Tethys
Revista de meteorologia
i climatologia mediterrània

Tethys 2010, **7**, 57–66
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2010.7.05
Revista editada per **ACAM**

Mesura i modelització de la irradiància solar eritemàtica global sobre plans inclinats

D. Serrano[1], M. J. Marín[2], M. P. Utrillas[1], F. Tena[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, València

[2]Laboratori Meteorologia-Climatologia, Unitat Mixta CEAM-UVEG. Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), Charles R. Darwin 14, 46980 Paterna, València

Rebut: 27-X-2009 – Acceptat: 20-II-2010 – **Versió Traduïda**

Correspondència a: David.Serrano@uv.es

Resum

L'objectiu d'aquest treball és la caracterització de la irradiància solar eritemàtica (UVER) global sobre plans inclinats. Per a això, s'han estudiat diferents models geomètrics, tant isòtrops com anisòtrops, que han estat utilitzats per a estimar l'UVER global sobre plans inclinats a 40° en les orientacions nord, sud, est i oest. S'ha suposat la hipòtesi que aquests models, desenvolupats tots ells inicialment per a obtenir la irradiància difusa en tot l'espectre solar, poden ser aplicats en l'interval molt més restringit de l'UVER. Els resultats han estat comparats amb les dades experimentals mitjançant els següents paràmetres estadístics: la desviació mitjana, la desviació absoluta mitjana i la desviació quadràtica mitjana. L'UVER global s'ha analitzat per a totes les condicions de cel i per a condicions de cel clar, i s'ha comprovat que no existeixen diferències apreciables entre els diferents models, en tots dos casos. En conjunt, el model que millors resultats proporciona és el model anisòtrop de Gueymard tot i que millora en menys del 2% el model Isòtrop.

Paraules clau: irradiància eritemàtica UV (UVER), models geomètrics, UVER en plans inclinats, irradiància difusa

1 Introducció

De tots els efectes que desencadena la radiació UV en els éssers humans, el més comú és l'eritema o cremada solar. La CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) va adoptar el 1987 una corba estàndard d'eritema (McKinlay i Diffey, 1987; CIE, 1998) que és comunament utilitzada per a determinar la radiació solar UV eritemàtica (UVER). L'UVER es calcula mitjançant la convolució de la corba espectral de la radiació incident a nivell del terra amb la corba de l'espectre d'acció proposat per la CIE.

La mesura de la irradiància eritemàtica incident sobre superfícies horitzontals no sempre és el mètode més adequat per a poder estimar la dosi real rebuda pels éssers humans. Per aquest motiu el coneixement de la irradiància incident sobre superfícies inclinades pot resultar important per a estudis dosimètrics. 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). La influència de la topografia i la reflectivitat del terra han estat estudiades 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.

Els models utilitzats en aquest treball per a estimar l'UVER sobre plans inclinats són models geomètrics, ja que calculen la irradiància difusa repartida entre diversos components direccionals (circumsolar, part isòtropa, zenital, etc.) en funció de factors purament geomètrics i també de les condicions del cel mitjançant els índexs d'anisotropia. Per a poder modelitzar la radiació incident sobre un pla diferent de l'horitzontal cal calcular el seu component directe i difús tant reflectit com procedent del cel a partir de les irradiàncies UVER mesurades en un pla horitzontal, en concret els components global i difús. La principal diferència entre els diferents models geomètrics radica en la manera de calcular la radiació difusa del cel, ja que s'han de tenir en compte factors de configuració i l'anisotropia de la volta celeste. Hem suposat que els models desenvolupats inicialment per a obtenir la irradiància difusa en tot l'espectre

2010 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".

Figura 1. Dispositiu experimental per a la mesura de la irradiància UVER difusa.

Figura 2. Dispositiu experimental per a la mesura de la irradiància UVER global sobre plans inclinats.

solar poden ser aplicats en l'interval espectral de l'UVER. Aquests models, en la seva gran majoria, van ser desenvolupats en les dècades dels 70 i dels 80 (Utrillas et al., 1991a). D'entre tots ells hem escollit els més representatius i els que a més segueixen utilitzant-se en els treballs més recents (Notton et al., 2006).

2 Instrumentació

Per tal d'estudiar els efectes de la irradiància sobre plans diferents de l'horitzontal, s'ha dissenyat i posat en funcionament una estació de mesura d'UVER instal·lada a la Facultat de Física pel Grup de Radiació Solar de València i que compta amb quatre radiòmetres de banda ampla UVB-1 de *Yankee Environmental Systems* (YES).

Un d'ells mesura l'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, i per això realitza mesures d'irradiància difusa, també en el pla horitzontal (Figura 1). Les mesures d'UVER difusa obtingudes amb la banda d'ombra han estat corregides utilitzant el model de Batlles modificat proposat per Utrillas et al. (2007). Els valors experimentals corregits tenen una incertesa estimada en un 1%.

Els altres dos instruments restants prenen mesures d'irradiància global sobre plans inclinats a 40°, alternant les orientacions nord-sud i est-oest. Aquest darrer dispositiu es va construir en base a dues premisses: a) d'una banda, realitzar mesures d'UVB (280-315 nm) i UVER sobre plans inclinats; b) d'una altra, es desitjava que els radiòmetres prenguessin mesures en quatre angles azimutals, corresponents a les orientacions nord, sud, est i oest. Per tal de fer servir només dos radiòmetres es va dissenyar el dispositiu de la Figura 2. Els radiòmetres estan inclinats un angle pròxim a la latitud de Burjassot (València) (39.5°), que segons diferents estudis és l'angle òptim per a captar la màxima radiació en plans inclinats (Hartley et al., 1999). A través de dos temporitzadors s'aconsegueix que la plataforma giri cada 5 minuts, alternant les dues posicions.

En conseqüència, les dades experimentals es registren cada cinc minuts en hora UTC per als instruments en posició horitzontal i cada deu minuts per als inclinats, ja que han de passar deu minuts per reprendre la mateixa posició (Esteve et al., 2006).

