a), que a més té l'opció de proporcionar directament UVER espectral sobre pla horitzontal. Aquest model ha estat prèviament utilitzat pels autors per estimar la radiància espectral global sobre un pla horitzontal (Utrillas et al., 1998). En aquest treball s'utilitza aquest model per estimar l'UVB espectral incident sobre dos plans verticals, nord i sud, al llarg d'un any. Posteriorment, aquesta UVB es convoluciona amb l'espectre d'acció eritemàtic per obtenir l'UVER espectral. Finalment, aquesta irradiància espectral s'integra per disposar de valors d'UVER integrada sobre plans verticals.

Recentment el Grup de Radiació Solar de València ha posat en funcionament una estació de mesura d'UVER integrada a la Facultat de Física (Utrillas et al., 2009). Les dades experimentals d'aquesta estació han servit per validar els valors estimats mitjançant el SMARTS2. Com a indicadors estadístics de la precisió de l'estimació s'han pres la desviació mitja (MBD), la desviació absoluta mitja (MAD) i la desviació quadràtica mitja (RMSD).

2 El model SMARTS2

El model SMARTS2 és un model de dispersió simple desenvolupat en llenguatge FORTRAN, de lliure accés (http://www.nrel.gov/rredc/smarts/). Calcula la irradiància espectral directa i difosa tant en el pla horitzontal com en plans inclinats. Està limitat a dies clars i no admet la possibilitat d'introduir nuvolositat. La versió utilitzada en aquest treball, SMARTS2.9.5, disposa d'una interfície que permet fàcilment elegir entre deu tipus d'atmosfera estàndard, o una pròpia introduïda per l'usuari. El model disposa d'albedos espectrals, així com de dades dels coeficients d'absorció dels principals components atmosfèrics. Ofereix la possibilitat de calcular mesures integrades de tot el rang espectral de la radiació solar (entre 280 i 4000 nm), dosi eritemàtica, índex UV i altres mesures ponderades amb diferents espectres d'acció. Disposa de fins a set diferents espectres extraterrestres proposats per diferents autors i un de proposat pel propi autor del model SMARTS2 (Gueymard, 2005b), que és una combinació que engloba els més utilitzats en la bibliografia.

Taula 1. Valors mensuals de l'espessor òptica d'aerosols (AOD) a 500 nm i del coeficient β d'Ångström utilizats.

Mes	AOD (500 nm)	β d'Ångström
Gener	0,127	0,050
Febrer	0,128	0,051
Març	0,103	0,044
Abril	0,129	0,053
Maig	0,193	0,104
Juny	0,187	0,069
Juliol	0,231	0,101
Agost	0,208	0,092
Setembre	0,199	0,091
Octubre	0,274	0,177
Novembre	0,095	0,040
Desembre	0,086	0,041

Aquest model es caracteritza per la multitud d'opcions que considera en els paràmetres d'entrada. Com a exemple cal destacar que proposa fins a nou models diferents d'aerosols: els quatre tipus proposats per Shettle i Fenn (1979) i els cinc proposats per la *Standard Radiation Atmosphere* (WMO, 1986). Per a més informació sobre el SMARTS2 es pot consultar el manual de l'usuari (Gueymard, 2005b).

