

Anàlisi observacional i modelització de la sensibilitat de la irradiància solar espectral UV a l'espectre solar extraterrestre i a la columna total d'ozó

Yolanda Sola Salvatierra

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

UNIVERSITAT DE BARCELONA

DEPARTAMENT D'ASTRONOMIA I METEOROLOGIA



UNIVERSITAT DE BARCELONA



Anàlisi observacional i modelització de la
sensibilitat de la irradiància solar espectral
UV a l'espectre solar extraterrestre i a la
columna total d'ozó

Memòria presentada per
Yolanda Sola Salvatierra
per optar al grau de
Doctora en Ciències Físiques

Barcelona, novembre 2008

5 Sensibilitat a l'espectre extraterrestre en la simulació de la radiació solar UV

La motivació del present capítol és la determinació de la influència de l'espectre extraterrestre i el cicle solar en la modelització de la irradiància solar UV.

El treball presentat en aquest Capítol 5 de la memòria de la tesi és consultable a les publicacions dels congressos Sola et al. (2005) i Sola et al. (2007).

5.1 Introducció al capítol

La irradiància solar UV que arriba a la superfície terrestre depèn d'un gran nombre de factors tant astronòmics com meteorològics com ja es va detallar al Capítol 2. Això suposa que a l'hora de simular la irradiància solar mitjançant un model de transferència radiativa seran moltes les variables a caracteritzar abans de realitzar les modelitzacions. La precisió d'aquestes irradiàncies modelitzades dependrà de la qualitat i la quantitat d'aquestes dades (*Schwander et al.*, 1997) així com de les propietats inherents del propi model utilitzat (*Koepke et al.*, 1998).

A la literatura es poden trobar treballs on es mostra la diferent precisió de la irradiància solar modelitzada a la superfície terrestre depenent de la procedència de la columna total d'ozó o de les propietats dels aerosols, per exemple. En canvi, com ja s'ha comentat hi ha d'altres variables que han estat menys estudiades degut al fet

de no disposar de les dades com era el cas del perfil vertical d'atmosfera (*Kazantzidis et al.*, 2004; *Sola et al.*, 2006) o per acceptar els valors donats pel propi model, com és el cas de l'espectre extraterrestre.

En aquest capítol es vol mostrar la sensibilitat d'un model a l'espectre solar extraterrestre, irradiància al cim de l'atmosfera, obtingut del propi model radiatiu o altres disponibles a la literatura. El model de transferència radiativa escollit ha estat el SBDART 2.3 (*Ricchiazzi et al.*, 1998) ja que ja s'ha fet servir amb anterioritat en altres estudis, a més de ser el model operatiu en la predicció diària de l'UVI a Catalunya.

A més s'ha aprofitat la disponibilitat d'un espectre extraterrestre de gran precisió per a mostrar la possible influència del cicle solar a la irradiància solar UV que arriba a la superfície terrestre, també a partir dels resultats del model de transferència radiativa SBDART.

5.2 Generalitats sobre l'activitat solar

El terme *activitat solar* comprèn fenòmens a la fotosfera i la cromosfera solar tals com les taques solars, les protuberàncies i les pertorbacions coronals. També es refereix al nivell de magnetisme solar. Les taques solars són regions fosques de la fotosfera a les quals existeixen forts camps magnètics i temperatures més baixes (3800 K) que a la resta de la fotosfera (5800 K). Es creu que a aquestes regions, la convecció s'ha reduït i per això són més fredes. A la Figura 5.1 es poden observar imatges captades des del satèl·lit SOHO¹ on s'aprecien els grups de taques solars; a la Figura 5.1 (dreta) s'observa l'estructura d'una taca solar on s'aprecia la zona central més fosca anomenada *ombra* i una altra al voltant més clara anomenada *penombra*.

El nombre de taques solars fluctua entre un màxim i un mínim amb una periodicitat d'11 anys. A l'octubre de 1957, durant un període de màxim, van arribar a observar-se 254 taques i en canvi, hi ha períodes durant el mínim als quals no hi ha cap taca observable. La variació de l'activitat de les taques es coneix amb el nom de

¹SOHO, Solar & Heliospheric Observatory, és un projecte internacional entre la ESA i la NASA per estudiar el Sol des del nucli intern fins a la corona i el vent solar. Més informació a <http://sohowww.nascom.nasa.gov>