El radiòmetre YES-UVB-1 té un rang espectral entre els 280 i 400 nm i una sensibilitat espectral pròxima a l'espectre d'acció eritemàtic. Els sensors es calibren periòdicament una vegada a l'any i en dues fases diferents. En la primera fase, el sensor que mesura UVER global és sotmès a un calibratge estàndard i certificat a les instal·lacions de l'Institut Nacional de Tècnica Aerospacial (INTA) (Vilaplana et al., 2006). Aquest calibratge consisteix en la mesura de la resposta espectral del sensor, de la resposta angular del mateix per determinar l'error del cosinus, així com d'una intercomparació amb un espectroradiòmetre model Brewer MKIII a la intempèrie. En la segona fase, la resta de sensors són calibrats per comparació amb el d'UVER global, que exerceix de patró.

En aquest treball, es presenta una anàlisi estadística de les mesures registrades durant aproximadament tres anys i mig, des de maig de 2004 fins a octubre de 2007, juntament a les modelitzades per a aquell mateix període de temps amb diferents models geomètrics.

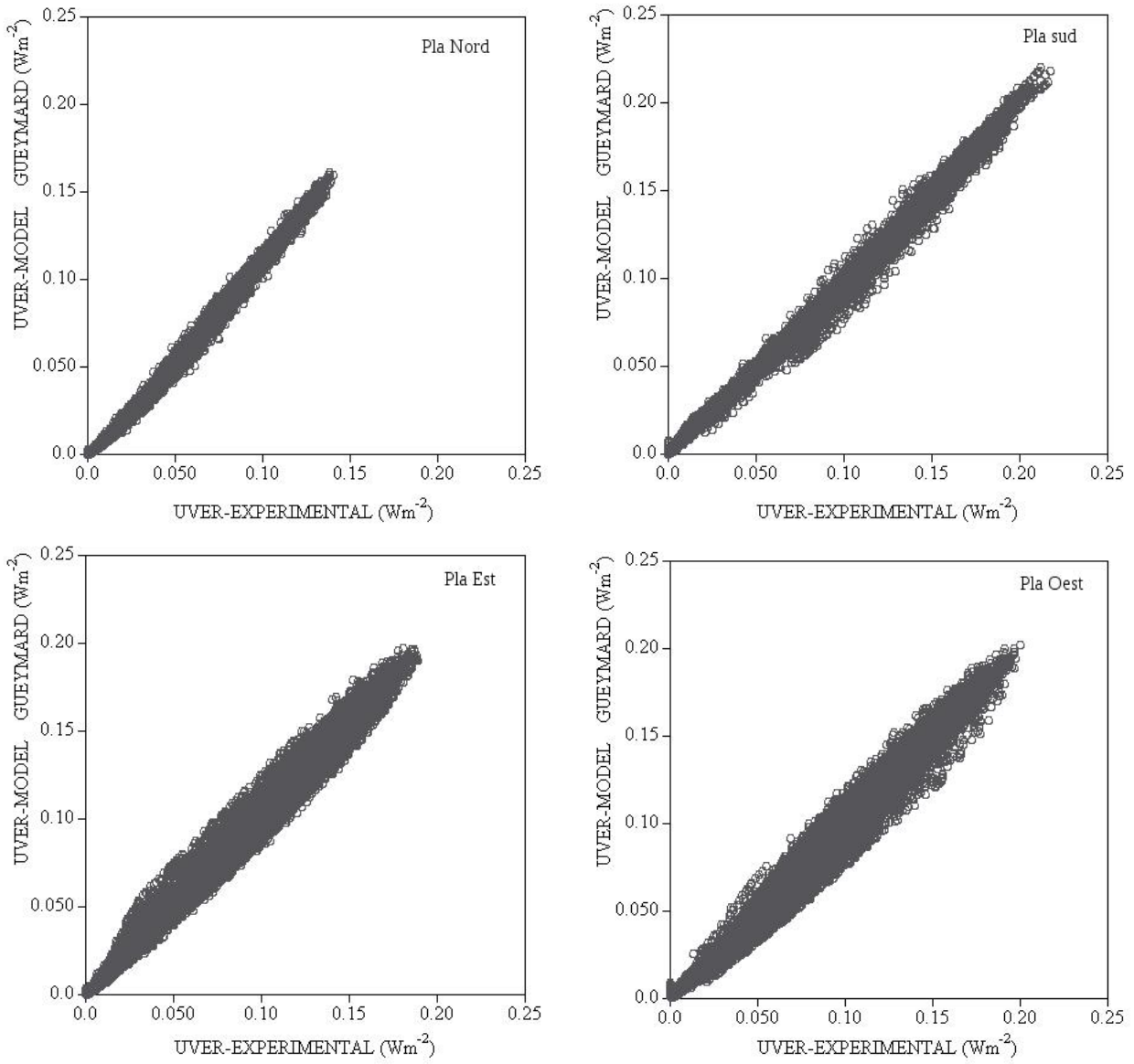

Figura 3. Valors estimats amb el model de Gueymard *vs* valors experimentals de l'UVER global. Plans nord, sud, est i oest.

3 Models per al càlcul de la radiació UVER sobre plans inclinats

3.1 Irradiància total sobre un pla inclinat

La irradiància total, I_β, rebuda sobre un pla inclinat amb un angle d'inclinació β i en un pla azimutal A_p, es calcula com la suma de tres termes, la irradiància directa, la difusa reflectida pel terra i la difusa procedent del cel.

$$I_\beta = I_{b,\beta} + I_{r,\beta} + I_{d,\beta} \tag{1}$$

El primer terme, corresponent a la irradiància directa, ve donat per la relació geomètrica:

$$I_{b,\beta} = I_{b,n} \cos\theta \tag{2}$$

on $I_{b,n}$ és la irradiància solar eritemàtica directa normal i θ l'angle d'incidència solar en un pla inclinat.

Si la reflexió és considerada com a isòtropa, la irradiància difusa reflectida pel terra serà:

$$I_{r,\beta} = \frac{1}{2}\rho I(1 - \cos\beta) \tag{3}$$

on I és la irradiància solar eritemàtica global en un pla horitzontal i ρ és l'albedo, que per al ciment (sòl del present treball) en l'UV té un valor constant de 0.1.

Per tant, els dos primers components estan ben determinats geomètricament si se suposa que la reflexió pel terra és isòtropa. La irradiància difusa procedent del cel és la més difícil d'obtenir i serà aquest component el que calcularem tenint en compte els diferents models geomètrics de radiació descrits a continuació.

