

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

4 Mesura i modelització de la radiació solar UV

La motivació del present capítol és mostrar la mesura i modelització de l'UVI a Catalunya a partir de la xarxa de piranòmetres i d'un model de transferència radiativa. A més s'estudiarà la sensibilitat d'aquest model al perfil vertical d'atmosfera i es farà servir per a poder determinar la columna total d'ozó a partir de mesures espectrals. Enllaçant amb el capítol anterior es mostrarà un estudi sobre els diferents espectres d'acció, analitzant mesures d'irradiància solar i artificial.

Els treballs presentats en aquest Capítol 4 de la memòria de la tesi són consultables a les publicacions Sola et al. (2005), Marín et al. (2005), Sola et al. (2006) i Lorente et al. (2007).

4.1 Introducció al capítol

La disponibilitat d'una xarxa de mesures d'irradiància eritemàtica a Catalunya ha permès realitzar estudis sobre la climatologia de l'UVI a l'àrea d'estudi i una posterior comparació amb la predicció de l'UVI diària. A més, s'ha realitzat un anàlisi comparatiu de les irradiàncies biològicament efectives respecte a diferents espectres d'acció relacionats amb efectes sobre els humans. Donat que durant els últims anys ha crescut l'interés per una pell bronzejada i per l'ús de bronzejat artificial, s'ha inclòs una comparació per observar les principals diferències en les dosis depenent de si la radiació és solar o artificial.

El cost dels instruments de mesura de radiació i el seu manteniment, juntament

amb la impossibilitat d'instal·lar sensors a llocs remots o cobrint tota l'extensió espacial desitjada obliga a fer servir models radiatius per tal de simular la irradiància solar en diferents indrets i sota diferents condicions atmosfèriques.

No obstant, la simulació de la irradiància solar no resulta senzilla donat l'elevat nombre de factors que modifiquen la radiació solar que arriba a la superfície terrestre i que condicionen un elevat número de variables d'entrada en els models. *Schwander et al.* (1997) van establir que la precisió de les irradiàncies simulades depenia en gran mesura de la quantitat i la qualitat d'aquestes variables d'entrada que inclouen des de la columna total d'ozó i les propietats òptiques dels aerosols fins al perfil vertical d'atmosfera i l'espectre solar extraterrestre.

A l'hora de simular la irradiància solar existeixen tres tipus de models: els empírics, els de dispersió simple i els de dispersió múltiple. Els models empírics es basen en parametritzacions de mesures empíriques d'irradiància eritemàtica (*Antón, 2007*); els models de dispersió simple consideren l'atmosfera com una única capa per tal de resoldre les equacions de transferència radiativa i alguns dels exemples més coneguts són l'SMARTS2 —Simple Model for Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine— (*Gueymard, 1995*) i el TUV —Tropospheric Ultraviolet and Visible radiative transfer code— (*Madronich et al., 2002*). Els models de dispersió múltiple són els més complets ja que tenen en compte la dispersió múltiple i consideren l'atmosfera com una sèrie de capes de propietats diferenciades. Alguns dels models més representatius d'aquesta categoria són l'STAR —System for a Transfer of Atmospheric Radiation— (*Nakajima and Tanaka, 1986*) i l'SBDART —Santa Barbara DISORT¹ Atmospheric Radiative Transfer— (*Ricchiazzi et al., 1998*).

Un estudi comparatiu entre models portat a terme per *Koepke et al.* (1998) va mostrar els bons resultats proporcionats pels models de dispersió múltiple que estaven en acord en $\pm 0,5$ unitats d'UVI. Anant un pas més enllà *De Backer et al.* (2001) van comparar la sortida de diferents models amb mesures espectrals posant de manifest les diferències dels resultats depenent de canvis en la parametrització de les propietats òptiques dels aerosols. *De Cabo et al.* (2004) van mostrar el bon acord dels models de dispersió múltiple amb diferències relatives del 2–3% en l'UVI per SZA menors de 60°.

¹DISORT, Discrete Ordinate Radiative Transfer, algoritme desenvolupat per *Stammes et al.* (1988) i que considera l'atmosfera com una successió de capes horitzontals de propietats definides per tal de poder aplicar la hipòtesi d'atmosfera plano-paralela

Degut als estudis detallats que verifiquen els bons resultats dels models de dispersió múltiple es va decidir fer servir el model SBDART per a la predicció diària de l'UVI. El fet de fer servir aquest model de transferència radiativa operativament ha portat a realitzar la majoria dels estudis sobre aquest model per tal de millorar les prediccions amb els resultats obtinguts. Els treballs desenvolupats a la present memòria han fet servir les versions 2.3 i 2.4 del model.

