

# 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



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

# 8 Conclusions

Els diferents estudis portats a terme al llarg d'aquesta tesi han donat lloc a una sèrie de conclusions.

## *Mesures d'irradiància espectral UV*

### *Mesura i modelització de la irradiància solar UV*

A partir de les dades d'irradiància eritemàtica mesurada amb la xarxa de piranòmetres instal·lada a Catalunya s'ha determinat que l'UVI diari a les 12 UTC mostra valors màxims anuals de 9 per totes les estacions, tret de les considerades d'altitud on pot arribar a 10 degut al menor recorregut de la radiació solar. D'igual forma s'ha trobat una variació latitudinal del 3–4% per grau.

Les mesures de la xarxa resulten de gran utilitat per validar la predicció de l'UVI diària realitzada amb el model SBDART. En el 94% dels casos les diferències entre mesures i prediccions, en condicions de cel serè, van ser inferiors o iguals a una unitat.

La regió UVB de l'espectre és molt més sensible a canvis en la distribució vertical de variables com la temperatura i la humitat, mentre que la regió UVA resta gairebé invariant.

La introducció de la massa d'aire precipitable determinada amb dades de radiosondatge a les simulacions de l'UVI introdueix diferències de 0,1–0,6 respecte a no introduir-la. Les diferències més importants es donen durant els mesos d'estiu.

### *Mesures d'irradiància UV de fonts artificials*

A partir d'un estudi realitzat sobre diversos tipus de làmpades de bronzejat homologades de les comunament emprades en el mercat es va determinar que la seva emissió en la regió UVB era semblant o inferior a l'emissió del Sol a l'estiu en latituds mitges. En canvi, a la regió UVA les làmpades artificials estudiades presentaven emissions que superaven al Sol en 4–6 vegades (espectralment s'observaven emissions entre 12–14 vegades superiors a les del Sol per a longituds d'ona concretes, especialment a partir dels 360 nm).

La irradiància eritemàtica de les cabines de bronzejat depenia fortament de la proporció UVB/UVA de la seva emissió ja que en alguns casos l'efecte eritemàtic estava repartit equitativament entre els dos rangs de l'UV. Els models de làmpades estudiats mostraven UVIs que variaven entre 6 i 11 (valors alts i extrems segons la classificació de l'Acció COST-713), el que implica arribar a MED II en uns 15–30 minuts.

A més de l'efecte eritemàtic es van estudiar altres espectres d'acció. Les irradiàncies per a aquells que estaven centrats a l'UVB, com ara el dany a l'ADN o la síntesi de la vitamina D, mostraven valors inferiors a les rebudes del Sol durant el solstici d'estiu. En canvi, efectes com ara el fotoenvelliment prematur de la pell, als quals contribueix principalment l'UVA, presentaven irradiàncies biològicament efectives un 7% superiors a les del Sol.

### *Sensibilitat dels models radiatius a l'espectre solar extraterrestre*

Els models de transferència radiativa disposen d'un gran número de variables a definir per a realitzar les simulacions. A la literatura existeixen diversos espectres solars extraterrestres que poden ser adaptats per als models. L'elecció d'un determinat espectre implica diferències relatives en la irradiància eritemàtica d'un 3–10% respecte a les observacions, segons les característiques de l'espectre emprat. Els millors resultats s'obtenen amb espectres mesurats des de satèl·lit, com l'obtingut pel sensor SUSIM, o amb espectres sintètics resultants de la composició de diferents espectres per a cada regió espectral.

Les variacions en la irradiància solar al cim de l'atmosfera degudes al cicle solar magnètic d'11 anys depenen fortament de la longitud d'ona. La variabilitat més important es dona a la regió de l'UVC amb un 6% en valor mig de diferència entre el màxim i el mínim d'activitat solar. A la regió UVB les variacions decauen fortament.