3.2 Models isòtrops i models pseudo-isòtrops

La irradiància difusa procedent del cel es considera distribuïda uniformement sobre tota la volta celeste i és representativa de condicions de cel cobert. En aquest cas, la irradiància difusa procedent del cel és:

$$I_{d,\beta} = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos\beta) \tag{4}$$

essent independent del pla azimutal i on I_d és la irradiància solar eritemàtica difusa en un pla horitzontal.

Aquest model, anomenat model Isòtrop, va ser proposat per Liu i Jordan (1962) i subestima el component difús sobre un pla inclinat. La suposició d'un cel isòtrop per a la radiació difusa no és realista per a totes les condicions de cel, ja que la meitat sud de la volta celeste és la responsable del 63% de la radiació solar difusa total procedent del cel (Hamilton i Jackson, 1985).

Koronakis (1986) va modificar la suposició d'un cel difús isotròpic, essent la nova expressió per a la irradiància difusa:

$$I_{d,\beta} = \frac{1}{3} I_d (2 + \cos\beta) \tag{5}$$

Badescu (2002) també va modificar la suposició d'un cel isòtrop difús canviant alguns coeficients del model Isòtrop per a arribar a una nova expressió i obtenir resultats acceptables per a diferents orientacions simultàniament:

$$I_{d,\beta} = \frac{1}{4} I_d [3 + \cos(2\beta)] \tag{6}$$

3.3 Models anisòtrops

3.3.1 Model de Bugler

Bugler (1977) va afegir un terme correctiu al model Isòtrop per a tenir en compte la irradiància difusa que prové de l'àrea propera al sol i de la resta del cel segons l'elevació solar:

$$I_{d,\beta} = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos\beta) + 0.05 I_{b,\beta} \cdot \left[\cos\theta - \frac{1}{\cos\theta_z}\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)\right] \tag{7}$$

on θ_z és l'angle zenital solar.

3.3.2 Model de Temps-Coulson

Temps i Coulson (1977) introdueixen dos factors en l'equació de Liu i Jordan (Equació 4) que simulen l'anisotropia del cel en condicions de cel serè, considerant com a vàlid per a cel cobert el model Isòtrop. El primer d'aquests factors de correcció pren en consideració la irradiància difusa que prové de la zona circumsolar i és:

$$P_1 = 1 + \cos^2\theta \sin^3\theta_z \tag{8}$$

El segon factor corrector pren en consideració la brillantor del cel prop de l'horitzó:

$$P_2 = 1 + \sin^3\frac{\beta}{2} \tag{9}$$

La irradiància difusa procedent del cel ve determinada per:

$$I_{d,\beta} = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos\beta)\left[1 + \sin^3\frac{\beta}{2}\right] \cdot (1 + \cos^2\theta \sin^3\theta_z) \tag{10}$$

3.3.3 Model de Hay i model millorat de Hay-Willmott

3.3.3.1 Model de Hay

En aquest model desenvolupat per Hay (1979) la irradiància difusa en un pla inclinat es considera la suma del component circumsolar que prové des de la direcció propera al disc solar i un component difús distribuït isòtropament des de la resta de la volta celeste. Aquests dos components són ponderats segons un índex d'anisotropia, F_{Hay}, que representa la transmitància a través de l'atmosfera de la irradiància directa:

$$F_{Hay} = \frac{I_b}{I_0} \tag{11}$$

on I_b és la irradiància solar eritemàtica directa en un pla horitzontal i I_0 la irradiància eritemàtica extraterrestre en un pla horitzontal.

Per tant, la irradiància difusa en un pla inclinat és:

$$I_{d,\beta} = I_d \left[F_{Hay}\frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + (1 - F_{Hay})\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)\right] \tag{12}$$

És evident que quan la irradiància difusa s'aproxima al seu valor global ($I_d \approx I$), és a dir en dies de cel ennuvolat, el model de Hay es redueix al model Isòtrop.

3.3.3.2 Model de Hay-Willmott

Willmott (1982) va fer servir la mateixa hipòtesi que Hay i va definir un nou índex anisòtrop com:

$$K_\beta = \frac{I_{b,n}}{I_0}\cos\theta \tag{13}$$

tenint en compte ara l'angle d'incidència en lloc de l'angle zenital solar.

En aquest model la irradiància difusa per a un cel anisòtrop serà:

$$I_{d,ani} = \frac{I_d K_\beta}{\cos\theta_z} \tag{14}$$

i la irradiància difusa per a un cel isòtrop:

$$I_{d,iso} = I_d C_\beta \left(1 - \frac{K_0}{\cos\theta_z}\right) \tag{15}$$

on K_0 és l'índex d'anisotropia de Willmott per a una superfície horitzontal, essent:

$$K_0 = \frac{I_{b,n}}{I_0} \cos\theta_z \tag{16}$$

que coincideix amb l'índex d'anisotropia proposat per Hay originalment, F_{Hay}.

El terme C_β (Revfeim, 1978) és un factor de reducció isòtrop per a plans inclinats:

$$C_\beta = 1.0115 - 0.20293\beta - 0.080823\beta^2 \tag{17}$$

per a $0.5 \leq C_\beta \leq 1.0$, amb β en radians.

$$I_{d,\beta} = I_d \left[\frac{K_\beta}{\cos\theta_z} + C_\beta \left(1 - \frac{K_0}{\cos\theta_z} \right) \right] \tag{18}$$

3.3.4 Model de Ma-Iqbal

Ma i Iqbal (1983) proposen un model en què la irradiància difusa ve separada en dos termes: un de circumsolar i un altre que considera la resta de volta celeste.

El model de Ma-Iqbal, a diferència del model de Hay, utilitza com a índex d'anisotropia l'índex de claredat:

$$k_t = \frac{I}{I_0} \tag{19}$$

$$I_{d,\beta} = I_d \left[k_t \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + (1 - k_t) \frac{1 + \cos\beta}{2} \right] \tag{20}$$

3.3.5 Model de Skartveit i Olseth

Skartveit i Olseth (1986) consideren que en cas de cel cobert una important part de la irradiància difusa prové del zenit. Els autors suggereixen introduir un factor de correcció Z, com una funció lineal de l'índex d'anisotropia de Hay, F_{Hay}:

$$Z = 0.3 - 2F_{Hay} \tag{21}$$

essent $Z = 0$ quan $F_{Hay} \geq 0.15$.

$$I_{d,\beta} = I_d \left[F_{Hay} \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + Z\cos\beta \right] + \\ + I_d \left[(1 - F_{Hay} - Z) \frac{1 + \cos\beta}{2} - S(\Omega_i, \theta_i) \right] \tag{22}$$

on $S(\Omega_i, \theta_i)$ és la porció d'angle sòlid amb obstacles a l'horitzó real. En el nostre cas, els obstacles a l'horitzó són pràcticament inexistents, i aquest darrer terme pot ser menyspreat, ja que l'ordre de magnitud és molt menor que la resta dels termes.

