

# 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](http://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](http://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](http://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

**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*

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

PROGRAMA DE DOCTORAT D'ASTRONOMIA I METEOROLOGIA

BIENNI 2001–2003

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

DIRECTOR DE LA TESI

Dr. Jerónimo Lorente Castelló

*When you make the finding yourself —even if you're the last person on Earth to see the light— you'll never forget it*

**Carl Sagan.**

*Sólo atravesando la noche se llega a la mañana*

**JRR Tolkien**



## Agraïments

Fa temps que desitjava arribar a aquest punt i ara em trobo amb la por a la pàgina en blanc. Durant aquests anys han estat moltes les persones a les que he conegut i que d'una manera o d'altra han ajudat a que aquesta aventura arribés al seu destí. Ara espero no oblidar-me ningú però si llegint aquestes línies no trobes el teu nom, no m'ho tinguis en compte perquè de ben segur formes part d'aquesta història.

Primer de tot vull donar-li les gràcies al Dr. Jeroni Lorente pels anys de dedicació i bons consells dirigint aquesta tesi. També vull agrair-li la confiança que sempre ha depositat en mí.

Si hi ha una persona a qui li dec moltíssim el seu suport aquest és el Dr. Elies Campmany perquè va ser el meu company al principi del llarg viatge i fins i tot quan va marxar sempre ha tingut temps per contestar els meus dubtes de models, d'instruments... i sobretot donar-me el seu suport moral.

Vull agrair al Dr. Xavier de Cabo que, tot i tenir una agenda d'allò més apretada, sempre tingués un moment per passar-se pel departament a donar un cop de mà. Aprofito també per donar-li les gràcies al Dr. Joan Bech pel seu temps i els seus consells en la correcció de l'article.

Unes línies també per la Mercè perquè sempre ha estat disposada a ajudar-me professionalment però sobretot perquè tenir una amiga així a la feina no és fàcil i jo l'he trobada. Gràcies per estar sempre que et necessitava.

Que no se m'oblidin les meves super-nenes: la Digna i la Miriam, les vaig conèixer fa poc i sembla que portem tota la vida juntes. Gràcies per animar-me quan em vèieu trista, per les vostres paraules per tirar endavant però també pels riures i les historietes que ara ja ens perseguiran per sempre (no patiu que aviat podrem tornar a repetir). Recordeu que passi el que passi sempre ens quedarà l'hora del globus.

Al Miquel, per guiar-me en l'apassionant món de l'awk i els scripts perquè va començar sent el meu mestre de linux i s'ha acabat convertint en un molt bon amic. Gràcies per fer més suportables els viatges en tren i no oblidó les coses que tenim pendents.

Vull dedicar-li unes línies també al Josep Manel per passar-me el seu tresor del latex però sobretot per les enyorades converses de divendres, en moltes ocasions un refugi.

No puc oblidar mencionar a totes les persones que van participar directa o indirectament a la campanya VELETA-2002 perquè gràcies al seu esforç he pogut desenvolupar part d'aquesta tesi. D'igual forma, li agraeixo a la Dra. Ada Ortiz, gran coneixedora del entramats del Sol, l'esforç i la dedicació amb la que em va ajudar a tirar endavant l'estudi de l'espectre extraterrestre. Mai van estar científicament tan juntes l'astro i la meteo al departament.

Als llançadors, gràcies als quals he pogut fer part d'aquest estudi. Perquè per pròpia experiència sé que després de la primera setmana és dur fer cada dia el llançament.

Gràcies a tot el “dam-nyam” amb qui any rere any he compartit les millors estones del dia: Elies, Miquel, Xavi, Mercè, Sara, Aitor, Vicent, Llorenç, Santi, Didac, Toni, Sara sim, Josep Manel, Adolfo, Mireia, Jorge, Manu, Miriam, Jordi, Mireia, Albert i segur algú més que m'oblido. Gràcies per les converses, els consells, el suport i per ser el millor record que un dia m'enduré del departament.

Als meus pares, el Felipe i la Claudia perquè sense entendre mai del tot bé a què em dedicava sempre m'han recolzat en totes les meves decisions fent-me la vida una miqueta més fàcil. Sense ells mai hauria arribat a on sóc i a ser qui sóc. Gràcies per tants anys de dedicació. També gràcies, al Robert, el meu germà perquè sempre em fa somriure sent a més el millor suport informàtic. Sense tu la web i moltes altres coses no haurien sortit. No m'oblido tampoc de la Natalia perquè en aquesta tesi he anat seguint els seus passos (ara ja m'he guanyat la recompensa, no?).

I finalment, vull agrair de tot cor al Sergio la paciència que ha tingut amb mí tots aquests anys perquè només ell sap com de difícils se'm feien alguns dies i les llàgrimes vessades. Gràcies per recolzar-me incondicionalment, per animar-me a tirar endavant i per repetir-me fins a la sacietat que jo valc molt.

I amb això tanco un capítol més de la vida i n'obro un altre que espero sigui tan gratificant i enriquidor com aquest...



## Resum de la tesi

La radiació solar UV que incideix sobre la superfície terrestre depèn de diferent factors astronòmics i meteorològics com l'angle solar zenital, la columna total d'ozó, la nuvolositat i la terbolesa atmosfèrica. Tot això es tradueix en un gran nombre de variables a caracteritzar a l'hora de modelitzar la irradiància solar espectral amb models de transferència radiativa.

Un dels objectius generals de la present tesi és la millora de la predicció de l'anomenat índex UV a partir del coneixement de la sensibilitat dels models radiatius a variables poc estudiades des del punt de vista de la modelització com l'espectre solar extraterrestre o el perfil vertical d'atmosfera. Els resultats mostren que l'elecció d'un determinat espectre extraterrestre en la modelització dóna lloc a diferències en la irradiància eritemàtica d'un 3–10% respecte a les mesures.