Donat que la radiació solar UV amb longitud d'ona inferior a 240 nm és responsable de la fotodissociació de les molècules d'oxigen a l'alta estratosfera, l'augment de radiació solar UV en el període de màxim afavorirà un increment en el número d'aquestes reaccions. La presència d'un major nombre d'oxigens monoatòmics altament reactius possibilitarà la formació d'ozó estratosfèric. Segons l'anàlisi realitzat de les diferències relatives en la columna total d'ozó (mesurada amb el sensor TOMS) entre el mínim i el màxim del cicle solar es produeix un augment d'al voltant del 2% en latituds mitges.

A més l'augment de radiació produeix també una intensificació de la circulació Brewer-Dobson. Les irradiàncies solars modelitzades en un període de màxim i un de mínim d'activitat solar, tenint en compte únicament el diferent espectre extraterrestre i la diferència en la columna total d'ozó calculada, no presenten diferències considerables. El motiu es troba en que l'augment d'irradiància solar total durant el màxim solar es compensa amb un increment de la producció d'ozó.

### *Efecte d'altitud en la irradiància solar*

L'efecte d'altitud en la irradiància solar presenta com a principals característiques: un increment per longituds d'ona curtes i un increment amb l'augment de terbolesa atmosfèrica.

El perfil vertical d'ozó a les capes baixes de la troposfera també influeix en l'AE segons els resultats de les modelitzacions. L'ús del perfil d'atmosfera de latituds mitges del model SBDART causa una subestimació de l'AE d'un 1%  $km^{-1}$  respecte al resultat que s'obtingria de fer servir la distribució vertical d'ozó mesurada.

Durant la campanya VELETA-2002, l'AE per l'UVA al migdia solar era del 6–8%  $km^{-1}$  incrementant al 7–11%  $km^{-1}$  per l'UVB i al 11–14%  $km^{-1}$  per l'UVI. D'aquests, els valors més elevats es van donar durant un episodi de pols sahariana en que es va produir un increment de la concentració d'aerosols minerals a diferents nivells.

Quan l'atmosfera dels dos punts és prístina, l'AE mesurat està proper al límit teòric de l'atmosfera de Rayleigh ( 5%  $km^{-1}$  a 330 nm) però és molt superior quan els llocs estan fortament influenciats per aerosols. Segons els resultats obtinguts és recomanable aplicar un factor d'altitud superior al 8%  $km^{-1}$ , usat com a valor mig per l'acció COST-713.

L'AE que es va determinar amb piranòmetres de banda ampla durant la campanya va resultar inferior al determinat amb mesures espectrals en un 2–3%  $km^{-1}$ . El motiu es troba en les diferents respostes espectrals i angulars de cada piranòmetre individual i que no es va tenir en compte als calibratges, tal i com es fan actualment.

### *Climatologia de la columna total d'ozó a Barcelona*

La climatologia de la columna total d'ozó sobre Barcelona mostra un patró estacional amb una amplitud mitja del cicle de 80 UD. A partir de l'anàlisi de la sèrie de dades s'observa una disminució de l'amplitud del cicle des de finals dels anys 70 en que van començar les mesures de satèl·lit.

La TOC mostra una tendència negativa d'unes 10 UD per dècada amb una major contribució durant la primavera i l'hivern. Aquest resultat està en acord amb els valors trobats a altres estudis per latituds mitges. Durant el període 1979–1994 la disminució va ser més considerable i en canvi, a partir de llavors es produeix un manteniment dels valors tot i que la sèrie no és prou llarga com per poder establir tendències.

### *Influència dels mini-forats d'ozó sobre la irradiància solar UV*

Els mini-forats d'ozó són deguts principalment a la contribució del desplaçament vertical de superfícies isentròpiques i al transport horitzontal d'una massa d'aire pobre en ozó. A finals de primavera, la reducció dinàmica de l'ozó a la regió de la UTLS pot ser la principal responsable dels mini-forats.