3.3.6 Model de Gueymard

Gueymard (1984, 1986) considera que la irradiància per a cel parcialment cobert es pot expressar com una combinació lineal de valors entre cel totalment cobert R_{d1} i cel serè R_{d0}, que al seu torn és la suma del component circumsolar i d'un factor hemisfèric, essent la irradiància difusa:

$$I_{d,\beta} = I_d \left[(1 - N_G) R_{d0} + N_G R_{d1} \right] \tag{23}$$

on N_G és un terme que pondera la nuvolositat:

$$N_G = \max[\min(Y, 1), 0] \tag{24}$$

essent Y una funció lineal que depèn de $\frac{I_d}{I}$, és a dir, introdueix un índex anisòtrop per tal de mesurar la transmitància a través de l'atmosfera de la radiació difusa. Gueymard va proposar de determinar Y mitjançant les expressions:

$$Y = 6.6667 \frac{I_d}{I} - 1.4167 \tag{25}$$

si $\frac{I_d}{I} \leq 0.227$.

$$Y = 1.2121 \frac{I_d}{I} - 0.1758 \tag{26}$$

en els altres casos.

La irradiància per a cel serè R_{d0} es calcula com la suma del component circumsolar i del factor hemisfèric:

$$R_{d0} = e^{\left(a_0 + a_1 \cos\theta + a_2 \cos^2\theta + a_3 \cos^3\theta\right)} + F(\beta) G(\gamma) \tag{27}$$

essent els coeficients a_i funcions de l'elevació solar, γ.

$$F(\beta) = \frac{1 - 0.2249 \sin^2\beta + 0.1231 \sin(2\beta)}{1 - 0.2249} - \\ - \frac{0.0342 \sin(4\beta)}{1 - 0.2249} \tag{28}$$

$$G(\gamma) = 0.408 - 0.323\gamma' + 0.384\gamma'^2 - 0.170\gamma'^3 \tag{29}$$

essent $\gamma' = 0.01\gamma$ (γ en graus).

La irradiància per a un cel cobert R_{d1} només depèn de l'angle d'inclinació del pla i d'un factor de correcció b comprès entre els valors 1 i 2:

$$R_{d1} = \frac{1 + \cos\beta}{2} - \left(1 + \frac{3}{2b} \right)^{-1} \cdot \\ \cdot \left(\frac{\beta\cos\beta - \sin\beta}{\pi} + \frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \tag{30}$$

amb β en radians. Prendrem per a b el seu valor mitjà 1.5, segons la recomanació de l'autor (Gueymard, 1987).

3.3.7 Model de Pérez

El model de Pérez et al. (1986) és probablement el model més utilitzat en la seva versió simplificada (Pérez et al., 1987). Aquest model incorpora els tres subcomponents per considerar: la irradiància difusa circumsolar, la difusa de l'horitzó i la difusa isòtropa que ve determinada per dos coeficients, obtinguts empíricament, F_1 i F_2, anomenats "coeficients de reducció de la brillantor". L'expressió

del component difús en un pla inclinat segons el model de Pérez és:

$$I_{d,\beta} = I_d \left[F_1 \frac{a}{b} + (1 - F_1) \frac{1 + \cos\beta}{2} + F_2 \sin\beta \right] \quad (31)$$

Els termes a i b són calculats com:

$$a = \max(0, \cos\theta) \quad (32)$$

$$b = \max(\cos 85°, \cos\theta_z) \quad (33)$$

F_1 i F_2 són funcions de tres variables (θ_z, ε, Δ), que descriuen les condicions del cel, essent:

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_b}{I_d} + 1.041\theta_z^3}{1 + 1.041\theta_z^3} \quad (34)$$

$$\Delta = \frac{I_d m}{I_{0,n}} = \frac{I_d}{I_{0,n} \cos\theta_z} \quad (35)$$

on m és la massa òptica i essent ε l'índex de claredat del cel i Δ l'índex de brillantor del cel del model de Pérez.

F_1 i F_2 són els coeficients reduïts del model que proporcionen el grau d'anisotropia, i es calculen segons les expressions:

$$F_1 = \max[0, F_{11} + F_{12}\Delta + F_{13}\theta_z] \quad (36)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22}\Delta + F_{23}\theta_z \quad (37)$$

amb θ_z en radians.

Els coeficients F_{ij} van ser trobats mitjançant una anàlisi estadística de les dades empíriques per a una localització específica (València), en funció del valor del l'índex de claredat del cel, ε (Utrillas i Martínez-Lozano, 1994).

4 Resultats i discussió

Les mesures s'han portat a terme al Campus de Burjassot (València), que es troba situat a 39.5°N de latitud, 0.4°W de longitud i a 40 m d'alçada sobre el nivell del mar i on els obstacles de l'horitzó no superen l'alçada de 4°, amb l'excepció d'una petita banda al nord-oest (Esteve et al., 2006). Per a l'estudi d'aquests models es disposa d'una base de dades experimentals d'UVER amb més de 28.000 valors deu-minutals per a angles zenitals solars inferiors a 70° evitant així errors de cosinus elevats, per a cadascun dels quatre plans, nord, sud, est i oest.