També s'ha volgut caracteritzar l'efecte d'altitud sobre la radiació solar UV a partir de mesures espectrals i de banda ampla i models de transferència radiativa. Quan l'atmosfera està neta d'aerosols l'efecte d'altitud s'aproxima al límit teòric de l'atmosfera de Rayleigh però aquest valor augmenta quan els punts considerats estan sota condicions de terbolesa elevada. L'efecte d'altitud en la irradiància solar UV també presenta un increment per longituds d'ona curtes.

D'altra banda una altra motivació dels treballs desenvolupats a la tesi ha estat establir una climatologia de la columna total d'ozó sobre l'àrea de Barcelona a partir de mesures de satèl·lit caracteritzant la seva variabilitat a diferents escales temporals i la tendència observada en els seus valors en les últimes dècades. Dins de la variabilitat a curt termini existeixen els episodis extrems d'ozó caracteritzats per una reducció o augment dels valors normals de la columna total d'ozó que ràpidament es recupera uns pocs dies. Els mini-forats d'ozó són més rellevants degut als potencial efectes nocius que poden produir al incrementar-se la irradiància biològicament efectiva. Per aquest motiu s'ha realitzat una climatologia del episodis extrems d'ozó i s'han estudiat en profunditat dos d'aquests casos tant la seva formació com la influència sobre la radiació solar UV.



## Summary of the thesis

Solar UV radiation reaching the Earth's surface depends on various meteorological and astronomical factors such as solar zenith angle, total ozone column, cloud cover and atmospheric turbidity. All this translates into a large number of variables to characterize in the modeling of the solar spectral irradiance with radiative transfer models.

One of the objectives of this thesis was to improve the prediction of the ultraviolet index studying the sensitivity of the radiative models to variables that have been little studied in modeling such as the solar extraterrestrial spectrum or the vertical profile of the atmosphere. The results show that the choice of a particular spectrum in the modeling leads to differences in erythemal irradiance of 3–10% from the measurements.

It also has sought to characterize the altitude effect on solar UV radiation from spectral and broadband band measurements and radiative transfer models. When the air is clean the altitude effect is approaching the theoretical limit of the Rayleigh atmosphere but this value increases when the considered points are under conditions of high turbidity. The altitude effect in solar UV irradiance also shows an increase in short wavelengths.

Furthermore another motivation of the works on the thesis has been to establish a climatology of total ozone column over the area of Barcelona from satellite measurements characterizing variability in different time scales, and the trend in values in the recent decades. Variability within the short term, ozone episodes are characterized by extreme reduction or increase in value of the total ozone column, recovering quickly in a few days. The ozone mini-holes are more relevant because of the potential harmful effects that may occur with the increasing biologically effective irradiance. For this reason a climatology of extreme ozone events have been made and two of these cases from their formation to the influence on solar UV radiation have been studied in depth.



# Índex

<b>1</b>	<b>Introducció</b>	<b>1</b>
1.1	Objectius . . . . .	3
1.2	Desenvolupament del treball . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Radiació UV: conceptes i implicacions biològiques</b>	<b>9</b>
2.1	Radiació UV: conceptes bàsics . . . . .	9
2.2	Atenuació de la radiació solar . . . . .	12
2.3	La química de l'ozó estratosfèric . . . . .	13
2.4	Efectes biològics de la radiació UV . . . . .	16
2.4.1	Éssers vius . . . . .	16
2.4.2	Ecosistemes terrestres i marins . . . . .	18
2.4.3	Radiació solar i ozó troposfèric . . . . .	19
2.5	Els espectres d'acció . . . . .	20
2.6	Irradiància biològicament efectiva . . . . .	22
2.7	L'índex ultraviolat . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Instrumentació</b>	<b>33</b>
3.1	Introducció al capítol . . . . .	33
3.2	Instruments de mesura espectral . . . . .	34
3.2.1	Espectroradiòmetre Brewer . . . . .	34
3.2.2	Espectroradiòmetre Bentham . . . . .	35
3.3	Instruments de mesura de banda ampla . . . . .	36
3.4	Mesura de les propietats dels aerosols i la columna total d'ozó . . . . .	38
3.4.1	Fotòmetre Cimel . . . . .	38
3.4.2	Mesures de la columna d'ozó des de satèl·lit . . . . .	39
3.5	Radiosondatges atmosfèrics . . . . .	42

<b>4</b>	<b>Mesura i modelització de la radiació solar UV</b>	<b>47</b>
4.1	Introducció al capítol . . . . .	47
4.2	Mesures de radiació UV: natural i/o artificial . . . . .	49
4.2.1	Generalitats sobre radiació UV artificial . . . . .	49
4.2.2	Mesures de radiació UV artificial: comparació amb el Sol . . . . .	51
4.3	Mesures de l'UVI a Catalunya . . . . .	53
4.3.1	Resultats i discussió . . . . .	54
4.3.2	Valors simulats de l'UVI . . . . .	57
4.3.3	Conclusions sobre la mesura i predicció de l'UVI . . . . .	59
4.4	Determinació de la columna d'ozó amb mesures espectrals . . . . .	60
4.5	Sensibilitat de l'SBDART als perfils d'atmosfera . . . . .	64
4.5.1	Perfils d'atmosfera estàndard . . . . .	65
4.5.2	Resultat de les simulacions amb diferents perfils . . . . .	67
4.5.3	Conclusions sobre el perfil d'atmosfera als models radiatius . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Sensibilitat a l'espectre extraterrestre en la simulació de la radiació solar UV</b>	<b>79</b>
5.1	Introducció al capítol . . . . .	79
5.2	Generalitats sobre l'activitat solar . . . . .	80
5.3	Sèries temporals de l'emissió solar . . . . .	82
5.4	Comparació entre els períodes de màxim i mínim d'activitat solar . . . . .	84
5.4.1	Influència del cicle solar a la irradiància al cim de l'atmosfera . . . . .	84
5.4.2	Influència del cicle solar a la irradiància en superfície . . . . .	85
5.5	Influència de l'espectre extraterrestre en els models radiatius . . . . .	87
5.5.1	Els espectres solars extraterrestres . . . . .	88
5.5.2	Resultats obtinguts segons diversos espectres extraterrestres . . . . .	89
5.6	Conclusions del capítol . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Efecte d'altitud a la irradiància solar UV</b>	<b>99</b>
6.1	Introducció al capítol . . . . .	99
6.2	Descripció general de la campanya VELETA-2002 . . . . .	102
6.3	Instruments i calibratge a la campanya VELETA-2002 . . . . .	104
6.4	Resultats i discussió de la campanya VELETA-2002 . . . . .	106
6.4.1	Condicions de terbolesa atmosfèrica . . . . .	106
6.4.2	AE a partir de mesures espectrals i simulacions . . . . .	110