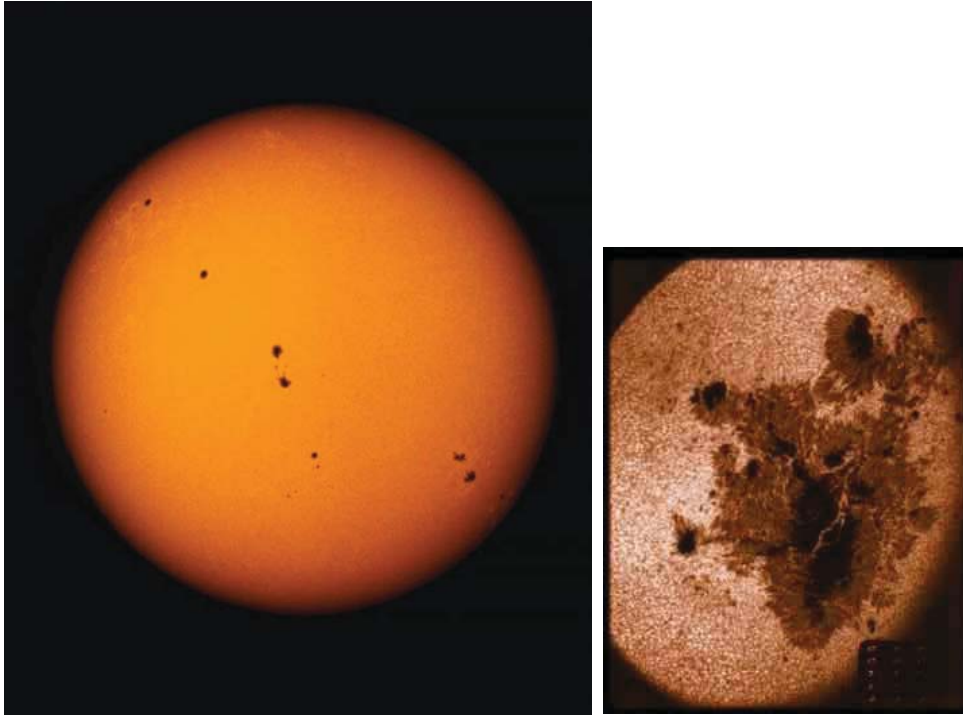


Figura 5.1: Imatges del Sol realitzades per la SOHO/MDI (ESA i NASA): (esquerra) Diversos grups de taques al disc solar, (dreta) Detall d'un grup de taques on s'aprecien les diferents regions d'ombra i penombra

cicle solar. A la Figura 5.2 es pot observar l'evolució del número de taques solars des de 1600.

Cal destacar que el nombre de taques solars observades durant els diferents màxims no és un valor constant; així per exemple, entre 1645 i 1715 es va donar un període de baixa activitat solar caracteritzat per la desaparició pràcticament total de les taques sobre la superfície del Sol. Aquest període es coneix amb el nom de *Mínim de Maunder* i es van observar només unes 50 taques (suficients per extrapolar el cicle solar) en comparació amb les 40000–50000 taques típiques. Una de les probables repercussions va ser que va afectar el clima terrestre amb un descens de les temperatures d'1 °C respecte la temperatura mitjana de 1970 coincidint amb el període més fred de l'anomenada Petita Edat de Gel que va afectar entre els segles XV i XVII Europa i Amèrica del Nord, principalment.

Una taca solar redueix l'emissió total del Sol, no obstant aquest tendeix a ser més brillant durant aquest període. Això és degut a l'aparició d'unes altres estructures

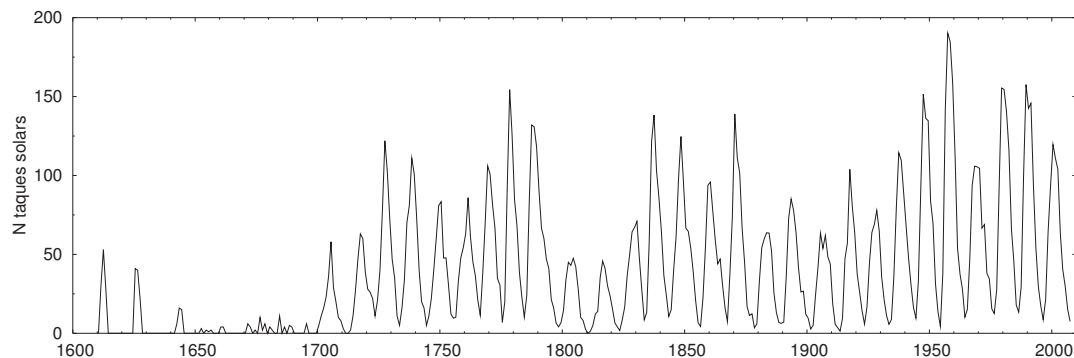


Figura 5.2: Evolució del número de taques solars anual des de 1600. Les dades entre 1600 i 1715 procedeixen de l'article *Eddy* (1976) i la resta de la sèrie està publicada pel Solar Influences Data Analysis Center a Bèlgica.

com les fàcules, regions més brillants i calentes que es localitzen properes a les taques solars. A les fàcules es produeix una major emissió de radiació i, tot i tenir una mida més petita que les taques, el fet que hi hagi una major quantitat contraresta el descens de la irradiància solar total degut a les taques solars. El resultat final és un augment de la irradiància solar total durant un màxim del cicle solar (màxim de taques i fàcules).

5.3 Sèries temporals de l'emissió solar

La “*constant*” solar és irradiància solar total definida com la quantitat d'energia per segon i metre quadrat ($W m^{-2}$) que incideix normalment al cim de l'atmosfera terrestre, a una distància d'1 ua² del Sol i el seu valor és de $1366 \pm 3 W m^{-2}$. Històricament s'havia considerat que l'emissió radiativa total del Sol era una quantitat constant, probablement degut a que la tecnologia disponible era insuficient, així com a l'interès de mesurar un únic número. No va ser fins al llançament del satèl·lit Nimbus 7 el 1978 que les mesures van assolir suficient precisió per detectar fluctuacions a la irradiància. Des de llavors, la nova era de radiòmetres dissenyats per l'espai (com ERB/Nimbus 7, ACRIM/SMM, ACRIM II/UARS, SARR/ATLAS 2, VIRGO/SOHO) han suposat la monitorització de les variacions d'irradiància so-

²ua = Unitat Astronòmica, unitat de distància que equival aproximadament a la distància mitja Terra-Sol, uns $150 \cdot 10^6$ km

lar durant les últimes dues dècades i mitja. La seva precisió i exactitud han permès mesures de variacions d'irradiància a escales temporals que varien des de minuts fins a la longitud del cicle solar (11 anys) (*Willson and Hudson, 1988; Fröhlich, 2000*).