Amb l'objectiu de quantificar la bondat dels diferents models, hem utilitzat els següents paràmetres estadístics: desviació mitjana (MBD), desviació absoluta mitjana (MAD) i desviació quadràtica mitjana (RMSD), que indiquen la desviació entre els valors experimentals i els estimats pels models, essent les expressions d'aquests paràmetres (Willmott i Matsuura, 2005):

$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)}{N\bar{x}} \quad (38)$$

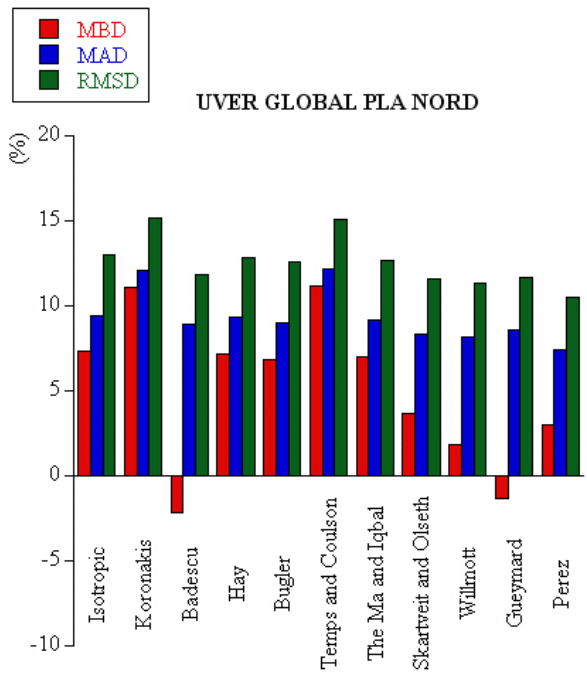

Figura 4. Desviació mitjana (MBD), desviació absoluta mitjana (MAD) i desviació quadràtica mitjana (RMSD), que indiquen la desviació relativa entre els valors experimentals i els estimats per tots els models presentats en aquest treball per a l'orientació nord.

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^{N}|y_i - x_i|}{N\bar{x}} \quad (39)$$

$$RMSD = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2}{N}\right]^{1/2}}{\bar{x}} \quad (40)$$

on y_i és el valor estimat i-èssim, x_i el valor mesurat i-èssim, $\bar{x}$ el valor mitjà mesurat i N el número total de dades analitzades.

El paràmetre estadístic RMSD confereix major pes que el MAD als punts que estan més allunyats del valor mitjà, tanmateix Willmott i Matsuura (2005) recomanen l'ús del MAD com a avaluació de l'error mitjà. Tots dos adquireixen sempre valors positius. Al contrari, l'MBD és la diferència entre el valor estimat i l'experimental, corresponent a una sobreestimació o una subestimació dels valors experimentals per part del model (Utrillas et al., 1991b). Per a tots els indicadors estadístics s'han agafat valors relatius, amb la finalitat de facilitar la seva comparació.

A la Figura 3 es mostren a tall d'exemple els valors estimats amb el model anisòtrop de Gueymard, per ser el model que millors resultats proporciona a València per a les quatre orientacions enfront dels valors experimentals. En aquesta figura s'observa la baixa dispersió que es produeix al pla nord, així com l'alta dispersió que trobem tant a l'orientació est com a l'oest. S'observa també que a l'orientació sud es registren els valors més elevats.

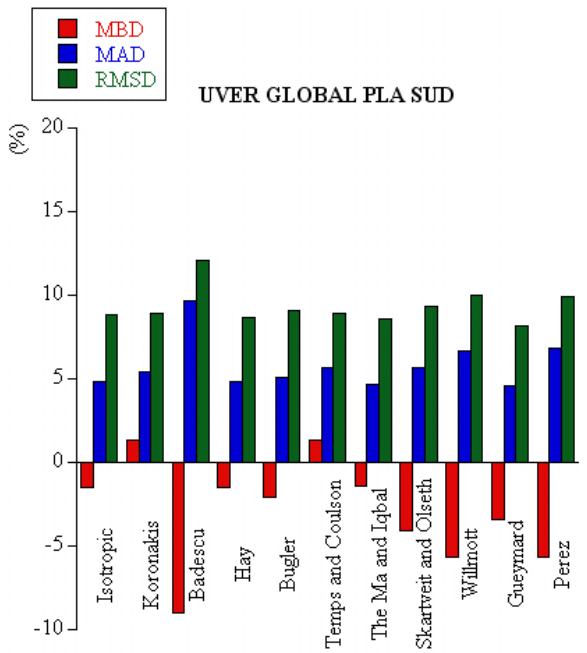

Figura 5. Com a la Figura 4 per a l'orientació sud.

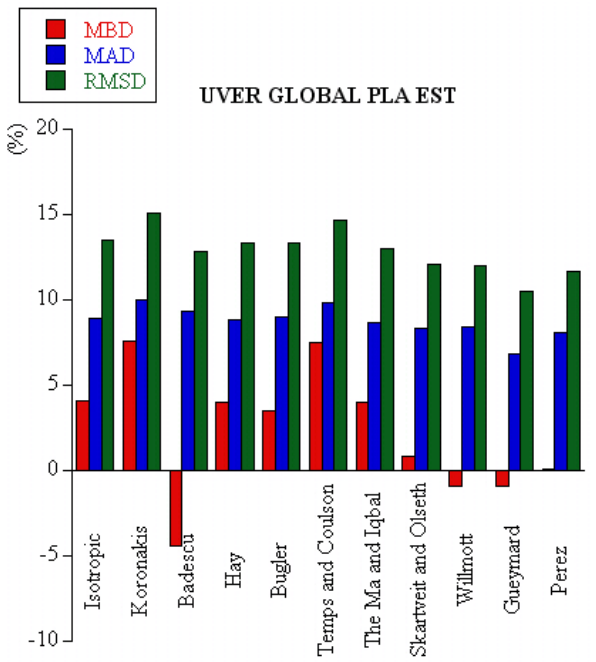

Figura 6. Com a la Figura 4 per a l'orientació est.

4.1 UVER global a les superfícies inclinades per a totes les condicions de cel

Els resultats per al pla nord, que és el pla en què rebem menor irradiància de les quatre orientacions estudiades, es mostren a la Figura 4. El paràmetre estadístic MBD relatiu mostra que tots els models, a excepció del pseudo-isòtrop de Badescu i l'anisòtrop de Gueymard, sobreestimen els valors experimentals, essent els models de Koronakis i de Temps-Coulson els que més sobreestimen les mesures experimentals, amb valors propers a l'11%. Respecte del paràmetre estadístic MAD relatiu, cap dels models estudiats supera el 10% tret dels models de Koronakis i de Temps-Coulson amb valors del 12%. El model que millor resultat proporciona és el de Pérez, amb un 7%, que millora el model Isòtrop en un 2%. Pel que fa al paràmetre estadístic RMSD relatiu, cap dels models no supera el 16%, i la majoria dels models proporcionen valors per sota del 13%, essent de nou el model de Pérez el que proporciona un millor resultat amb un 11%. Els models més desfavorables són els de Koronakis i Temps-Coulson, amb valors per sobre del 15%.