6.4.3	AE a partir de mesures de banda ampla . . . . .	115
6.5	Conclusions del capítol . . . . .	118
<b>7</b>	<b>Climatologia de la columna d'ozó a Barcelona. Influència sobre la radiació UV</b>	<b>127</b>
7.1	Introducció al capítol . . . . .	127
7.2	Balanç de l'ozó a l'estratosfera . . . . .	128
7.2.1	Transport d'ozó estratosfèric . . . . .	129
7.3	Ozó i variables meteorològiques . . . . .	132
7.3.1	Ozó i pressió en superfície . . . . .	132
7.3.2	Ozó i altura geopotencial . . . . .	133
7.3.3	Ozó i tropopausa . . . . .	134
7.3.3.1	La tropopausa: definició i característiques . . . . .	134
7.3.3.2	Característiques climàtiques de la tropopausa a Barcelona . . . . .	135
7.3.3.3	Característiques climàtiques de la tropopausa a escala global . . . . .	136
7.3.3.4	Relació entre l'ozó estratosfèric i la tropopausa . . . . .	139
7.4	Variabilitat de la columna total d'ozó . . . . .	140
7.4.1	Variabilitat interdiària . . . . .	141
7.4.2	Variabilitat estacional . . . . .	145
7.4.3	Variabilitat interanual . . . . .	146
7.4.4	Tendències . . . . .	150
7.5	La columna d'ozó de Barcelona al context global . . . . .	153
7.6	Episodis extrems d'ozó: mini-forats i mini-altes . . . . .	156
7.6.1	Introducció . . . . .	156
7.6.2	Elecció del llinar . . . . .	157
7.6.3	Climatologia dels episodis extrems . . . . .	159
7.6.3.1	Mini-forats d'ozó . . . . .	159
7.6.4	Episodis extrems: dos casos d'estudi . . . . .	161
7.6.4.1	Anàlisi de l'episodi extrem de gener del 2004 . . . . .	161
7.6.4.2	Anàlisi de l'episodi extrem d'ozó d'abril de 2004 . . . . .	167
<b>8</b>	<b>Conclusions</b>	<b>177</b>
<b>9</b>	<b>Futures línies de recerca</b>	<b>181</b>

---

10 Apèndix: Acrònims	185
11 Apèndix: Publicacions més destacades	189



# Índex de taules

2.1	Classificació dels fototipus de pell (adaptada de <i>Fitzpatrick</i> (1975)) . . .	16
4.1	Distribució espectral de l'emissió per les diferents fonts de radiació UV . . .	52
4.2	Anàlisi de l'efecte eritemàtic de les diferents font de radiació UV. Es presenten les irradiàncies eritemàtiques per diferents rangs, la contribució de cadascun a l'eritema i l'UVI . . . . .	52
4.3	Anàlisi de diversos efectes biològics per les diferents fonts de radiació UV. Es presenten les irradiàncies biològicament efectives per cadascun . . . . .	53
4.4	Coordenades de les estacions de mesura de l'UVI . . . . .	54
4.5	Mitjana mensual dels valors diaris de $E_{er}$ per cels serens a les 12 UTC. Els valors estan expressats en $W m^{-2}$ . . . . .	56
4.6	Número de dies i percentatge de recurrència (entre parèntesis) en que el valor d'UVI a les 12 UTC indicat es va assolir a cada estació . . . . .	57
4.7	Percentatge de dies en que predicció i observació de l'UVI difereixen en 0, 1 o 2 unitats . . . . .	59
4.8	Irradiància UVB i UVI per als 3 dies estudiats i per a les 3 simulacions proposades . . . . .	71
5.1	Irradiància integrada per diferents regions espectrals i l'UVI, mesurada al cim de l'atmosfera i modelitzada a la superfície terrestre . . . . .	87
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 . . . . .	92
5.3	Diferències relatives (%) entre models i mesures en els casos descrits a la Taula 5.2 . . . . .	92
6.1	Descripció de les estacions i instruments utilitzats en aquest treball . . .	104

---

6.2	Efecte d'altitud (AE) simulat al migdia (SZA igual a $16^\circ$ ) per als dies 16 i 18 de juliol entre les estacions LOW i HIGH mostrant les contribucions de l'absorció d'ozó i els aerosols fent servir el model SBDART 2.4. L'AE està expressat en $\% km^{-1}$ . . . . .	112
6.3	Efecte d'altitud (AE) observat al migdia (SZA igual a $16^\circ$ ) entre les estacions LOW i HIGH determinat amb mesures d'espectroradiòmetre per l'UVB, l'UVA i l'UVI. AE s'expressa en $\% km^{-1}$ . . . .	114
6.4	Efecte d'altitud AE ( $\% km^{-1}$ ) per l'UVI a les 12 UTC determinat a partir de mesures de banda ampla . . . . .	116
7.1	Estacions de radiosondatge seleccionades per a la climatologia . . . .	137
7.2	Tendències estacionals de la columna total d'ozó ( $\%/any$ ) . . . . .	152