Descensos en la irradiància de fins al 0,3% estan relacionats amb el pas de grans grups de taques solars travessant el disc solar; aquestes fluctuacions a curt termini es produeixen a escales temporals que varien entre els dies i les setmanes i estan superposades a un cicle molt més llarg d'uns 11 anys (cicle de Schwabe) que té una amplitud d'un 0,1% (consultar entre d'altres, *Willson and Hudson, 1988; Foukal and Lean, 1988*); la irradiància total és superior quan l'activitat solar està al màxim respecte la resultant durant el mínim solar. Paradoxalment, la irradiància solar és superior quan les taques solars cobreixen la superfície solar.

El fet de disposar de només dues dècades i mitja de mesures solars fa que sigui impossible detectar altres possibles cicles de període més llarg que poden suposar característiques fonamentals del Sol (tot i que registres d'indicadors indirectes de l'activitat solar com els isòtops ^{14}C i ^{10}Be mostren variacions cícliques d'uns 2300, 210 i 88 anys). L'esmentada monitorització de l'evolució de les variacions de la irradiància solar amb diferents radiòmetres ha permès la construcció de composicions de sèries temporals donant lloc a una estimació de la variabilitat de la irradiància solar durant les últimes dues dècades. Per tal de construir sèries temporals uniformes primer han hagut de ser homogeneïtzades i ajustades a una escala comuna. Una descripció detallada dels procediments seguits per construir la sèrie es pot consultar a *Fröhlich and Lean (1998)*. La Figura 5.3 mostra el resultat de la seva composició de la irradiància solar durant més de vint anys i es pot apreciar clarament variacions a escales temporals curtes i llargues.

La radiació propera a 200 nm mostra variacions amb el cicle solar molt més grans que la radiació visible; encara més, a longituds d'ona inferiors a 120 nm poden donar-se variacions superiors a un factor 2. Les capes superiors de l'atmosfera estan fortament influenciades pel flux de partícules solars i radiació UV. Llavors qualsevol canvi en aquestes capes pot afectar potencialment el clima a través de les connexions amb la baixa atmosfera i la superfície terrestre. La radiació UV crea i manté la capa d'ozó atmosfèrica mentre que les majors variacions de la radiació UV-extrema afecten significativament la termodinàmica de l'alta atmosfera i la ionosfera.

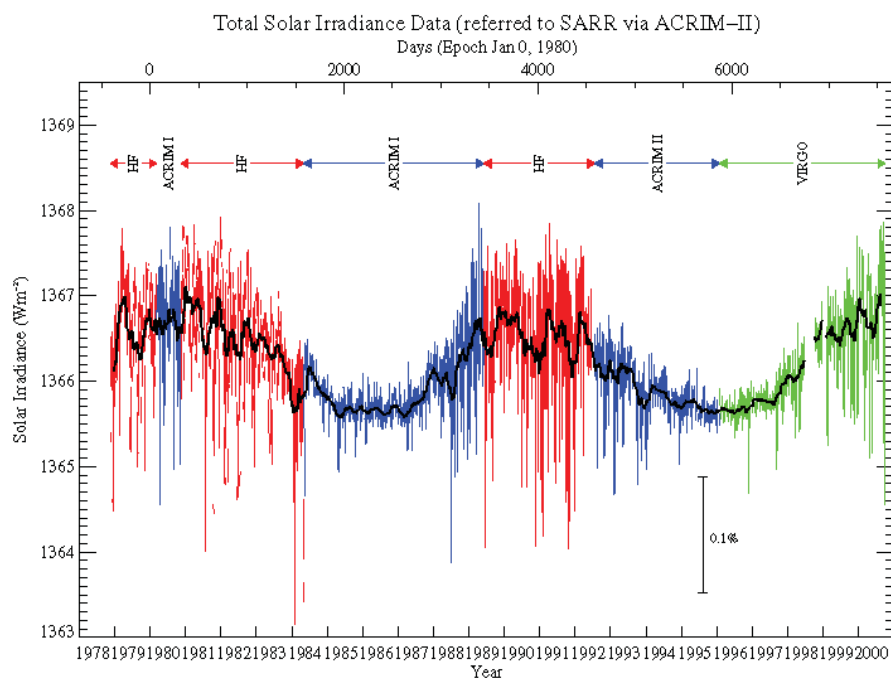


Figura 5.3: Composició de la Irradiància Solar Total abans de travessar l'atmosfera durant més de 20 anys amb indicació de la sèrie emprada a cada període. Les sèries van ser mesurades amb HF/Nimnbus-7, ACRIM I/SMM, ACRIM II/UARS i VIRGO/SOHO respectivament. Figura extreta de *Fröhlich* (2000)

5.4 Comparació entre els períodes de màxim i mínim d'activitat solar

5.4.1 Influència del cicle solar a la irradiància al cim de l'atmosfera

Les llargues sèries de la irradiància solar total mesurada des de satèl·lit permeten estudiar la variabilitat de la radiació solar al llarg del cicle magnètic d'11 anys. Totes les parts de l'espectre solar presenten variabilitat segons el cicle solar però l'amplitud d'aquestes variacions depèn fortament de la longitud d'ona. Per tal de comparar la irradiància solar abans de travessar l'atmosfera en els períodes de màxima i mínima activitat solar, s'han realitzat mitjanes mensuals de la irradiància espectral pels dos

períodes d'interès. La Figura 5.4 mostra que la radiació solar al cim de l'atmosfera per a la radiació UVB i UVA no presenta variacions tan altes com per a la regió UVC.