Durant els mini-forats d'ozó observats als mesos d'hivern, la irradiància eritemàtica pot augmentar fins a un 50% respecte els valors mitjans, tal i com va passar durant l'episodi de gener del 2004 (el valor més baix d'ozó enregistrat sobre l'àrea d'estudi des de que es van iniciar les mesures de satèl·lit a finals dels anys setanta). Tot i que l'increment relatiu és elevat, la baixa irradiància UV característica dels mesos d'hivern a latituds mitges fa que aquests episodis representin un risc baix en els potencials efectes eritemàtics.

En canvi, fora del període hivernal els mínims d'ozó assolits poden no ser tan baixos però les implicacions biològiques són superiors ja que la irradiància solar UV és elevada, fins i tot propera al màxim anual en el cas dels LOE de primavera.

## 9 Futures línies de recerca

Les futures línies de recerca que es plantegen un cop finalitzada aquesta tesi són la progressió en la millora de la predicció de l'UVI a partir de models radiatius i l'anàlisi de la influència del canvi climàtic en la irradiància solar espectral UV.

La complexitat de la caracterització de l'aerosol atmosfèric i l'ús de les variables relacionades amb ells als models de transferència radiativa porta a voler realitzar un anàlisi en profunditat de la seva sensibilitat a aquestes variables.

- Caracterització de les propietats òptiques dels aerosols a partir de les mesures del fotòmetre CIMEL. Obtenció de climatologies de l'àrea d'estudi i d'episodis concrets que poden ser de gran rellevància.
- Simulació de la irradiància solar UV a partir de models de transferència radiativa segons les diferents variables d'entrada referents a aerosols.
- Anàlisi de la sensibilitat dels models radiatius a les distribucions verticals d'aerosols disponibles a la bibliografia segons les característiques i el tipus d'aquests aerosols. Possibilitat d'ampliació de l'estudi a dades de lidar.
- El gran repte en la modelització de la radiació solar és la caracterització de la nuvolositat per tal de poder incloure-la a les simulacions. A partir de dades del satèl·lit Meteosat s'intentaran caracteritzar algunes de les propietats òptiques dels núvols per tal de que siguin útils a la modelització de la radiació solar a la superfície terrestre.

D'altra banda, els resultats obtinguts sobre la distribució d'ozó estratosfèric i la seva influència en la radiació UV marquen les bases per ampliar i aprofundir l'estudi de la columna d'ozó a curt i llarg termini i els efectes sobre la radiació UVB. Una

de les majors incerteses que sorgeixen en les prediccions del clima futur es refereix a la radiació UV incident sobre la superfície terrestre. Qualsevol variació en la distribució i la concentració total d'ozó a l'atmosfera es tradueix en canvis en la radiació solar UVB incident en superfície. Així doncs la relació entre canvi climàtic i ozó i les conseqüents variacions en la irradiància UV presenten incerteses que cal aclarir degut a les implicacions tant atmosfèriques com de salut que comporten.

- Avaluar l'impacte del canvi climàtic en la distribució de la concentració d'ozó estratosfèric i, a la vegada, en la irradiància solar UVB incident a la superfície terrestre. Degut a l'acoblament del sistema troposfera-estratosfera, els canvis en l'estructura tèrmica de les capes més baixes de l'atmosfera causats per l'efecte dels gasos d'efecte hivernacle poden afectar a la circulació atmosfèrica.
- Influència dels patrons atmosfèrics com El Niño o l'Oscil·lació Quasi-Biennal (QBO) sobre la distribució d'ozó passada i actual a partir de dades de satèl·lit i de mesures in-situ, així com reanàlisi meteorològiques.
- A la Península Ibèrica la influència del patró de la NAO sobre la distribució de precipitacions i temperatura està ben establert. En el futur es pretén ampliar el coneixement dels possibles efectes de les diferents fases sobre l'ozó estratosfèric.
- Determinació de les característiques de la tropopausa sobre la Península Ibèrica i el Mediterrani mostrant diferències latitudinals i longitudinals.
- Ampliació de l'estudi de la relació entre tropopausa i columna total d'ozó a la Península Ibèrica i a l'àrea del Mediterrani a partir de les definicions tèrmiques i dinàmiques. Per al primer cas es faran servir dades de totes les sèries de radiosondatges, moltes d'elles superiors als 30 anys de longitud, disponibles a la zona d'estudi. Per al segon cas s'aplicarà la vorticitat potencial per a caracteritzar-la a les reanàlisis meteorològiques.
- Climatologia dels episodis extrems d'ozó detectats sobre la Península Ibèrica i l'àrea del Mediterrani a partir de dades de satèl·lit, tant de columna com de distribució vertical. Caracterització dels episodis detectats a partir de les reanàlisis meteorològiques i dels radiosondatges.
- Influència del canvi climàtic en la formació d'episodis extrems. Anàlisi de la relació entre la NAO i la formació d'episodis extrems d'ozó sobre la Península Ibèrica a partir de les sèries de l'índex de la NAO amb els episodis caracteritzats prèviament.