# Índex de figures

2.1	Esquema de l'espectre electromagnètic al voltant de la radiació UV . . . . .	9
2.2	Espectre solar extraterrestre al cim de l'atmosfera abans de patir processos d'atenuació comparat amb els valors mesurats al pic Veleta (3398 m s.n.m.) . . . . .	10
2.3	Representació dels espectres d'acció corresponents a alteracions a la pell: dany a l'ADN ( <i>Setlow, 1974</i> ), carcinogènesi ( <i>de Gruijl and Van der Leun, 1994</i> ), elastosi ( <i>Kligman and Sayre, 1991</i> ) i fotoenvelliment ( <i>Bissett et al., 1989</i> ) . . . . .	21
2.4	Representació dels espectres d'acció corresponents a trastorns oculars: cataractes ( <i>Pitts et al., 1977</i> ), fotoqueratitis ( <i>CIE, 1986b</i> ) i fotoconjuntivitis ( <i>CIE, 1986a</i> ) . . . . .	21
2.5	Espectres d'acció corresponents a l'eritema (CIE) i a la síntesi de la vitamina D3 . . . . .	22
2.6	Irradiància espectral biològicament efectiva per carcinogènesi i eritema juntament amb els espectres d'acció corresponents. Les irradiàncies biològicament efectives es presenten multiplicades per 20 per poder-les apreciar més clarament. . . . .	23
2.7	Irradiància espectral biològicament efectiva per l'eritema determinada a partir de espectres modelitzats per 300 i 400 UD. Les irradiàncies biològiques han estat canviades d'escala per a que siguin més visibles les variacions. . . . .	24
2.8	Categories d'exposició a la radiació UV i rang d'UVI (adaptada de <i>WHO (2002)</i> ) . . . . .	26
2.9	Exemples de prediccions de l'UVI ofertes per 4 centres meteorològics: Agència Estatal de Meteorologia (Espanya), Deutscher Wetterdienst (Alemanya), NOAA-EPA Climate Prediction Center (USA) i Bureau of Meteorology (Austràlia) . . . . .	27

2.10	Predicció de l'UVI màxim a Catalunya (Servei Meteorològic de Catalunya, <a href="http://www.meteocat.com">http://www.meteocat.com</a> ) . . . . .	28
3.1	Espectroradiòmetre Brewer MK-III . . . . .	35
3.2	(esquerra) Cimel CE318 i la caixa amb la placa fotovoltaica on es guarda l'electrònica de l'instrument. (dreta) Detall del capçal òptic durant una mesura . . . . .	39
3.3	Organigrama temporal dels diferents satèl·lits que van tenir a bord el sensors TOMS i OMI per a la mesura, entre d'altres, de la columna total d'ozó . . . . .	41
3.4	Detalls del procés de radiosondatge: a) Radiosonda Vaisala RS80; b) Radiosonda Vaisala RS92; c) Estació de preparació i recepció de dades; d) Inflat del globus amb heli . . . . .	43
4.1	Irradiància espectral mesurada de dos equips de bronzejat (alta intensitat i fluorescent), un simulador solar de xènon. Com a comparació s'inclou la distribució amb cel serè al cim del Pic Veleta a 3398 m s.n.m. . . . .	51
4.2	Localització de les estacions de mesures de l'UVI de la xarxa . . . . .	54
4.3	Evolució anual de la irradiància eritemàtica, $E_{er}$ al migdia solar durant l'any 2003 per Molló, Roses, Barcelona i El Perelló . . . . .	55
4.4	Irradiació acumulada al llarg de l'any per les quatre estacions, expressada en SED i en MED pels diferents fototipus de pell . . . . .	58
4.5	LUT per a 200, 300 i 400 UD . . . . .	62
4.6	LUT per a 20°, 30° i 40° . . . . .	62
4.7	Columna total d'ozó (UD) calculada a partir de mesures espectrals i mesurada amb el sensor satel·lital OMI. Les mitjanes s'han realitzat per tot el dia (TOT) i per les hores compreses entre les 10 i les 12 UTC (10–12) . . . . .	63
4.8	Perfil vertical de temperatura i densitat d'ozó per als models d'atmosfera MLS i MLW . . . . .	66
4.9	Perfil vertical d'humitat absoluta per als models d'atmosfera MLS i MLW . . . . .	67
4.10	Evolució anual (2003) de la massa d'aigua precipitable (w) del radiosondatge i la columna total d'ozó del TOMS. Comparació amb els valors estàndard dels models MLS i MLW per cada període temporal corresponent . . . . .	68

4.11	Diferència en l'UVI tenint en compte la massa d'aigua precipitable dels radiosondatges respecte a deixar el valor del model per defecte (w-13% i w, depenent de si es fa servir la correcció o no d'aquesta variable . . . . .	69
4.12	Perfil vertical de temperatura i densitat d'ozó per als models d'atmosfera MLS i per a tres mesures d'ozonosonda de tres dies diferents	70
4.13	Perfil vertical d'humitat absoluta per als models d'atmosfera MLS i per a tres mesures de radiosonda atmosfèrica de tres dies diferents . .	70
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	81
5.2	Evolució del número de taques solars anual des de 1600. Les dades entre 1600 i 1715 procedeixen de l'article <i>Eddy</i> (1976) i la resta de la sèrie està publicada pel Solar Influences Data Analysis Center a Bèlgica. . . . .	82
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/Nimbus-7, ACRIM I/SMM, ACRIM II/UARS i VIRGO/SOHO respectivament. Figura extreta de <i>Fröhlich</i> (2000) . . . . .	84
5.4	Dependència de les variacions de la irradiància relativa amb la longitud d'ona (basat en <i>Unruh et al.</i> , 1999) . . . . .	85
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 . . . . .	86
5.6	Irradiància solar al cim de l'atmosfera a les regions UVB i UVA caracteritzades amb 4 fonts diferents: Thekaekara, Nicolav-Aversen, SUSIM i Gueymard . . . . .	89
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. . . . .	90