3 Dispositiu experimental

Per estudiar els efectes de la irradiància UVER sobre plans diferents de l'horitzontal, s'ha dissenyat i posat en funcionament una estació de mesura instal·lada a la Facultat de Física de València i que compta amb sis radiòmetres de banda ampla UVB-1 de YES. Les mesures s'han portat a terme al Campus de Burjassot (València), que es troba situat a 39,5°N de latitud, 0,418°W de longitud i a 40 m d'altura sobre el nivell del mar i on els obstacles de l'horitzó no superen l'altura de 4°, tret d'una petita banda al nord-oest (Esteve et al., 2006). Un dels radiòmetres mesura la UVER global en el pla horitzontal. Un altre té acoblada una banda d'ombra ancorada en uns braços la inclinació dels quals és igual a la latitud. Aquesta banda impedeix que la radiació procedent directament del Sol incideixi sobre el detector de l'aparell, per la qual cosa realitza mesures d'irradiància difosa, també en el pla horitzontal (Utrillas et al., 2007). Els altres quatre instruments restants prenen mesures d'irradiància global sobre plans verticals, a les orientacions nord, sud, est i oest (Figura 1). En aquest treball només s'han fet servir les mesures obtingudes amb dos d'aquests quatre radiòmetres, els orientats al nord i al sud. A la Figura 2 s'ha representat l'evolució dels valors de la UVER a les 12 GMT incident sobre el pla horitzontal i sobre els plans verticals nord i sud, per al període de mesura considerat (any 2008).

Figura 1. Dispositiu experimental per a la mesura de la radiació ultraviolada eritemàtica (UVER) en plans verticals (vista parcial).

El YES-UVB-1 és un radiòmetre de banda ampla, l'interval espectral del qual és 280-400 nm. Utilitza filtres de vidre acolorit i un fòsfor sensible a la UVB. La llum visible, tret d'una petita fracció en el rang de la llum vermella, és absorbida per un primer filtre, un vidre negre que només transmet UV. La llum transmesa a través del filtre impressiona el fòsfor, sensible a la UVB. Aquest material absorbeix la component UVB i reemet aquesta llum en llum visible, predominantment en longituds d'ona corresponents al verd. Un segon filtre de vidre verd deixa passar la llum fluorescent procedent del fòsfor mentre que absorbeix la llum vermella que es pot haver transmès a través del primer filtre negre. La intensitat de la llum fluorescent és mesurada per un fotodíode d'estat sòlid.

La sortida del YES-UVB-1 és un senyal analògic en volts. Per convertir-lo en unitats d'irradiància s'utilitza un factor de conversió que ve donat pel quocient entre l'energia mesurada pel detector amb una resposta de cosinus espectral ideal i l'energia mesurada pel UVB-1. En la pràctica, aquest factor es determina prenent el quocient entre la irradiància total UVB i el valor del senyal de sortida de l'instrument UVB-1 en el temps de mesura. Aquest factor de conversió depèn de l'interval espectral considerat i de l'angle zenital.

La resposta espectral de l'instrument pot canviar amb el temps, variant la transmitància del primer filtre, per la qual cosa és necessari recalcular els factors de conversió. Això és en realitat una recalibració de l'instrument i es realitza periòdicament. Els radiòmetres YES UVB-1 utilitzats per a les mesures d'UVER d'aquest treball es calibren anualment a l'*Estación de Sondeos Atmosféricos "El Arenosillo"* que pertany a l'INTA (*Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial*) que depèn del Ministeri de Defensa. Aquesta calibració implica actuacions de laboratori així com mesures de camp, realitzant una anàlisi de la desviació de l'espectre d'acció eritemàtic de la CIE, així com una intercomparació amb un espectrorradiòmetre Brewer (Vilaplana et al., 2006).

En primer lloc, es mesura la resposta espectral relativa del radiòmetre (RSE) per comparar-la amb la resposta de l'espectre eritemàtic de la CIE, de manera que una resposta ideal seria aquella de la qual el quocient entre ambdues fos la unitat. La matriu donada per l'Equació 1 quantifica la mesura en què la irradiància, pesada per la RSE de l'instrument, s'aparta de la irradiància eritemàtica, pesada per l'espectre d'acció eritemàtic de la CIE en funció de l'angle zenital solar i del contingut total d'ozó.

La irradiància espectral (I) necessària per trobar aquesta matriu s'obté amb el model de transferència 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 segon lloc es realitza una intercomparació a la intempèrie amb l'espectrorradiòmetre Brewer MKIII#150. Mitjançant aquesta intercomparació s'observa que el senyal del radiòmetre és proporcional a la irradiància integrada de l'espectrorradiòmetre, cosa que permetrà calcular la irradiància eritemàtica. El resultat final és una altra matriu, (Figura 3), que dependrà de l'angle zenital solar i de la columna total d'ozó.