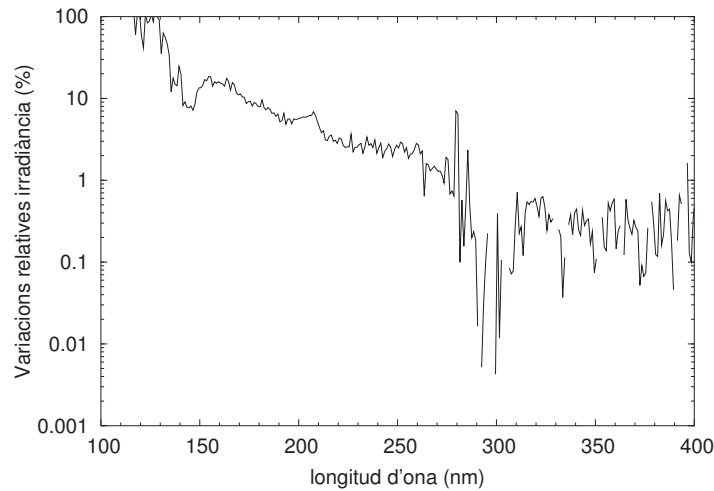


Figura 5.4: Dependència de les variacions de la irradiància relativa amb la longitud d'ona (basat en *Unruh et al.*, 1999)

Irradiàncies integrades a la regió UVB-UVA mostren diferències inferiors al 0,5% entre el màxim i el mínim de taques solars, en canvi, són superiors a un factor dos al voltant de 120 nm. Per a aquestes dues mitjanes mensuals en particular, la irradiància varia al voltant del $6 \pm 1\%$ a 200 nm mentre que a 300 nm cau a valors inferiors al 0,5%. Per longituds d'ona superiors a 300 nm, la variabilitat del cicle d'11 anys es troba dins del límit de precisió de l'instrument, al voltant de l'1%, i llavors aquestes variacions no poden ser mesurades (*Lean*, 1997).

5.4.2 Influència del cicle solar a la irradiància en superfície

Durant el màxim del cicle solar, la irradiància al cim de l'atmosfera amb longitud d'ona inferior a 240 nm és al voltant d'un 30% superior a la mesurada durant el mínim solar. Aquest fet implica una major producció d'ozó a l'estratosfera. *Rozanov et al.* (2004) van trobar una diferència del 2% a l'hemisferi nord fent servir el model de circulació general Urbana-Champaign amb un model fotoquímic interactiu. Per al nostre cas s'han fet servir dades de columna total d'ozó amb el sensor TOMS,

obtenint-se resultats similars. La Figura 5.5 mostra les diferències relatives entre el mínim i el màxim d'activitat solar calculades en una malla de $10^\circ \times 20^\circ$ de resolució en latitud i longitud, respectivament. Les dades es corresponen amb les mitjanes anuals a cada període. En general les diferències són positives quan el número de taques són majors. Els valors negatius trobats per sota els 40° S tenen a veure amb el fet que en les mitjanes no s'ha tingut en compte la circulació de Brewer-Dobson. Aquesta circulació comporta transport d'ozó i altres components atmosfèrics des de les regions tropicals cap als pols sent més feble quan es dona a l'hemisferi sud (més detalls a l'Apartat 7.2.1 del Capítol 7).

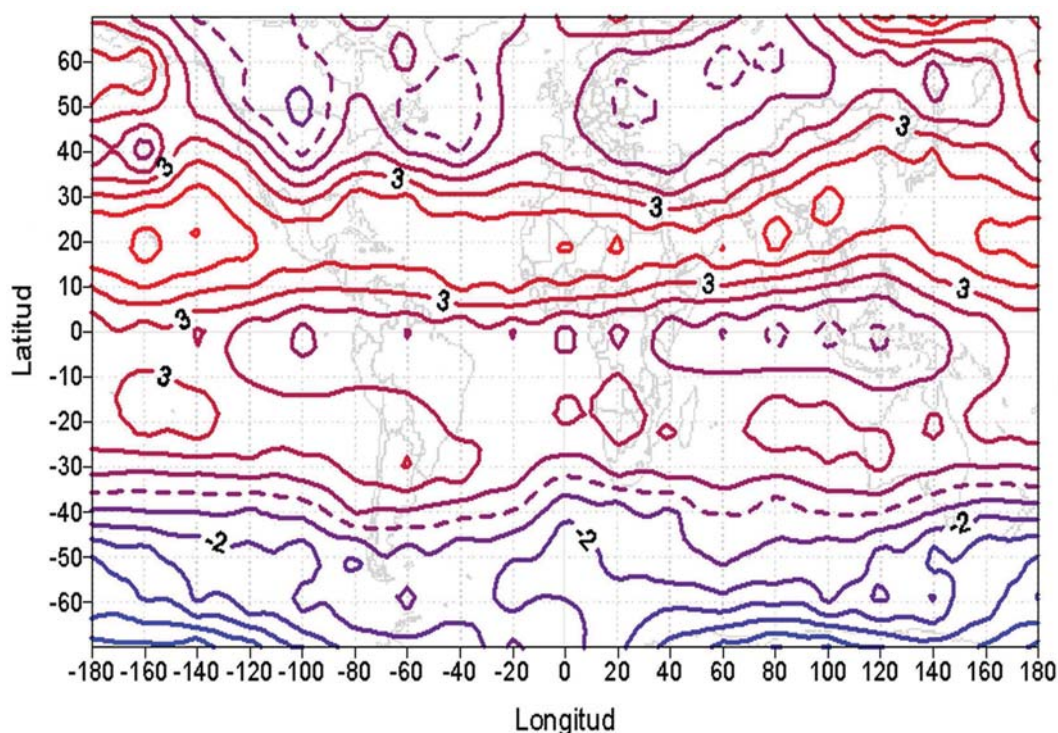


Figura 5.5: Diferències relatives (%) de la columna total d'ozó entre el mínim i el màxim d'activitat solar. Representació realitzada a partir de les mitjanes anuals de la TOC diària mesurada pel sensor TOMS durant períodes de màxim i de mínim d'activitat solar

La Taula 5.1 mostra la irradiància integrada per diferents regions espectrals segons el cicle solar. S'ha inclòs també un hipotètic UVI al cim de l'atmosfera determinat entre 290 i 400 nm per tal de comparar el fort efecte d'absorció de l'ozó estratosfèric a les longituds d'ona de l'UVB.