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. . . . .	91
6.1	Localització de les tres estacions a la cara nord del massís de Sierra Nevada considerades en aquest estudi . . . . .	103
6.2	Retrotrajectòries per dos dies característics de la campanya. a) 16 de juliol (massa d'aire marítima); b) 18 de juliol (massa d'aire continental associada a un episodi de pols sahariana) . . . . .	108
6.3	Evolució de l'espessor òptic d'aerosols (AOD) a les tres estacions considerades a l'estudi a 380, 440 i 500 nm. Es pot notar el contrast entre el dia 14 de juliol, corresponent a una massa d'aire marítima polar i el 17 de juliol quan es va iniciar una intrusió de pols sahariana . . . .	109
6.4	Exemple de les mesures simultànies d'irradiància espectral a les estacions LOW i HIGH corresponents al 18 de juliol a les 12 UTC quan es van observar valors elevats de terbolesa atmosfèrica associada amb la intrusió de pols sahariana . . . . .	110
6.5	Perfils verticals de temperatura i densitat d'ozó mesurats els dies 14, 15 i 18 de juliol i el perfil de referència Mid Latitude Summer (MLS) usat al model de transferència radiativa SBDART 2.4 . . . . .	111
6.6	Efecte d'altitud (AE) simulat entre les estacions LOW i HIGH produït per l'ozó troposfèric pel dia 16 de juliol considerant quatre possibles perfils verticals: MLS i mesures d'ozonosonda amb decaïments d'ozó troposfèric de 3, 4 i 5 UD $km^{-1}$ . El model de transferència usat és l'SBDART 2.4. . . . .	112
6.7	Variacions espectrals en l'AE observat (LOW-HIGH) a les 12 UTC durant l'episodi de pols sahariana (18 de juliol) i durant un dia clar (16 de juliol). S'observa una forta dependència amb la longitud d'ona a la regió UVB, més intensa pel dia amb elevada terbolesa atmosfèrica (18 de juliol) . . . . .	113
6.8	Evolució de l'UVI a LOW, MED i HIGH determinat amb mesures de banda ampla durant el dia 16/07. Cal notar el valor màxim d'11 observat a HIGH (pic Veleta, 3398 m s.n.m.) corresponent a la categoria <i>Extrem</i> d'acord amb la classificació COST-713 ( <i>Vanicek et al.</i> , 2000). . . . .	115

6.9	Evolució diurna de l'AE determinat a partir de mesures de banda ampla durant els dies centrals de la campanya . . . . .	117
6.10	Dependència de l'AE amb el SZA per les tres estacions. L'AE per irradiància eritemàtica es determina amb mesures de banda ampla (YES) i amb irradiàncies espectrals ponderades amb la corba CIE (UVI) i integrat sobre la regió UVB (UVB) pel cas LOW-HIGH. . . .	118
7.1	Esquema dels processos de producció/destrucció i transport d'ozó a l'atmosfera (basat en l'esquema de <i>García</i> , 1994) . . . . .	129
7.2	Densitat vertical d'ozó en valor mig a escala planetària (UD/km). Superposat hi ha un esquema de la circulació Brewer-Dobson (fletxes negres). Imatge de <i>Cordero et al.</i> (2000) . . . . .	130
7.3	Sèrie temporal de la columna total d'ozó i de l'altura geopotencial del nivell de 500 hPa a la primera meitat de l'any 2006 . . . . .	133
7.4	Freqüència d'ocurrència de les diferents categories d'altitud de la primera tropopausa als períodes MJJ i NDG . . . . .	136
7.5	Freqüència d'ocurrència de les diferents categories d'altitud de la primera tropopausa als 4 períodes estacionals: MJJ, NDG, FMA i ASO . . . . .	136
7.6	Freqüència d'ocurrència per diferents categories a diverses estacions de radiosondatge arreu del món . . . . .	138
7.7	Relació entre la columna total d'ozó i l'altura de la tropopausa pels valors mitjans d'ozó de cada categoria d'altura . . . . .	140
7.8	Variabilitat de la columna total d'ozó a Barcelona a diferents escales temporals . . . . .	142
7.9	Rang de valors de la columna total d'ozó a Barcelona entre 1979 i 2006 segons el dia julià . . . . .	143
7.10	Variació interdiària de la columna total d'ozó a Barcelona al període 1998–2006 . . . . .	144
7.11	Distribució de la variació interdiària (%) de la sèrie al període 1978–2006	144
7.12	Variació interdiària de tota la sèrie de mesures a l'àrea d'estudi per cada mes de l'any . . . . .	145
7.13	Mitjana mensual, desviació estàndard (SD) i coeficient de variació relativa (CRV) de la columna total d'ozó a Barcelona de tota la sèrie (1979–2006) . . . . .	146
7.14	Mitjana mensual, desviació estàndard i coeficient de variació relativa .	147