Amb això es redueix l'error del cosinus de les mesures fins a un màxim de 4,2%. Aquesta caracterització de l'error de cosinus queda inclosa a la matriu de calibratge del radiòmetre. D'aquesta manera, la incertesa relativa a l'error angular en les mesures del radiòmetre transformades en unitats físiques mitjançant aquesta matriu serà en tots els casos inferior al 4,5%.

Per determinar l'espessor òptica d'aerosols (AOD) s'utilitza un Cimel CE318. Es tracta d'un fotòmetre solar dissenyat per a la mesura autònoma i automàtica de la radiància solar directa i de cel, convertit en l'estàndard de la xarxa AERONET (Holben et al., 1998) per a la mesura d'aerosols. El fotòmetre consta bàsicament de: a) una caixa electrònica de control, b) un robot, consistent en dos motors elèctrics que controlen les coordenades azimutal i zenital i c) un capçal més uns col·limadors. El cap sensor està equipat d'un doble col·limador d'1,2° d'angle de visió (*Field of View*, FOV).

El sistema sensor el constitueixen dos fotodíodes de silici dedicats a la mesura de radiància directa i de cel. La selecció de les longituds d'ona es realitza mitjançant filtres interferencials inserits en una roda de filtres amb fins a nou posicions. Les longituds d'ona bàsiques són 440, 670, 870, 940 i 1020 nm; l'amplada de banda o *Full Width at Half Maximum* (FWHM) depèn del canal, tot i que varia entre 2-40 nm segons la regió de l'espectre (Estellés et al., 2007).

4 Metodologia i resultats

El model SMARTS2 s'ha utilitzat per obtenir valors cinc-minutals d'UVB gobal horitzontal, que es pren com a

Taula 2. Resultats de la comparació del model SMARTS2 amb els valors experimentals obtinguts per a l'any 2008 en el pla horitzontal, orientat al nord i orientat al sud, utilitzant com a paràmetre d'entrada d'aerosols: espessor òptica d'aerosols a 500 nm i coeficient β d'Ångström. N parells de valors utilitzats en la comparació.

Aerosols	AOD a 500 nm			β d'Ångström		
Indicador estadístic	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)
Pla horitzontal (N = 7312)	-0,8	6,9	10,3	-0,6	10,3	15,8
Pla nord (N = 7312)	-24,6	25,1	32,5	-23,5	25,8	33,4
Pla sud (N = 3346)	-5,9	14,9	20,5	-5,2	17,3	24,5

Taula 3. Resultats de la comparació del model SMARTS2 amb els valors experimentals obtinguts per a l'any 2008 en el pla horitzontal, orientat al nord i orientat al sud, segons les diferents estacions de l'any. Paràmetre d'entrada d'aerosols: espessor òptica d'aerosols a 500 nm i coeficient β d'Ångström. N parells de valors utilitzats en la comparació. ($*$) Sense dades experimentals.

	Aerosols	AOD a 500 nm			β d'Ångström		
	Indicador estadístic	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)
	Pla horitzontal (N = 2186)	4,3	8,7	11,9	7,4	13,3	20,1
Estiu	Pla nord (N = 2186)	-22,4	23,0	29,0	-17,1	25,1	31,0
	Pla sud (N = 1105)	1,4	14,6	19,7	4,7	19,1	27,2
	Pla horitzontal (N = 1570)	-6,1	6,4	7,3	-8,0	8,9	9,9
Hivern	Pla nord (N = 1570)	-28,3	28,3	31,8	-28,7	28,7	32,3
	Pla sud ($*$) (N = 0)	-	-	-	-	-	-
Primavera	Pla horitzontal (N = 3556)	-2,7	6,1	9,5	-3,4	9,1	14,0
i	Pla nord (N = 3556)	-25,4	25,8	33,7	-25,5	26,1	34,1
tardor	Pla sud (N = 2240)	-9,4	15,4	21,2	-9,6	16,9	23,7