Les diferències entre les irradiàncies integrades als dos punts de l'atmosfera són

Taula 5.1: Irradiància integrada per diferents regions espectrals i l'UVI, mesurada al cim de l'atmosfera i modelitzada a la superfície terrestre

	UVB (Wm^{-2})	UVA (Wm^{-2})	UV (Wm^{-2})	E_{er} (Wm^{-2})	UVI
Màxim taques	18,11	80,61	98,72	6,94	277,7
Mínim taques	18,08	80,40	98,48	6,94	277,6
Model:màx. taques	3,33	55,07	58,40	0,224	9,0
Model:mín. taques	3,36	54,94	58,30	0,229	9,2

realment altes, la radiació UVB (UVA) al cim de l'atmosfera és 53 (15) vegades el valor a la superfície terrestre. Com a resultat, el poder eritemàtic de la radiació solar (sense tenir en compte l'UVC) és unes 30 vegades superior abans de creuar l'atmosfera.

Tot i els resultats obtinguts, existeixen estudis a la literatura que han trobat elevades correlacions entre la incidència del melanoma cutani maligne (CMM) amb els cicles de taques solars. *Houghton et al.* (1978) van determinar que la incidència del melanoma presentava un patró cíclic amb períodes de 8–11 anys i amb una persistència de la incidència des del màxim del cicle solar fins a 3–5 anys posteriors. Existeixen altres treballs que presenten resultats semblants però també n'hi ha alguns en que no es troben correlacions significatives (*Longstreth*, 1987). *Wigle* (1978) van realitzar estudis similars amb diferents sèries de dades a Estats Units i van trobar una significativa associació entre taques solars i incidència de CMM als 1–2 anys següents al màxim d'activitat. Per altra banda, *Houghton and Viola* (1981) van concloure que l'increment en la incidència de CMM ocorria entre els 0 i 3 anys posteriors al pic de taques, suggerint que exposicions més fortes a la radiació UV provocaven l'aparició clínica del melanoma.

5.5 Influència de l'espectre extraterrestre en els models radiatius

En aquest apartat es mostren els resultats obtinguts sobre la sensibilitat d'un model radiatiu a aquesta variable estudiant per una banda diferències degudes a les mil-

lores en les mesures de satèl·lit. Per tal de poder comparar els resultats obtinguts amb diferents espectres extraterrestres s'han executat simulacions per a una situació atmosfèrica concreta i comuna a totes elles perfectament caracteritzada a partir de mesures, variant únicament l'espectre extraterrestre emprat com a entrada del model SBDART. Per als dies escollits en concret s'han definit els factors astronòmics com el SZA i s'ha caracteritzat l'atmosfera a partir de les propietats òptiques dels aerosols mesurades amb un fotòmetre CIMEL CE318, la columna total d'ozó determinada a partir d'un espectralradiòmetre Brewer MKIII i el perfil vertical d'atmosfera mesurat amb un sondatge atmosfèric. Les irradiàncies modelitzades han estat comparades amb mesures de l'espectralradiòmetre de doble monocromador Bentham DM150.

5.5.1 Els espectres solars extraterrestres

A la literatura hi ha referències a diferents espectres extraterrestres. Com que l'absorció i la dispersió no afecta igual a totes les longituds d'ona, és important conèixer la irradiància espectral que es rep al cim de l'atmosfera. La tecnologia disponible a cada període diferencia dos grans grups d'espectres depenent de l'origen de les dades: els espectres més antics normalment eren mesurats amb telescopis apuntant al Sol des de Terra i els altres, amb espectròmetres situats a satèl·lits. L'avantatge d'aquests últims és que les mesures es realitzen directament apuntant al Sol sense l'efecte de l'atmosfera (absorció a les bandes de l'ozó, el vapor d'aigua i altres gasos) el que permet l'estudi de longituds d'ona per sota els 290 nm. Durant els últims anys també s'han compost espectres sintètics (*Gueymard, 2004*) fent servir diferents sèries d'irradiància solar amb el propòsit de cobrir l'interval espectral més ampli.

Els espectres extraterrestres utilitzats en aquest treball per mostrar la seva influència en les irradiàncies modelitzades han estat:

1. Thekaekara (*Thekaekara, 1974*)
2. De Luisi (*De Luisi, 1975*)
3. Lowtran-7
4. Nicolet-Aversen
5. Atlas 3 (*Van Hoosier, 1996*)

6. Solstice
7. SUSIM
8. Gueymard (*Gueymard, 2004*)

La Figura 5.6 mostra que no hi ha diferències considerables entre els espectres a la regió UVB i UVA, excepte pel cas de l'espectre Thekaekara. Les diferències més importants es troben a la resolució i l'interval de longituds d'ona que cobreix cadascú.