7.15	Mitjanes mensuals de la columna total d'ozó sobre Barcelona per als períodes 1978–1994 i 1997–2007 . . . . .	148
7.16	Tendència del valor mig mensual màxim, mínim i de l'amplitud del cicle estacional de la columna total d'ozó a Barcelona per cada any de la sèrie (1978–2006) . . . . .	150
7.17	Variabilitat intermensual de la columna d'ozó per a la sèrie 1978–2006	150
7.18	Tendència de la mitjana anual de la columna total d'ozó . . . . .	151
7.19	Desviacions de la columna total d'ozó respecte el valor mig 1978–2006 per cada estació. La representació es fa en % . . . . .	152
7.20	Columna total d'ozó diària i promitjada mensualment a 3 punts representatius de la regió equatorial (EQ) i de latituds a l'hemisferi nord (HN) i a l'hemisferi sud (HS) . . . . .	154
7.21	Mitjanes mensuals de la columna total d'ozó de la sèrie 1978–2006 a 3 punts representatius de l'hemisferi nord (41° N, panell superior), l'equador (12° N, panell intermig) i l'hemisferi sud (41° S, panell inferior)	156
7.22	Número de dies de mini-forat d'ozó per any des de 1979 a 2007 (eix esquerre) sobre l'àrea de Barcelona. Valor mig dels llindars pels períodes hivern/primavera i estiu/tardor (eix dret) a cada any corresponent . . . . .	160
7.23	Número de dies de mini-forats per mes entre 1979 i 2007 (eix esquerre) i anomalies (mínim, mitja i màxim) de tots els mini-forats en cada mes per l'àrea de Barcelona (eix dret) . . . . .	161
7.24	Columna total d'ozó (UD) mesurada amb el sensor TOMS (Earth Probe) entre el 8 i el 19 de gener de 2004. S'ha escollit per a la representació l'àrea centrada a la regió d'estudi. El panell superior dret correspon a l'episodi de mini-forat d'ozó i el panell inferior intermig, al de mini-alta d'ozó . . . . .	163
7.25	Reanàlisis meteorològiques a partir de dades de l'NCEP d'alguns dies escollits entre el 8 i el 19 de gener del 2004 on s'inclou la situació sinòptica del mini-forat (10 gener, figura superior dreta) i la mini-alta (18 gener, figura inferior esquerra). Font: Wetterzentrale . . . . .	165
7.26	Retrotrajectòries isentròpiques HYSPLIT a 96-h per als nivells de 18, 20 i 22 km d'altitud amb origen a Barcelona (41.35° N i 2.16° E) per als dies de mini-forat d'ozó, 10 de gener de 2004 (esquerra) i de mini-alta d'ozó, 18 de gener de 2004 (dreta) . . . . .	166



7.27 Anàlisi del mini-forat d'ozó (6–21 gener): TOC diària (TOMS) i mitjanes climàtica i mensual per gener (panell superior); temperatura a 18 km i altura de la superfície isentròpica de 450 K (panell intermedi); temperatura i altura geopotencial de la tropopausa i nivells mitjans per gener (panell inferior). Les mitjanes han estat calculades amb dades de radiosondes (1998–2007) . . . . .	167
7.28 Irradiància eritemàtica i UVI mesurats el 10 de gener de 2004 en comparació amb altres dies. Totes les mesures han estat realitzades amb un radiòmetre de banda ampla YES UVB1 instal·lat a Barcelona	168
7.29 Irradiància eritemàtica i UVI mesurats el 20 d'abril de 2004 en comparació amb altres dies. Totes les mesures han estat realitzades amb un radiòmetre de banda ampla YES UVB1 instal·lat a Barcelona . . .	169
7.30 Dependència espectral de la ràtio entre irradiàncies a les 12 UTC per dos casos: 20 d'abril i el dia anterior (línia discontinua) i 20 d'abril i el 17 d'abril de l'any següent, 2005 . . . . .	169
7.31 Anàlisi del LOE (15–25 d'abril): TOC diària (TOMS) i mitjanes climàtica i mensual per abril (panell superior); temperatura i altura geopotencial de la tropopausa i nivells mitjos per gener (panell inferior). Les mitjanes han estat calculades amb dades de radiosondes (1998–2007) . . . . .	170



# 1 Introducció

Des de que l'any 1974, Mario Molina i el seu col·lega Sherwood Rowland (*Molina and Rowland, 1974*) van formular la hipòtesi que l'emissió de gasos industrials, com ara els CFC (clorofluorocarbonis), transferien clor a l'estratosfera danyant la capa d'ozó, s'han invertit molts esforços en estudiar els motius i les implicacions d'aquest fet. *Farman et al. (1985)* van descobrir que la columna total d'ozó durant la primavera antàrtica havia disminuït respecte els valors dels anys 70. La popularitat i l'elevada divulgació d'aquest fet per part dels mitjans de comunicació ha suscitat que fins i tot, la població en general estigui interessada en aquest fenomen batejat com a “*forat de la capa d'ozó*”. Tot i que aquesta terminologia de vegades porta a conclusions errònies sobre el que succeeix realment amb l'ozó a l'estratosfera. Durant la primavera austral (entre setembre i principis de novembre) s'observa sobre l'Antàrtida una marcada reducció de la columna total d'ozó respecte als valors registrats els mesos anteriors.

Treballs recents han mostrat evidències de que la disminució de la columna d'ozó durant els últims anys no afecta només a l'Antàrtida sinó que és un problema més global, tot i que d'intensitat més moderada (*Atkinson et al., 1989*). El fet que la reducció s'hagi estès a àrees molt més poblades i de latituds més baixes ha fet créixer la preocupació a escala mundial sobre el tema. Alguns estudis mostren que la disminució dels nivells d'ozó a l'estratosfera ha comportat un augment en la radiació ultraviolada (UV) (*Kerr and McElroy, 1993; McKenzie et al., 2007*), potencialment molt perillosa pels éssers vius en general.

A més de la destrucció d'ozó per part dels CFC, en els últims anys s'han observat fenòmens en els quals la química estratosfèrica no juga un paper rellevant sinó que es produeixen degut al transport i a la redistribució de la columna d'ozó, són els anomenats mini-forats d'ozó (*Newman et al., 1988*). Aquests episodis estan

caracteritzats per valors anormalment baixos de la columna total d'ozó respecte els valors climàtics i impliquen un potencial augment de la radiació UV incident a la superfície terrestre.