referència, i valors d'UVB sobre plans verticals orientats a nord i sud. La freqüència d'aquests valors ve donada per la freqüència dels nostres valors experimentals. Cal remarcar que, com ja s'ha indicat, el model SMARTS2 no calcula irradiància eritemàtica integrada inclinada, sinó valors espectrals d'ultraviolat. Aquests valors espectrals d'UVB es convolucionen amb la corba de l'espectre d'acció eritemàtic per obtenir UVER espectral, i posteriorment s'integren per calcular l'UVER integrada. El model s'ha utilitzat només per a dies clars, ja que la nuvolositat no es té en consideració.

En l'algoritme s'ha introduït el model del perfil en altura d'una atmosfera estàndar corresponent a la *Mid-Latitude*, alternativament en la seva versió Winter (tardor-hivern) o Summer (primavera-estiu), on s'inclouen, per a diferents altures, els valors de pressió, temperatura i humitat relativa. Com a model d'aerosols, en base als resultats obtinguts prèviament per a València (Utrillas et al., 1998), s'han utilitzat els valors corresponents al model urbà (SU) de la *Standard Radiation Atmosphere* (SRA) (WMO, 1986). Aquests valors s'han normalitzat a les característiques locals mitjançant l'espessor òptica d'aerosols a 500 nm o el valor del coeficient β d'Ångström, proporcionats pel Cimel CE318, situat a la terrassa del bloc C de la Facultat de Física de Burjassot. A la Taula 1 s'indiquen els valors mensuals de l'espessor òptica d'aerosols a 500 nm i del coeficient β d'Ångström utilitzats. Per a l'ozó s'han agafat els valors diaris de l'OMI (*Ozone Monitoring Instrument*), sensor a bord del satèl·lit Aura de la NASA. Com a albedo del sòl s'ha utilitzat el valor mesurat de 0,1, obtingut prèviament pels autors, per al rang UV (Utrillas et al., 2010).

Els valors obtinguts mitjançant el model s'han comparat amb les dades experimentals proporcionades per tres radiòmetres YES-UVB-1, situats sobre els plans horitzontal, vertical orientat al nord i vertical orientat al sud. Aquests radiòmetres es troben a la mateixa terrassa que el radiòmetre Cimel. Per validar el model s'han utilitzat les dades registrades en aquests tres plans durant els dies clars de l'any 2008. Per seleccionar aquests dies clars s'ha utilitzat l'índex de claror modificat k'_t que presenta l'avantatge respecte de l'índex de claror de disminuir la dependència amb l'angle zenital solar i es defineix com (Pérez et al., 1990):

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

on k_t és l'índex de claror (I/I_0) i m és la massa òptica. S'han escollit les dades el $k'_t > 0{,}7$, que és un criteri usualment utilitzat per seleccionar dades sense nuvolositat (Serrano et al., 2010).

Per quantificar els resultats de l'estudi s'han considerat els paràmetres estadístics: desviació mitja (MBD), desviació absoluta mitja (MAD) i error quadràtic mig (RMSD) relatius. Aquests vénen donats per les equacions:

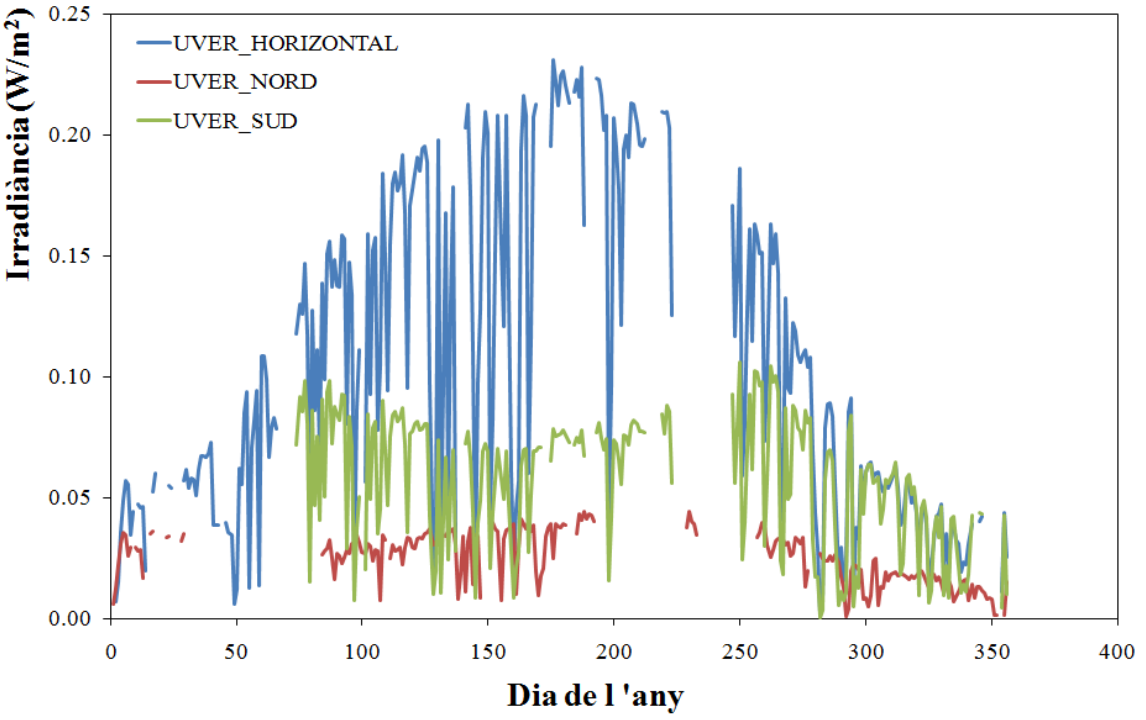

Figura 2. Evolució dels valors de l'UVER a les 12 GMT, incident sobre el pla horitzontal i sobre els plans verticals nord i sud, per al període de mesura considerat (any 2008).

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

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

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

Essent:

- y_i = valor estimat d'UVER i-èssim
- x_i: valor experimental d'UVER i-èssim
- $\overline{x}$: valor experimental mig diari d'UVER
- N: nombre de parells de valors (experimentals i estimats) d'UVER utilitzats

Tant el MBD com el MAD i el RMSD així definits són adimensionals s'expressen en %. A la Taula 2 es recullen els resultats corresponents a les dades cincminutals de tot el període considerat (dies clars de l'any 2008) utilitzant per quantificar els aerosols tant l'AOD a 500 nm com el coeficient β d'Ångström. Els resultats de l'UVER sobre pla horitzontal serveixen de comparació amb els resultats obtinguts prèviament per irradiació global sobre un pla horitzontal en el rang 300 nm a 1100 nm (Utrillas et al., 1998). En aquest cas es va obtenir un RMSD 5,4% (quan es treballava amb espessor òptica d'aerosols a 500 nm) i de 6,4% (quan es treballava amb el coeficient β d'Ångström). En el rang UV aquests errors pràcticament es dupliquen, especialment els referits als valors obtinguts utilitzant el coeficient β d'Ångström. Això es deu al fet que el SMARTS2 no funciona de manera totalment adequada en el rang UV, tal com indica el seu propi autor que considera que introdueix un error del 20% en aquest rang (Gueymard, 1995). La raó d'aquesta diferència de funcionament rau en l'interval espectral utilitzat en aquest cas, que únicament és de 280 a 400 nm. En aquest interval la dispersió adquireix una importància molt més gran, per la qual cosa es necessita una caracterització més detallada dels aerosols així com tenir en compte la multidispersió, cosa que el SMARTS2 no fa, ja que és un model monodispersiu.