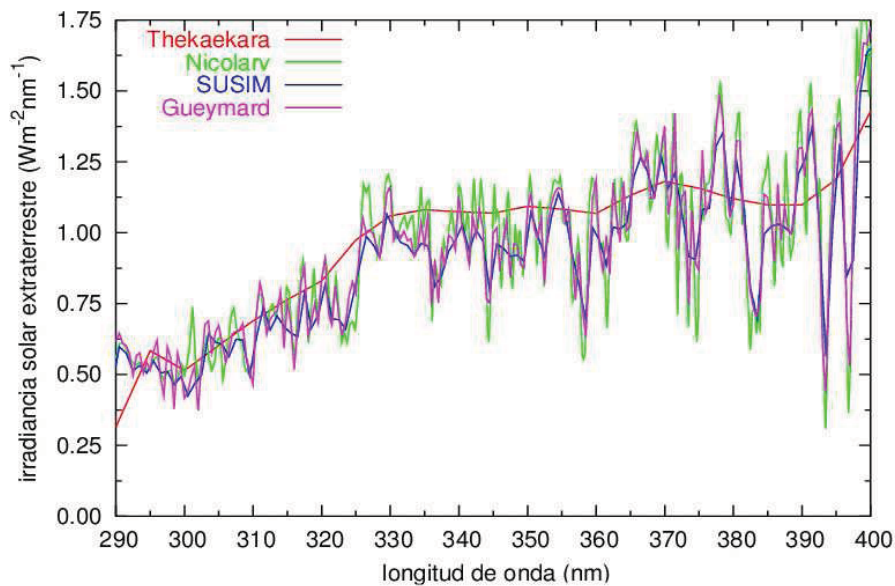


Figura 5.6: Irradiància solar al cim de l'atmosfera a les regions UVB i UVA caracteritzades amb 4 fonts diferents: Thekaekara, Nicolay-Aversen, SUSIM i Gueymard

5.5.2 Resultats obtinguts segons diversos espectres extraterrestres

L'objectiu d'aquesta primera part és mostrar les diferències en irradiància, tant integrada com espectral, com a resultat de les modelitzacions amb els espectres extraterrestres detallats. Els models, en general, sobreestimen les mesures (*Koepke et al., 1998; De Backer et al., 2001*) assumint de partida la gran precisió dels instruments i les mesures utilitzades. Els resultats de les simulacions es presenten a la Figura 5.7.

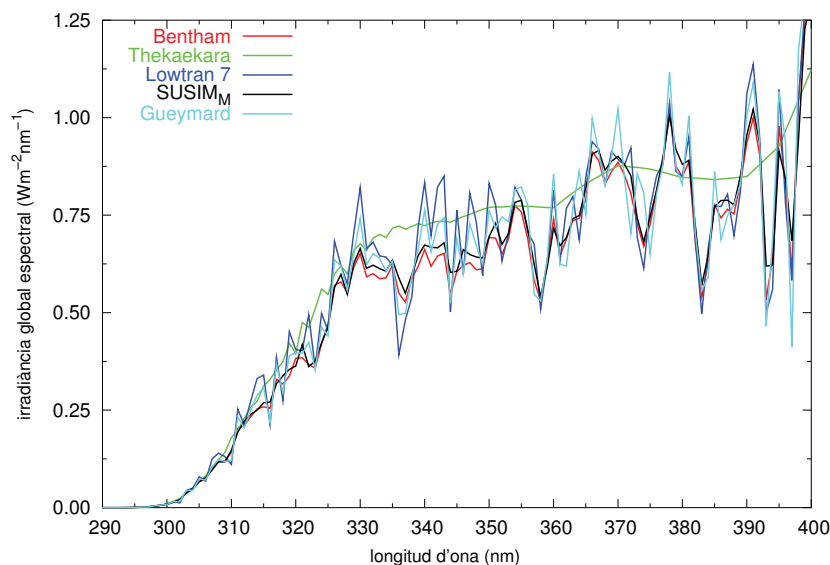


Figura 5.7: Irradiància global espectral modelitzada a la superfície terrestre fent servir 4 espectres extraterrestres diferents (Thekaekara, Lowtran 7, SUSIM i Gueymard). Comparació amb les mesures de l'espectroradiòmetre Bentham.

Les diferències relatives entre irradiància mesurada i modelitzada són rarament superiors al 25%. Per longituds d'ona inferiors a 300 nm el model sobreestima les mesures a la majoria dels casos però això pot ser degut al “soroll de fons” que afecta a l'instrument i que és més rellevant en aquest interval quan les irradiàncies espectrals presenten valors tan baixos (propers a zero). A la regió UVB, les diferències entre l'ús de cada espectre extraterrestre són més grans com mostra la major dispersió per cada longitud d'ona la Figura 5.8 -panell intermedi-. En canvi, a la regió UVA hi ha menys diferències entre resultats segons espectre extraterrestre (Figura 5.8 -panell inferior-).

Degut a que l'espectre d'acció CIE dóna més pes a les longituds d'ona en l'UVB per produir eritema i per determinar l'UVI, les diferències presentades en aquesta banda espectral degut a l'ús de l'espectre extraterrestre en els models radiatius cal tenir-les en compte. Aquestes diferències seran importants quan es treballi amb les irradiàncies eritemàtiques i es vulguin comparar amb precisió. La Taula 5.2 mostra els resultats obtinguts per cada espectre extraterrestre.