Les tendències estètiques dels últims anys han marcat entre la població el desig per una pell bronzejada, fet que ha estès l'hàbit de prendre el sol o de fer sessions de radiació UV artificial. En molts d'aquests casos no es tenen en compte els efectes nocius que pot tenir la sobreexposició a la radiació UV sense protecció. Entre els efectes més fàcilment recognoscibles es troba l'eritema o envermelliment de la pell que es produeix passades unes hores de l'exposició però n'hi ha d'altres que poden donar-se a més llarg termini fruit de l'acumulació d'hores de sol com són el melanoma cutani, el dany a l'ADN o el fotoenvelliment prematur de la pell. Tot i l'elevat número d'efectes nocius, el cos humà necessita rebre una petita dosi de radiació UV per tal de sintetitzar la vitamina D, beneficiosa per a la salut dels ossos.

El fet que la radiació solar jugui un paper molt important als processos biològics que afecten els éssers vius i el possible efecte que podrien tenir la reducció de la capa d'ozó i el canvi climàtic en la distribució d'irradiància solar en el futur ha comportat un augment dels esforços per millorar les xarxes instrumentals i els models de transferència radiativa emprats en la predicció de la radiació UV (*Bais et al.*, 2007) o per comparar observacions des de terra i des de satèl·lit (entre d'altres *Krotkov et al.*, 1998, 2005; *Wetzel and Slusser*, 2005).

En aquest sentit el Servei Meteorològic de Catalunya en col·laboració amb el Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona van instal·lar l'any 1999 la xarxa de piranòmetres de banda ampla a diversos punts de la geografia catalana, a la vegada que van iniciar la predicció de l'índex ultraviolat (UVI) a partir de models de transferència radiativa. Això ha comportat des de llavors millores en el calibratge i el manteniment dels instruments així com en l'anàlisi de les variables d'entrada dels models per tal d'aconseguir el major acord entre predicció i observació (*De Backer et al.*, 2001).

La radiació solar UV depèn d'un gran número de factors astronòmics i atmosfèrics, sent el més important l'angle zenital solar (SZA) que dona lloc als cicles diari i anual característics de la irradiància solar. Les altres variables que poden condicionar fortament la irradiància UV incident sobre la superfície terrestre són la presència de nuvolositat, la columna total d'ozó, les propietats i distribució d'aerosols

atmosfèrics i l'albedo. La influència de cadascuna d'elles sobre la irradiància solar incident ha donat lloc a treballs disponibles a la literatura, tot i que alguns d'ells en menor nombre degut a la dificultat per a caracteritzar, per exemple, les propietats dels aerosols.

Les variables d'entrada dels models de transferència radiativa són múltiples i no sempre senzilles de determinar. La quantitat i la qualitat de les dades disponibles condicionarà la precisió dels resultats (*Schwander et al.*, 1997) juntament amb les característiques inherents del propi model (*Koepke et al.*, 1998). Dintre dels models radiatius es poden distingir tres grans grups: els empírics, els de dispersió simple i els de dispersió múltiple. La diferència entre aquests dos últims està en el tractament de l'atmosfera que fan: en el primer la consideren una única capa i en el segon, una sèrie de capes de propietats pròpies i diferenciades. Aquests últims són els que han mostrat millor acord amb les mesures (*Koepke et al.*, 1998; *De Backer et al.*, 2001), entre ells el model SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) (*Ricchiazzi et al.*, 1998).

## 1.1 Objectius

L'objectiu general d'aquesta tesi és estudiar diferents factors que influeixen la irradiància solar UV incident en la superfície terrestre fent servir tant observacions com models de transferència radiativa. A mesura que s'anava avançant en els temes de la tesi creixien nous interessos degut a la interconnexió existent entre molts dels factors relacionats amb la radiació UV. Per aquest motiu, aquesta tesi la formen una sèrie de treballs que tracten diferents temes lligats pel nexxe de la radiació UV i per l'aplicació de les millores aconseguides en uns aspectes per portar a bon terme els següents estudis.

Aprofundint ja en els aspectes més concrets desenvolupats en el transcurs de la tesi es podrien desglossar els següents objectius:

- Determinar la sensibilitat dels models espectrals de transferència radiativa a l'espectre solar extraterrestre. A l'hora de simular la irradiància espectral UV en superfície i conseqüentment la predicció de l'índex UV, els models de transferència radiativa permeten introduir una gran varietat de variables d'entrada,

fonamentalment les coordenades geogràfiques, el perfil d'atmosfera, la columna total d'ozó i la terbolesa atmosfèrica. I sobre aquests és possible trobar a la literatura treballs on relacionen els resultats amb la disponibilitat i qualitat d'aquests factors. En canvi, l'espectre extraterrestre és una variable que no sempre es valora i modifica. Per aquest motiu es va plantejar analitzar els resultats obtinguts de les simulacions amb diferents espectres extraterrestres trobats als mateixos models radiatius o publicats en articles.

- Investigar la influència dels factors locals en la irradiància solar UV. Aquest objectiu fou possible gràcies a la disponibilitat d'un gran banc de dades procedents de campanyes experimentals com VELETA-2002 i que va propiciar el desenvolupament de l'extens treball d'anàlisi de la influència de l'efecte d'altitud en la irradiància solar UV. Aquest factor presenta gran complexitat i es va voler tractar des de diferents punts de vista, tant dels models com de les observacions i fent servir més d'un tipus de mesura.
- Analitzar la influència dels episodis extrems d'ozó en la irradiància solar UV a Barcelona, lloc escollit per la disponibilitat d'instruments de mesures de diferents variables. Per tal de poder desenvolupar aquesta tasca era necessària una climatologia prèvia de la columna total d'ozó a l'àrea d'estudi per conèixer les característiques i el comportament de l'ozó. Quan es planteja estudiar l'ozó estratosfèric és necessari també relacionar-ho amb les propietats verticals de l'atmosfera com ara la temperatura i l'altura de la tropopausa i de certes superfícies isentròpiques. En aquest punt s'obre la possibilitat a estudiar la possible evolució de la capa d'ozó i de la formació d'aquest tipus d'episodis extrems amb la irradiància solar UV a llarg termini.
- Millorar la predicció diària de l'UVI a Catalunya. La consecució dels objectius abans descrits permetran millorar el coneixement de la influència de certes variables sobre les mesures de la irradiància solar UV però també la sensibilitat dels models de transferència radiativa a aquestes i d'altres variables. A més s'estudiarà la sensibilitat del model al perfil vertical d'atmosfera procedent de sondatges atmosfèrics en comparació amb els models atmosfèrics estàndard propis del model radiatiu.
- Comparar les mesures de radiació solar eritemàtica amb les sortides dels models de transferència radiativa.