Pel que fa als resultats obtinguts per als plans nord i sud, els dos subestimen l'UVER incident sobre ells (MBD negatiu), essent molt més grans els errors corresponents al pla nord que al pla sud. Cal assenyalar que en tots els plans s'obtenen millors resultats quan es fa servir l'AOD de 500 nm que no pas quan es fa servir el coeficient β d'Ångström.

Els resultats s'han agrupat estacionalment, tenint en compte novament com a paràmetre indicador de la quantitat d'aerosols l'espessor òptica i el coeficient β d'Ångström. A

Taula 4. Resultats de la comparació del model SMARTS2 amb els valors experimentals obtinguts per a l'any 2008 en els plans horitzontal, orientat al nord i orientat al sud, segons les diferents estacions de l'any, per a diferents períodes del dia. Paràmetre d'entrada d'aerosols: espessor òptica d'aerosols a 500 nm i coeficient β d'Ångström. N parells de valors utilitzats en la comparació. $(*)$ Sense dades experimentals.

	Període	10 h a 14 h UTC			Abans de 10 h UTC			Després de 14 h UTC		
	Aerosols	AOD a 500 nm			AOD a 500 nm			AOD a 500 nm		
	Indicador estadístic	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	MAD (%)	RMSD (%)
Tot l'any	Horitzontal(N = 7312)	-0,7	6,8	9,7	2,4	6,6	9,9	-4,4	7,3	9,8
	Nord (N = 7312)	-28,8	29,2	33,8	-18,5	18,9	24,5	-18,6	19,1	23,8
	Sud (N = 3345)	-5,2	15,0	18,5	1,2	11,0	15,9	-16,8	18,3	23,0
Estiu	Horitzontal (N = 2186)	5,1	8,7	10,8	7,7	9,6	13,9	-1,7	7,2	9,5
	Nord (N = 2186)	-26,9	27,4	29,5	-14,6	16,0	30,0	-18,0	18,1	22,7
	Sud (N = 1105)	2,2	14,6	17,2	11,0	13,8	20,0	-11,9	14,9	20,5
Hivern	Horitzontal (N = 1570)	-5,9	6,1	6,5	-5,9	6,0	6,6	-6,9	8,2	9,5
	Nord (N = 1570)	-31,4	31,4	31,8	-22,1	22,1	23,9	-21,4	21,4	23,8
	Sud (*) (N = 0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Primavera i tardor	Horitzontal (N = 3556)	-2,7	6,0	9,1	0,5	5,4	8,0	-5,6	7,2	9,9
	Nord (N = 3556)	-29,5	29,9	35,5	-19,7	19,8	25,7	-18,8	19,5	24,2
	Sud (N = 2240)	-8,7	15,7	19,4	-3,3	9,8	14,4	-19,8	20,5	24,5

la Taula 3 es mostren els resultats obtinguts en aquesta agrupació, que considera separadament els valors corresponents a l'estiu, l'hivern i primavera-tardor. Cal dir que el radiòmetre situat en el pla sud va tenir un problema de funcionament a l'hivern i no hi ha prou dades experimentals per obtenir valors significatius estadísticament. Els altres valors segueixen les mateixes tendències que s'observaven quan es consideraven conjuntament. Sobre el pla horitzontal es tenen valors del RMSD que oscil·len entre 7% i 12%, i sobre els plans verticals s'observa que, tret del pla sud a l'estiu, el model subestima els valors experimentals, amb valors del RMSD que oscil·len entre el 29% i el 34% per al pla nord i entre el 20% i el 21% per al pla sud considerant per a la simulació l'espessor òptica d'aerosols a 500 nm. Igual que abans, els errors obtinguts utilitzant el coeficient β d'Ångström són sensiblement més grans que els obtinguts fent servir l'AOD a 500 nm, especialment a l'estiu. Pel que fa al MBD s'observa que existeix un canvi de signe des de l'estació d'estiu a la d'hivern. Això pot ser degut a la gran diferència de terbolesa existent a València durant les dues estacions (com es pot veure a la Taula 1). Durant els mesos d'estiu l'espessor òptica d'aerosols és màxim, augmentant encara més la quantitat de radiació difosa a l'atmosfera, amb la qual cosa és més difícil modelitzar-la. En aquest cas, la major part dels valors experimentals estan per sota dels valors modelitzats, cosa que provoca que al final el conjunt sobreestimi les mesures. A l'hivern, la terbolesa és menor i en la majoria dels casos el procés s'inverteix.