La Taula 5.3 mostra la precisió de cada simulació depenent de l'espectre extraterrestre utilitzat. Les diferències són petites però no negligibles, especialment a

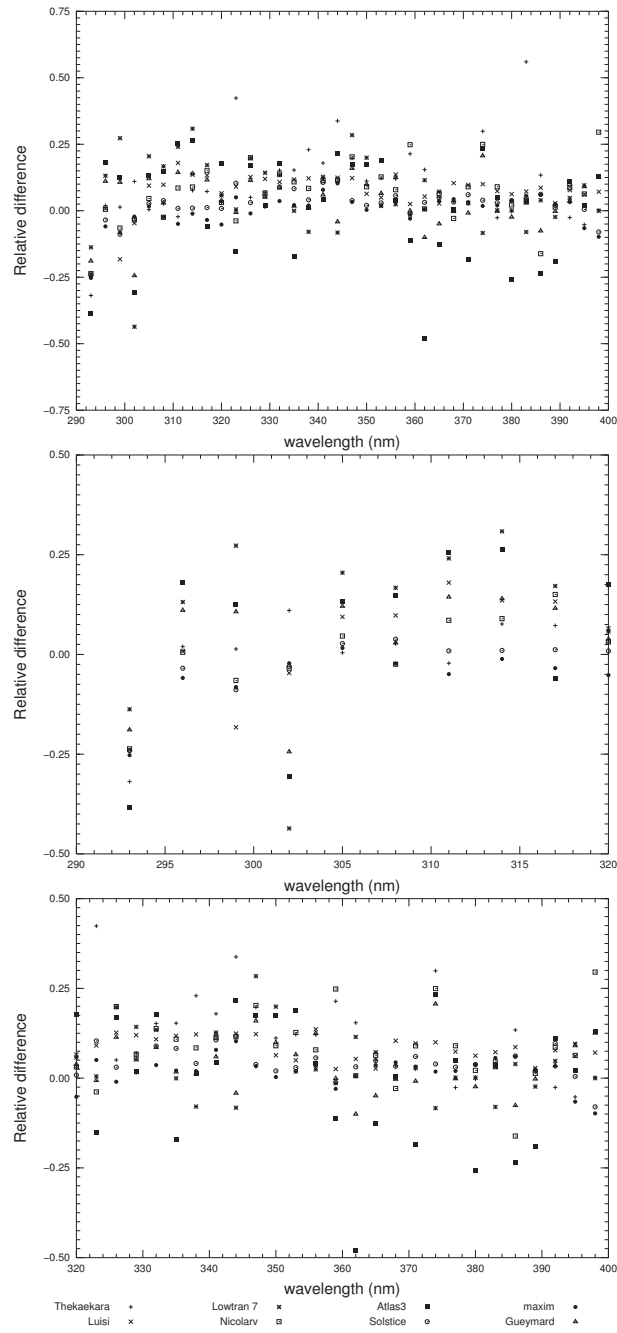


Figura 5.8: Diferències relatives entre model i mesura per cada longitud d'ona: 290–400 nm (panell superior), 290–320 nm (panell mig) i 320–400 nm (panell inferior). Les simulacions han estat realitzades amb diferents espectres extraterrestres.

Taula 5.2: Irradiància integrada ($W m^{-2}$) a diferents rangs espectrals, irradiància eritemàtica E_{er} ($W m^{-2}$) i UVI, modelitzats amb SBDART 2.3 i diferents espectres extraterrestres. La darrera columna són les mesures de l'espectroradiòmetre Bentham

	theka	luisi	lowt7	nicarv	atlas3	solst	SUS_{max}	SUS_{min}	Gueym	Benth
UVB	3,98	4,03	3,93	3,81	3,88	3,72	3,58	3,57	3,71	3,54
UVA	63,1	61,9	59,6	60,5	58,7	59,2	58,0	57,9	59,2	56,7
UV	67,1	66,0	63,5	64,4	62,5	62,9	61,6	61,4	62,9	60,2
E_{er}	0,265	0,263	0,262	0,255	0,256	0,251	0,244	0,242	0,250	0,243
UVI	10,63	10,52	10,49	10,18	10,25	10,02	9,75	9,73	10,0	9,71

la regió UVB.

Taula 5.3: Diferències relatives (%) entre models i mesures en els casos descrits a la Taula 5.2

	theka	luisi	lowt7	nicarv	atlas3	solst	SUS_{max}	SUS_{min}	Gueym
UVB	12,4	13,7	11,0	7,5	9,6	5,0	1,1	0,7	4,6
UVA	11,2	9,2	5,1	6,8	3,5	4,4	2,3	2,1	4,4
UV	11,3	9,5	5,4	6,8	3,8	4,5	2,3	2,0	4,4
E_{er}	9,5	8,4	8,1	4,8	5,6	3,2	0,4	0,2	3,0

Usant les dades de SUSIM s'obtenen els millors resultats (diferències $< 3\%$) tant a l'UVB com a l'UVA. Aquest fet és degut a l'ús de millors instruments i tècniques de processat de dades, en contraposició amb els espectres que no estan mesurats amb sensors a bord de satèl·lits que són més antics i presenten els majors desacords amb les mesures.

5.6 Conclusions del capítol

Les variacions en la irradiància solar al cim de l'atmosfera degudes al cicle solar magnètic d'11 anys són del 6% a la regió UVC decaient fortament a la regió UVB (a la regió UVA les diferències cauen dins del límit de precisió de l'instrument emprat per a la seva determinació). Aquestes variacions tenen poca influència sobre la irradiància que arriba a la superfície terrestre probablement degut al increment en la producció d'ozó. Donat que la radiació UV és la principal responsable de la

formació d'ozó a les capes altes de l'estratosfera, una major emissió de radiació durant el màxim solar produeix un augment en el número de reaccions de producció d'ozó, el que implica un augment de la columna total. A més l'augment de radiació també produeix una intensificació de la circulació de Brewer-Dobson. A l'hora de simular la radiació UV amb fins de predicció de l'UVI, no és necessari introduir aquests canvis generats pel cicle solar.