- Influència dels episodis extrems d'ozó en la irradiància solar UV incident sobre la superfície terrestre a partir de mesures i de models de transferència radiativa.



# 10 Apèndix: Acrònims

AE Efecte d'altitud (Altitude Effect)

AOD Espesor Òptic d'aerosols (Aerosol Optical Depth)

CFC CloroFluoroCarboni

CIE Commission Internationale de l'Eclairage

COST COoperation europeene dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique

DISORT Discrete Ordinate Radiative Transfer

ECMWF European Centre for Medium-range Weather Forecast

FOV Field of Vision

FWMH Full Width at Half Maximum

GOME Global Ozone Monitoring Experiment

HYSPLIT Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

ICNIRP Comissió Internacional sobre la Protecció contra la Radiació no-ionitzant

INTA Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

LOE Low Ozone Event

LUT Look-up table

MASS Mesoscale Atmospheric Simulation System

MED Minimum Erythema Dose

MLS/MLW Mid-Latitude Summer/Winter

MODIS Moderate resolution Imaging Spectroradiometer

NASA National Aeronautics and Space Administration

NCEP National Center for Environmental Prediction

OMI Ozone Monitoring Instrument

OMM Organización Meteorológica Mundial

OMS Organització Mundial de la Salut

PBL Planetary Boundary Layer

PNUMA Programa de les Nacions Unides pel Medi Ambient

PSC Polar Stratospheric Cloud

RAF Radiation Amplification Factor

SBDART Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer

SBUV Solar Backscatter Ultraviolet

SED Standard Erythema Dose

SMARTS Simple Model for the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine

SRF Funció resposta espectral (Spectral Response Function)

STAR System for a Transfer Atmospheric Radiation

SUSIM Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor

SZA Angle Zenital Solar (Solar Zenith Angle)

TH Tropopause Height

TOC Total Ozone Column

TOMS Total Ozone Mapping Spectrometer

TUV Tropospheric Ultraviolet and Visible radiative transfer code

UARS Upper Atmosphere Research Satellite

UD Unitats Dobson

UV Ultraviolet/da

UVI Ultraviolet Index

YES Yankee Environmental Systems



# 11 Apèndix: Publicacions més destacades

- Marín MJ, Sola Y, Tena F, Utrillas MP, Campmany E, de Cabo X, Lorente J, Martínez-Lozano JA. The UV Index on the Spanish Mediterranean Coast. *Photochemistry and Photobiology*, 2005, 81:659-665
- Sola Y, Lorente J, Campmany E, de Cabo X, Bech J, Redaño A, Martínez-Lozano JA, Utrillas MP, Alados-Arboledas L, Olmo FJ, Díaz JP, Expósito FJ, Cachorro V, Sorribas M, Labajo A, Vilaplana JM, Silva AM, Badosa J. Altitude effect in UV radiation during the Evaluation of the Effects of Elevation and Aerosols on the Ultraviolet Radiation (VELETA-2002). *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113, D23202, DOI:10.1029/2008JD009742
- Sola Y, Lorente J. Impact of two low ozone events on surface solar UV radiation over the northeast of Spain. *International Journal of Climatology*, 2010, DOI:10.1002/joc.2194