Al pla orientat al sud (Figura 5) trobem els millors resultats de tots els plans de diferent inclinació estudiats. Aquesta orientació és la que rep una major irradiància al llarg del dia i en què la radiació directa juga un paper més important. També és remarcable que la majoria de models han estat desenvolupats inicialment per aquesta orientació. L'MBD relatiu mostra que la majoria dels models subestimen els valors experimentals, tret dels models de Koronakis i de Temps-Coulson, que els sobreestimen, amb valors per sota del 2%. Pel que fa al MAD relatiu, al pla sud trobem que els resultats obtinguts són els menors de totes les orientacions considerades, amb valors inferiors al 10% fins i tot en el cas més desfavorable, el model de Badescu. La majoria de models proporcionen un MAD relatiu comprès entre el 5% i el 6%, que és comparable a la incertesa de les mesures experimentals, que és del 5-6%. Per la seva banda, l'RMSD relatiu proporciona valors per sota del 13%, essent per a la majoria de models entre el 9% i el 10%. Per tant, a excepció del model de Badescu, que subestima els resultats en excés, tots els models es comporten satisfactòriament, essent el model de Gueymard el que millors resultats proporciona, tot i que millorant el model Isòtrop en menys de l'1%.

Els plans est i oest són dos plans que reben la mateixa irradiància al llarg del dia, per la qual cosa trobem resultats similars per als diferents paràmetres estadístics estudiats, segons mostren les Figures 6 i 7 respectivament. L'MBD relatiu mostra que al pla orientat a l'est la majoria dels models sobreestimen els valors experimentals (en general, menys d'un 5%) tret de tres models que el subestimen. Per al pla orientat a l'oest la meitat dels models sobreestimen els valors experimentals i l'altra meitat els subestimen, tots per sota del 5%, tret del model de Badescu, que els subestima en un 7%. Per al MAD trobem per a les dues inclinacions valors molt semblants, per sota del 10%, essent el model de Gueymard el que millor resultat proporciona amb un valor inferior al 7%, en els dos casos. Respecte de l'RMSD, els dos plans proporcionen valors per sota del 16%, essent en general els valors obtinguts per al pla oest lleugerament inferiors als obtinguts per al pla est. També en aquest cas, el model de Gueymard és el que proporciona un millor resultat, amb un valor de l'11% en els dos plans.

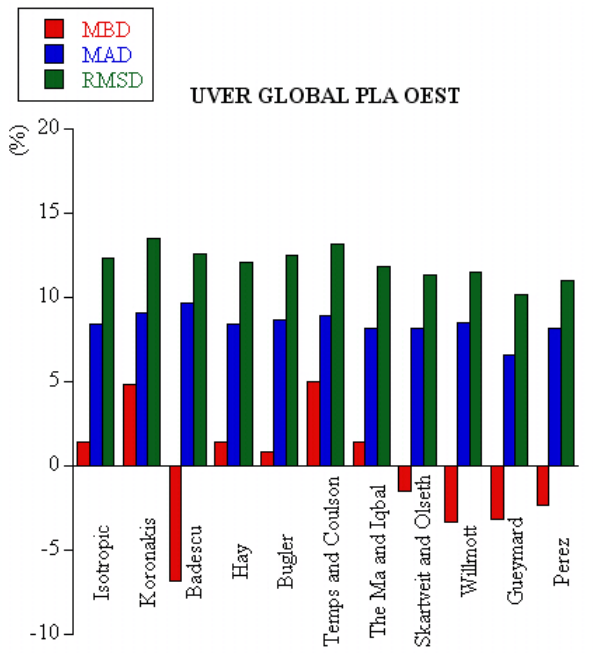

Figura 7. Com a la Figura 4 per a l'orientació oest.

El model de Gueymard és el que proporciona millors resultats en totes les orientacions tret del nord, millorat pel model de Pérez, tot i que aquesta millora és únicament de l'1%. Convé remarcar que cap model, inclòs del de Gueymard o el de Pérez, millora significativament el model Isòtrop, que obté una discrepància respecte d'aquests menor del 2%, per a totes les orientacions.

4.2 UVER global en superfícies inclinades per a cel serè

L'estudi s'ha repetit prenent únicament els valors experimentals de condicions de cel clar. Per a seleccionar aquestes dades s'ha utilitzat l'índex de claredat modificat $k_{t'}$, que presenta l'avantatge respecte de l'índex de claredat de disminuir la dependència amb l'angle zenital solar i es defineix com (Pérez et al., 1990):

$$k_{t'} = \frac{k_t}{1.031e^{-1.4/(0.9+9.4/m)} + 0.1} \tag{41}$$

on k_t és l'índex de claredat (Equació 19) i m és la massa òptica.

A la Figura 8 es pot observar el percentatge dels valors $k_{t'}$ que es té per a Burjassot (València). La figura s'ha obtingut amb els valors de les mesures preses durant tres anys i mig. A partir d'ella es pot concloure que a València tenim predomini de cel serè ja que els percentatges més elevats de l'índex de claredat estan en els intervals compresos entre 0.6 i 0.8. Com a criteri per a identificar les condicions de cel clar s'ha pres que el valor de l'índex de claredat modificat arribi a tenir un valor superior a 0.7. Un cop seleccionats els valors de cel serè, s'ha repetit l'anàlisi de

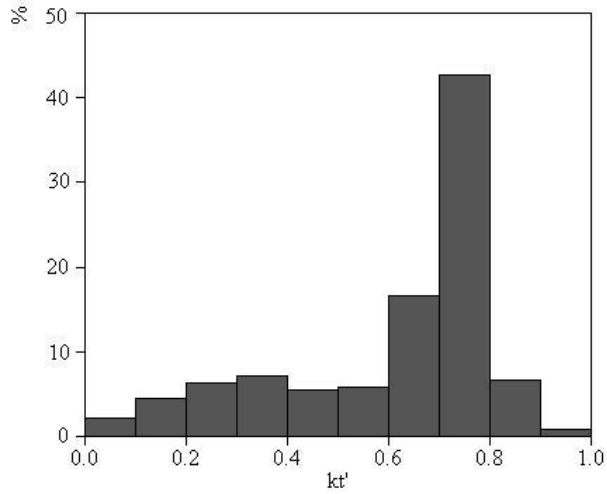

Figura 8. Percentatge de l'índex de claredat modificat per a Burjassot (València).

l'MBD, MAD i RMSD per a cada model geomètric estudiat anteriorment.