Per altra banda, l'elecció dels diferents espectres extraterrestres en un model de transferència radiativa implica diferències relatives en les irradiàncies d'un 3–10%, fet que suposa errors en l'UVI de fins a una unitat. Els millors resultats respecte les mesures s'han obtingut fent servir dades d'irradiància solar extraterrestre mesurada pel sensor SUSIM o l'espectre sintètic proposat per *Gueymard* (2004). Les diferències més grans es donen quan es fan servir espectres mesurats amb telescopis terrestres i en canvi, a partir de l'inici en l'ús de radiòmetres a satèl·lits, les mesures contenen menys errors i els resultats de les simulacions presentaven millor acord amb les mesures.

Bibliografia

- De Backer, H., P. Koepke, A. Bais, X. De Cabo, T. Frei, D. Gillotay, C. Haite, A. Heikkilä, A. Kazantzidis, T. Koskela, E. Kyrö, B. Lapeta, J. Lorente, B. Mayer, H. Plets, A. Redondas, A. Renaud, A. Schmalwieser, and K. Vanicek (2001), Comparison of measured and modelled UV Indices for the assessment of health risks, *Meteor. Appl.*, *8*(03), 267–277.
- De Luisi, J. J. (1975), Measurements of the extraterrestrial solar radiation flux from 2981 to 4000 Å and its transmission through the earth's atmosphere as it is affected by dust and ozone, *J. Geophys. Res.*, *80*, 345–354.
- Eddy, J. A. (1976), The Maunder Minimum, *Science*, *192*, 1189–1202.
- Foukal, P., and J. Lean (1988), Magnetic modulation of solar luminosity by photospheric activity, *Astrophys. J.*, *328*(Part 1).
- Fröhlich, C. (2000), Observations of irradiance measurements, *Space Sci. Rev.*, *94*, 15–24.
- Fröhlich, C., and J. Lean (1998), The Sun's total irradiance: Cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976, *Geophys. Res. Lett.*, *25*(23), 4377–4380.
- Gueymard, C. A. (2004), The Sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models, *Solar Energy*, *76*(4), 423–453.
- Houghton, A., and M. V. Viola (1981), Solar radiation and malignant melanoma of the skin, *J. Am. Acad. Dermatol.*, *5*, 477–483.
- Houghton, A., E. W. Munster, and M. V. Viola (1978), Increased incidence of malignant melanoma after peaks of sunspots activity, *Lancet*, *1*, 759–760.

- Kazantzidis, A., A. F. Bais, D. S. Balis, E. Kosmidis, M.-M. Zebila, and C. S. Zerefos (2004), Sensitivity of solar UV radiation calculations to ozone and temperature profiles, in *XX Proc. Quad. Ozone Symp.*, pp. 1101–1102.
- Koepke, P., A. Bais, M. Buchwitz, H. de Backer, X. de Cabo, P. Eckert, P. Eriksen, D. Gillotay, A. Heikkilä, T. Koskela, B. Lapeta, Z. Litynska, J. Lorente, B. Mayer, A. Renaud, A. Ruggaber, G. Schauburger, G. Seckmeyer, P. Seifert, A. Schmalwieser, H. Schwander, K. Vanicek, and M. Weber (1998), Comparison of models used for UV Index calculations, *Photochem. Photobiol.*, *67*(6), 657–662.
- Lean, J. (1997), The Sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models, *Solar Energy*, *76*, 423–453.
- Longstreth, J. D. (1987), *Ultraviolet radiation and melanoma with a special focus on assessing the risks of stratospheric ozone depletion*, vol. 4, p. Appendix A, Washington, D C: US Environmental Protection Agency.
- Ricchiazzi, P., S. Yang, C. Gautier, and D. Sowle (1998), SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *79*(10), 2101–2114.
- Rozanov, E. V., M. E. Schlesinger, T. A. Egorova, and N. Andronova (2004), Atmospheric response to the observed increase of solar UV radiation from solar minimum to solar maximum simulated by the University of Illinois at Urbana-Champaign climate-chemistry model, *J. Geophys. Res.*, *109*, D01110, doi: 10.1029/2003JD003796.
- Schwander, H., P. Koepke, and A. Ruggaber (1997), Uncertainties in modeled UV irradiances due to limited accuracy and availability of input data, *J. Geophys. Res.*, *102*, 9419–9429.
- Sola, Y., A. Ortiz, and J. Lorente (2005), Influencia de la actividad solar en la distribución de ozono y en la irradiancia solar UV, in *Resúmenes de la XXX Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física*, pp. 404–405.
- Sola, Y., J. Lorente, E. Campmany, and X. de Cabo (2006), Influencia de los perfiles de atmósfera en los modelos de transferencia radiativa UV, in *Proc. V Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*.

- Sola, Y., A. Ortiz, and J. Lorente (2007), The influence of extraterrestrial spectrum on the modeled UV irradiances, in *Proc. of the UV Conference "One century of UV radiation research"*, pp. 167–168.
- Thekaekara, M. P. (1974), Extraterrestrial solar spectrum, 3000–6000 Å at 1 Å intervals, *Appl. Opt.*, *13*, 518–522.
- Unruh, Y. C., S. K. Solanki, and M. Fligge (1999), The spectral dependence of facular contrast and solar irradiance variations, *Astron. Astrophys.*, *345*, 635–642.
- Van Hoosier, M. E. (1996), The ATLAS-3 solar spectrum, Naval Research Laboratory, Washington, DC, available via <ftp://susim.nrl.navy.mil/pub/atlas3>.
- Wigle, D. T. (1978), Malignant melanoma of skin and sunspot activity, *Lancet*, *2*, 38.
- Willson, R. C., and H. S. Hudson (1988), Solar luminosity variations in solar cycle 21, *Nature*, *332*(6167), 810–812.