En darrer lloc, donada la importància que l'UVER adquireix en les hores centrals del dia (Martínez-Lozano et al., 2002), s'han agrupat els resultats que proporciona el model en tres períodes diaris, al voltant de migdia (de 10 h a 14 h UTC), i abans (fins a les 10 h) i després d'aquest interval temporal (després de les 14 h), tot això tenint en compte la divisió estacional establerta anteriorment. A la vista dels resultats anteriors, per a aquesta anàlisi només s'han tingut en compte els valors obtinguts utilitzant com a indicador de la quantitat d'aerosols l'AOD a 500 nm. A la Taula 4, es resumeixen els resultats de la comparació amb els valors experimentals. Els resultats no mostren cap tendència nova. Són acceptables, com en els casos anteriors, per al pla horitzontal, però sobre els plans nord i sud es tenen errors considerables,

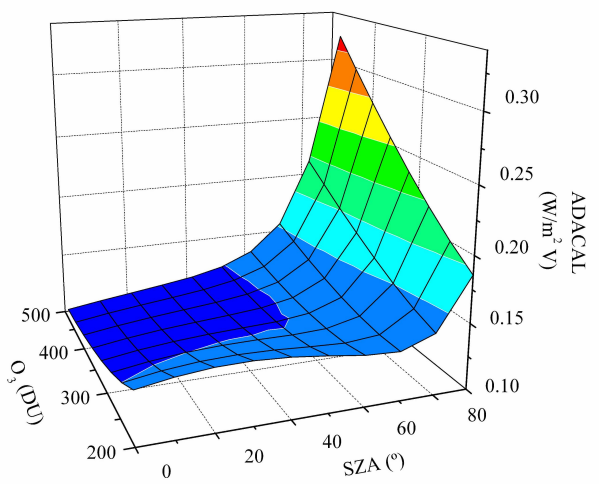

Figura 3. Matriu de calibratge per al radiòmetre UVB-1. ADACAL és el factor de calibratge per a cada valor d'ozó (O_3) i angle zenital (SZA).

amb RMSD de l'ordre del 23% al 36% per al pla nord i del 14% al 25% per al pla sud.

5 Conclusions

El model SMARTS2 és un model desenvolupat per determinar irradiància espectral sobre un pla horitzontal en tot el rang espectral de la radiació solar (280-4000 nm). També és vàlid per determinar la irradiància espectral sobre plans verticals en aquest rang espectral.

En aquest cas s'ha utilitzat per determinar la irradiància eritemàtica (UVER), tant sobre un pla horitzontal com sobre plans verticals orientats al nord i al sud. Els resultats sobre un pla horitzontal es poden considerar acceptables obtenint, per a la comparació amb els valors experimentals, valors del RMSD relatiu de 10,3%, quan es treballava amb espessor òptica d'aerosols a 500 nm, i de 15,8% quan es treballava amb el coeficient β d'Ångström. Pel que fa als resultats obtinguts per als plans nord i sud, assoleixen desviacions molt altes. El RMSD relatiu en aquests casos és del 20,5% per al pla sud i del 32,5% per al pla nord, en el cas més favorable que es disposi de valors de l'espessor òptica per quantificar la quantitat d'aerosols.