Per a les orientacions nord i est tots els models presenten un MBD relatiu positiu, és a dir, sobreestimen els valors experimentals, tret del model de Badescu al pla est. En canvi, per a les orientacions sud i oest tots els models els subestimen, tret dels models de Koronakis i Temps-Coulson al pla sud. Respecte dels paràmetres estadístics MAD i RMSD relatius, els models empitjoren els resultats respecte de considerar totes les condicions de cel, per a les orientacions nord, est i oest. Al pla sud també passa el mateix, tret dels models Koronakis i Temps-Coulson que milloren lleugerament els resultats.

En general, per a totes les orientacions, els errors són més grans que els obtinguts quan consideràvem totes les condicions de cel. Això és perquè originalment aquests models van ser desenvolupats per a tota l'amplada de la banda de l'espectre solar on el component difús és només el 10% de la irradiància total (Martínez-Lozano et al., 1994), en canvi per al rang de l'UVER el component difús en dies clars arriba a agafar valors del 60% (Utrillas et al., 2007), per tant les condicions d'anisotropia no es corresponen amb les prediccions dels models.

Els resultats empitjoren per al model Isòtrop entre un 1% i un 2% i per al model de Gueymard en menys de l'1%. Això vol dir que els models estudiats es comporten millor en cas de cel ennuvolat que considerant només condicions de cel serè. Tanmateix, al pla sud, els models de Koronakis i Temps-Coulson milloren els resultats en un 2% ja que van ser desenvolupats originalment per a cel serè.

5 Conclusions

En aquest treball s'ha calculat l'UVER global mitjançant models geomètrics i s'ha comparat amb les

mesures experimentals per a plans inclinats 40° i orientacions nord, sud, est i oest. Per tal d'avaluar els resultats s'han analitzat els paràmetres estadístics MBD, MAD i RMSD relatius.

Utilitzant els valors d'UVER corresponents a totes les condicions de cel, els valors de l'MBD relatiu mostren que gairebé tots els models sobreestimen els valors experimentals en l'orientació nord, mentre que per a l'orientació sud, la majoria dels models els subestimen. En les orientacions est i oest, tret dels models de Badescu, Koronakis i Temps-Coulson, els models sobreestimen o subestimen els resultats per sota del 5%.

Tots els models analitzats reprodueixen satisfactòriament l'UVER global en el pla sud amb un MAD al voltant del 5%, obtenint discrepàncies més grans en els altres plans, de l'ordre del 9%. En el pla sud els valors de l'RMSD són aproximadament del 9%, i per als altres plans es troben compresos entre l'11% i el 15%. El model de Gueymard és el que proporciona millors resultats en totes les orientacions tret de l'orientació nord, on el model de Pérez ofereix millors resultats. Tanmateix, cap model en cap orientació aconsegueix millorar en més del 2% els resultats que proporciona el model Isòtrop. Un cop analitzats els diferents plans d'incidència, s'observa que per a cada orientació els millors resultats els presenten models diferents, tot i que la diferència entre ells no és significativa.

Per tal d'analitzar la influència de la nuvolositat en la modelització de l'UVER en plans inclinats, s'ha repetit l'estudi anterior considerant només la condició de cel serè, que han estat seleccionats mitjançant un valor de l'índex de claredat modificat ($k_{t'}$) més gran que 0.7. Analitzant els valors del $k_{t'}$ per a Burjassot (València) en el període considerat en aquest estudi, es conclou que hi ha predomini de cel serè, ja que el 65% dels casos tenen un $k_{t'}$ més gran que 0.6.

L'anàlisi de l'MBD relatiu en el cas de condicions de cel serè demostra que, en l'orientació nord, els models sobreestimen els valors experimentals més que en el cas anterior, mentre que per a l'orientació sud també la subestimació és més gran. Respecte de les orientacions est i oest es troben resultats semblants al cas de totes les condicions de cel. Respecte del MAD i l'RMSD relatius, els resultats són pitjors que quan es consideren totes les condicions de cel en les orientacions nord, est i oest. En l'orientació sud, els resultats són pitjors en el cas de cel serè, tret dels obtinguts pels models de Koronakis i Temps-Coulson. Convé recordar que aquests models van ser desenvolupats per aquestes condicions de cel clar.

En general per a totes les orientacions, els errors obtinguts quan es consideren només cel serè són més grans que els obtinguts quan es consideren totes les condicions de cel. El model de Gueymard és l'excepció ja que inclou un factor de nuvolositat, i per tant funciona adequadament tant en condicions de cel cobert com clar.

Per a millorar aquests resultats caldria adaptar aquests models per tal de minimitzar els errors que s'obtenen, especialment per als plans diferents al sud, que són les orientacions on es registren discrepàncies més grans. Un altre aspecte per millorar és evitar la subestimació dels models, que es dóna principalment en el pla sud, recalculant els factors d'anisotropia, per exemple definint un nou índex de claredat específic en el rang de l'UVER, que sigui representatiu del major pes del component difús en aquest rang respecte de la irradiància total.

Agraïments. Aquest treball ha estat finançat pel *Ministerio de Ciencia e Innovación* (MICINN) a través dels projectes "GRACCIE (CSD2007-00067, Programa CONSOLIDER-INGENIO 2010) i CGL2007-60648, juntament amb el Fons Social Europeu a través del contracte "Torres Quevedo" de M. J. Marín. La Fundació CEAM està finançada per la Generalitat Valenciana i Bancaixa.