## 1.2 Desenvolupament del treball

L'estructura de la memòria de la tesi consta de les següents parts:

En el *Capítol 2* es mostren conceptes bàsics sobre la radiació UV i alguns dels seus efectes biològics a través dels espectres d'acció. Enllaçant amb l'efecte eritemàtic de la radiació solar UV es presenta l'índex ultraviolat i el seu interès educatiu

En el *Capítol 3* es descriuen breument els principals instruments utilitzats en el decurs d'aquesta tesi. Amb més deteniment es mostren les característiques dels calibratges dels piranòmetres de banda ampla.

El *Capítol 4* presenta primerament un estudi comparatiu dels potencials efectes biològics de la radiació UV natural i artificial per posar de relleu les diferències segons els espectres d'acció. Seguidament es mostren les característiques de l'UVI a Catalunya a partir de mesures d'irradiància eritemàtica. Aquestes mesures es comparen amb els resultats d'un model de transferència radiativa del qual també s'ha estudiat la seva sensibilitat al perfil vertical d'atmosfera. Finalment s'ha estudiat com determinar la columna total d'ozó a partir de mesures espectrals realitzades des de superfície.

En el *Capítol 5* es presenta un estudi sobre la influència de l'espectre extraterrestre en la modelització de la irradiància solar UV. Es fa també un incís per analitzar la relació entre el cicle solar i la irradiància solar UV a la superfície terrestre.

En el *Capítol 6* es realitza un exhaustiu anàlisi de l'efecte d'altitud en la radiació solar UV durant la campanya observacional VELETA-2002. Els resultats són analitzats a partir de mesures, tant de radiació com de propietats d'aerosols, i de simulacions obtingudes amb l'ús de models radiatius.

El *Capítol 7* es pot dividir en dos grans blocs. El primer presenta una climatologia de la columna total d'ozó a Barcelona i la relació existent amb variables atmosfèriques com l'altura de la tropopausa i el segon caracteritza els episodis extrems d'ozó analitzant alguns dels mini-forats d'ozó més rellevants detectats al nord-est de la costa mediterrània.

El *Capítol 8* recull les principals conclusions extretes dels diferents treballs que formen aquesta tesi.

En el *Capítol 9* es repassen les futures línies d'investigació, algunes d'elles ja iniciades, que es deriven del treballs presentats a la tesi i que esperen arribar a termini en els propers anys.

Finalment, el *Capítol 10* representa un recull de les publicacions més destacades sobre els resultats obtinguts en el decurs de la tesi.



# Bibliografia

- Atkinson, R. J., W. A. Matthew, P. A. Newman, and R. A. Plumb (1989), Evidence of the midlatitude impact of Antarctic ozone depletion, *Nature*, *340*, 290–294.
- Bais, A. F., D. Lubin, A. Arola, G. Bernhard, M. Blumthaler, N. Chubarova, C. Erlick, H. P. Gies, N. Krotkov, K. Lantz, B. Mayer, R. L. McKenzie, R. D. Piacentini, G. Seckmeyer, J. R. Slusser, C. S. Zerefos, U. Feister, V. Fioletov, J. Gröbner, E. Kyrö, and H. Slaper (2007), *Surface Ultraviolet Radiation: Past, Present and Future*, chap. 7, pp. 7.1–7.54, World Meteorological Organization.
- 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.
- Farman, J. C., B. G. Gardiner, and J. D. Shanklin (1985), Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal  $ClO_x/NO_x$  interaction, *Nature*, *315*, 207–210.
- Kerr, B., and C. T. McElroy (1993), Evidence for large upward trends of UVB radiation linked to ozone depletion, *Science*, *262*, 1032–1034.
- 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.
- Krotkov, N. A., P. K. Bhartia, J. R. Herman, V. Fioletov, and J. Kerr (1998), Satellite estimation of spectral surface UV irradiance in the presence of tropospheric aerosols 1. Cloud-free case, *J. Geophys. Res.*, *103*(D8), 8779–8793, doi: 10.1029/98JD00233.

- Krotkov, N. A., P. K. Bhartia, J. Herman, J. Slusser, G. Scott, G. Labow, A. P. Vasilkov, T. F. Eck, O. Dubovik, and B. N. Holben (2005), Aerosol ultraviolet absorption experiment (2002 to 2004), part 2: absorption optical thickness, refractive index, and single scattering albedo, *Opt. Eng.*, *44*, 041005, doi:10.1117/1.1886819.
- McKenzie, R. L., P. Aucamp, A. Bais, L. Björn, and M. Ilyas (2007), Changes in biologically-active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface, *Photochem. Photobiol. Sci.*, *6*(3), 218–231, doi:10.1039/b211155c.
- Molina, M. J., and F. S. Rowland (1974), Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone, *Nature*, *249*, 810–812.
- Newman, P. A., L. R. Lait, and M. R. Schoeberl (1988), The morphology and meteorology of southern hemisphere Spring total ozone mini-holes, *Geophys. Res. Lett.*, *15*, 923–926.
- 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.
- 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.
- Wetzel, M. A., and J. R. Slusser (2005), Mesoscale distributions of ultraviolet spectral irradiance, actinic flux, and photolysis rates derived from multispectral satellite data and radiative transfer models, *Opt. Eng.*, *44*, 1–12.