Aquestes desviacions mitges són molt més grans que les que s'obtenen quan el model s'aplica a plans horitzontals i en el rang de la radiació visible. En aquest cas s'obtenen valors del RMSD de l'ordre del 5% al 7%, segons el paràmetre utilitzat per quantificar els aerosols (Utrillas et al., 1998).

Els resultats obtinguts per als plans verticals no milloren ni considerant una evolució anual, tenint en compte les diferents estacions de l'any, ni considerant diferents períodes al llarg del dia. Per tant, considerem que el SMARTS2 no és adequat per estimar la UVER incident sobre plans inclinats. Això es podria explicar perquè l'estimació de la radiació sobre plans verticals suposa l'estimació de la radiació directa i de la radiació difosa. Aquesta darrera assoleix una gran importància en l'interval espectral UVB, de l'ordre del 60% de la radiació total (Utrillas et al., 2007). La modelització de la difosa sobre plans verticals en el rang espectral UVB és un problema encara no resolt, ja que els algoritmes utilitzats per al seu càlcul són els mateixos que els que s'utilitzen per calcular la radiació de banda ampla a tot el rang espectral (Serrano et al., 2010).

Agraïments. Aquest treball ha estat finançat pel Ministeri de Ciència i Innovació (MICINN) a través dels projectes CGL2007-60648 i CGL2009-07790 i per la Generalitat Valenciana a través del projecte PROMETEO-2010-064. La col·laboració d'A. R. Esteve ha estat possible gràcies a la beca BES-2006-12521.

Referències

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., i Campanelli, M., 2007: *Columnar aerosol properties in Valencia (Spain) by ground-based Sun photometry*, J Geophys Res, **112**, doi: 10.1029/2006JD008 167.

Esteve, A. R., Marín, M. J., Martínez-Lozano, J. A., Tena, F., Utrillas, M. P., i Cañada, J., 2006: *UV index on tilted surfaces*, Photochem Photobiol, **82**, 1047–1052.

Frederick, J. E. i 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., Lavenu, F., Jankowiak, I., i 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 1. 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., i 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. i Diffey, B. L., 1987: *A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin*, CIE Journal, **6**, 17–22.

Meyer, B., Seckmeyer, G., i Kylling, A., 1997: *Systematic long-term comparison of spectral UV measurements and UVSPEC modelling results*, J Geophys Res, **102**, 8755–8766.

Parisi, A. V. i Kimlin, M. G., 1999: *Horizontal and sun-normal spectral biologically effective ultraviolet irradiances*, J Photochem Photobiol B-Biol, **53**, 70–74.

Pérez, R., Ineichen, P., Seals, R., i Zelenka, A., 1990: *Making full use of the clearness index for parametering hourly insolation conditions*, Sol Energy, **45**, 111–114.

Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., i 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., i 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., i 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. i 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., nada, J. C., Tena, F., i Pinazo, J. M., 1998: *A comparative study of SPECTRAL2 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., i Martínez-Lozano, J. A., 2007: *Diffuse UVER radiation experimental values*, J Geophys Res, **112**, doi:10.1029/2007JD008 846.

Utrillas, M. P., Marín, M. J., Esteve, A. R., Estellés, V., Tena, F., Cañada, J., i Martínez-Lozano, J. A., 2009: *Diffuse ultraviolet erythematic irradiance (UVER) on inclined planes: a comparison of experimental and modelled data*, Photochem Photobiol, **20**, 1245–1253, doi: 10.1111/j.1751–1097.2009.00 573.x.

Utrillas, M. P., Martínez-Lozano, J. A., i Nuñez, M., 2010: *Ultraviolet radiation protection by a beach umbrella*, Photochem Photobiol, **86**, 449–456, doi: 10.1111/j.1751–1097.2009.00 677.x.

Vilaplana, J. M., Cachorro, V. E., Sorribas, M., Luccini, E., de Frutos, A. M., Berjón, i 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., i 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.