Apèndix A Nomenclatura

- a_0, a_1, a_2, a_3: coeficients del model de Gueymard.
- F, G: funcions del model de Gueymard.
- F_{Hay}: índex d'anisotropia del model de Hay.
- F_1, F_2: funcions de brillantor reduïda del model de Pérez.
- I: irradiància solar eritemàtica global en un pla horitzontal.
- I_β: irradiància solar eritemàtica global en un pla inclinat β.
- I_b: irradiància solar eritemàtica directa en un pla horitzontal.
- $I_{b,n}$: irradiància solar eritemàtica directa normal.
- $I_{b,\beta}$: irradiància solar eritemàtica directa per a un pla inclinat β.
- I_d: irradiància solar eritemàtica difusa en un pla horitzontal.
- $I_{d,ani}$: irradiància solar eritemàtica difusa anisòtropa.
- $I_{d,iso}$: irradiància solar eritemàtica difusa isòtropa.
- $I_{d,\beta}$: irradiància solar eritemàtica difusa en un pla inclinat β.
- $I_{r,\beta}$: irradiància solar eritemàtica reflectida en un pla inclinat β.
- I_0: irradiància extraterrestre eritemàtica en un pla horitzontal.
- K_β: índex d'anisotropia del model de Hay i Willmott.
- N_G: terme que pondera la nuvolositat, model de Gueymard.
- P_1, P_2: paràmetres del model de Temps i Coulson.
- R_{d0}: coeficient de Gueymard per a cel serè.
- R_{d1}: coeficient de Gueymard per a cel ennuvolat.
- Y: funció de transmitància atmosfèrica de Gueymard.
- Z: factor de correcció del model Skarveit i Olseth.
- γ: elevació solar.
- A_p: pla azimutal.
- m: massa òptica.
- Δ: índex de brillantor del cel del model de Pérez.

- ε: índex de claredat del cel del model de Pérez.
- $k_{t'}$: índex de claredat modificat.
- β: inclinació del pla.
- θ: angle d'incidència solar en un pla inclinat.
- θ_z: angle zenital solar.
- ρ: albedo.
- Ω: angle sòlid.

Referències

Badescu, V., 2002: *3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces*, Renew Energy, **26**, 221–223.

Bugler, J. W., 1977: *The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation*, Sol Energy, **19**, 477–491.

CIE, 1998: Erythema reference action spectrum and standard erythema dose, Vienna, ISO 17166:1999/CIE S007-1998.

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.

Gueymard, C., 1984: Physical modelling of the diffuse irradiance on tilted planes as a function of the aerosols anisotropic effect, Meteorology and renewable energies conference, AFME, Valbonne, France, pp. 303-314.

Gueymard, C., 1986: Radiation on tilted planes: A physical model adaptable to any computational time-step, Proceedings of INTERSOL85, Elmsford, NY: Pergamon Press, pp. 2463-2467.

Gueymard, C., 1987: *An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms*, Sol Energy, **38**, 367–386.

Hamilton, H. L. i Jackson, A., 1985: *A shield for obtaining diffuse sky radiation from portions of the sky*, Sol Energy, **34**, 121–123.

Hartley, L. E., Martínez-Lozano, J. A., Utrillas, M. P., Tena, F., i Pedrós, R., 1999: *The optimisation of the angle of inclination of a solar collector to maximise the incident solar radiation*, Renew Energy, **17**, 291–309.

Hay, J. E., 1979: Study of shortwave radiation on non-horizontal surfaces, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario, rep. 79-12.

Koronakis, P. S., 1986: *On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectros in the Athens basin area*, Sol Energy, **36**, 217–225.

Liu, B. Y. H. i Jordan, R. C., 1962: *Daily insolation on surfaces tilted towards the equator*, Trans ASHRAE, pp. 526–541.

Ma, C. C. Y. i Iqbal, M., 1983: *Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces*, Sol Energy, **31**, 313–317.

Martínez-Lozano, J. A., Utrillas, M. P., i Gómez, V., 1994: *Estimation of the diffuse solar irradiation from global solar irradiation. Daily and monthly average daily values*, Renew Energy, **4**, 95–100.

McKinlay, A. F. i Diffey, B. L., 1987: *A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin*, CIE Journal, **6**, 17–22.

Notton, G., Cristofari, C., i Poggi, P., 2006: *Performance evaluation of various hourly slope irradiation models using Mediterranean experimental data of Ajaccio*, Energy Conv Manag, **47**, 147–173.

Parisi, A. V. i Kimlin, M. G., 1999: *Horizontal and sun-normal spectral biologically effective ultraviolet irradiances*, J Quant Spectrosc Radiat Transf, **35**, 151–158.

Pérez, R., Stewart, R., Arbogast, R., Seals, J., i Scott, J., 1986: *An anisotropic hourly diffuse radiation model for surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation*, Sol Energy, **36**, 481–497.

Pérez, R., Stewart, R., Ineichen, R., Seals, J., i Menicucci, D., 1987: *A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces*, Sol Energy, **39**, 221–231.

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

Revfeim, K. J. A., 1978: *A simple procedure for estimating global daily radiation on any surface*, J Appl Meteorol, **5**, 1126–1131.

Skartveit, A. i Olseth, J. A., 1986: *Modelling slope irradiance at high latitudes*, Sol Energy, **36**, 333–344.

Temps, R. C. i Coulson, K. L., 1977: *Solar radiation incident upon slopes of different orientation*, Sol Energy, **19**, 179–184.

Utrillas, M. P. i Martínez-Lozano, J. A., 1994: *Performance evaluation of several versions of the Perez tilted diffuse irradiance model*, Sol Energy, **53**, 155–162.

Utrillas, M. P., Martínez-Lozano, J. A., i Casanovas, A. J., 1991a: *Evaluation of models for estimating solar irradiation on vertical surfaces at Valencia, Spain*, Sol Energy, **47**, 223–229.

Utrillas, M. P., Martínez-Lozano, J. A., i Casanovas, A. J., 1991b: *Desviaciones entre valores estimados y experimentales de irradiancia global y difusa sobre superficies verticales*, Opt Pura Apl, **24**.

Utrillas, M. P., Marín, M. J., Esteve, A. R., Tena, F., Cañada, J., Estellés, V., i Martínez-Lozano, J. A., 2007: *Diffuse UV erythemal radiation experimental values*, J Geophys Res, **112**, D24 207.

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

Weihs, P., 2002: *Influence of ground reflectivity and topography on erythemal UV radiation on inclined planes*, Int J Biometeorol, **46**, 95–104.

Willmott, C. J., 1982: *On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors*, Sol Energy, **28**, 205–216.

Willmott, C. J. i Matsuura, K., 2005: *Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance*, Clim Res, **30**, 79–82.