El model SBDART necessita com a variable d'entrada la columna total d'ozó per a determinar la irradiància solar UV. Aquesta variable pot ser obtinguda de mesures de satèl·lit, no obstant, no sempre estan disponibles. Per aquest motiu es va decidir fer servir les mesures d'irradiància solar mesurades per l'espectroradiòmetre Bentham per tal de determinar la columna total d'ozó.

4.2 Mesures de radiació UV: natural i/o artificial

4.2.1 Generalitats sobre radiació UV artificial

L'exposició a la radiació UV es pot produir de forma natural a través dels raigs solars o de forma artificial amb fonts emissores de radiació com ara els equips de bronzejat. Les fonts artificials de radiació UV es poden dividir en dos grans grups: les industrials i les cosmètiques i/o mèdiques. Les primeres, en principi estarien protegides per algun tipus de mecanisme de tancament que les aïllaria del personal que les manipula. Al contrari del que succeeix amb les làmpades UV utilitzades per diagnòstic i teràpia mèdica o per bronzejat, on l'usuari està en contacte directe amb l'emissió de la làmpada i les dosis poden diferir considerablement de les usuals pel Sol.

El culte al cos i l'estesa convenció que una pell bronzejada és més atractiva ha fet que el número de centres on és possible bronzejar-se hagi augmentat considerablement en els últims anys. Segons un informe de l'Asociación Española del Bronceado (AEB), al 2004 hi havia al voltant de 25000 centres de bronzejat a Espanya distribuïts a diferents establiments com ara perruqueries, gimnasos o centres específics per a aquesta activitat. Aquest creixement juntament amb l'ampli coneixement dels efectes nocius de la radiació UV va portar a una regularització del sector a través del Real Decreto 1002/2002 (Venta y utilización de aparatos de bronceado median-

te radiaciones ultravioletas) (BOE, 2002). Els punts més importants en quant a l'emissió d'aquest tipus d'equips es detallen a l'Article 3 (Limitacions):

Els usuaris d'aparells de bronzejat domèstics o a centres de bronzejat no podran rebre radiacions ultraviolades amb:

- 1. Una irradiància efectiva, mesurada segons Norma UNE EN 60 335-2-27, superior als $0,30 \text{ Wm}^{-2}$*
- 2. Una longitud d'ona inferior a 295 nm*

Quan al decret es parla d'irradiància efectiva s'està considerant la irradiància eritemàtica. El valor legislat de $0,3 \text{ Wm}^{-2}$ es correspondria amb un UVI de 12, valor considerat extrem segons la normativa europea adoptada a l'acció COST-713 (Vanicek et al., 2000).

Les làmpades més usades per al bronzejat es basen en l'excitació elèctrica d'un gas ionitzat per tal d'obtenir radiació. L'emissió és el resultat de la transició de nivell energètic dels àtoms del material. Els equips de bronzejat més estesos són els tubs fluorescents de baixa pressió i les làmpades de descàrrega d'alta intensitat filtrada. Els fluorescents es basen en descàrregues de baixa pressió entre dos elèctrodes situats als extrems d'un tub ple de mercuri en estat gasós.

Els simuladors solars es fan servir en dermatologia per al diagnosi i avaluació de malalties ocasionades per la radiació UV, en alguns casos en combinació amb fotoal·lèrgens (fototest i fotopegat, respectivament). Els simuladors solars emprats a dermatologia requereixen irradiàncies molt elevades i una mida reduïda, per aquest motiu es fan servir làmpades de xènon i/o mercuri. L'emissió d'aquests equips en molts casos és semblant a l'emissió d'un cos negre a 6000 K, o sigui que simularien amb força precisió la irradiància solar al cim de l'atmosfera.

La fototeràpia és l'ús de radiació electromagnètica no ionitzant amb finalitat terapèutica fent servir les seves propietats immunomoduladores, antiinflamatòries i antiproliferaries de forma directa o en acció combinada amb medicaments (psoralens). Es fan servir cabines que irradien UVA o UVB de banda ampla o de banda estreta (311–313 nm). Aquesta teràpia es fa servir pel tractament de psoriasis, urticàries solars i dermatitis atòpica, entre d'altres.

4.2.2 Mesures de radiació UV artificial: comparació amb el Sol

L'any 2004 el nostre grup va portar a terme un estudi sobre l'emissió d'equips de bronzejat homologats i d'ús habitual a centres d'estètica i gimnasos. Es van realitzar mesures espectrals d'equips de característiques diverses que es podrien englobar en els dos grans grups: equips d'emissió d'alta intensitat i equips amb tubs fluorescents. Paral·lelament s'han realitzat mesures d'un làmpada de xènon Solar Light utilitzada com a simulador solar a l'àrea de dermatologia de l'Hospital de Sant Pau (Barcelona) per fer diagnosi de malalties cutànies relacionades amb la radiació UV.

A la Figura 4.1 es mostren les irradiàncies espectrals solar i artificials mesurades amb l'espectroradiòmetre Bentham de gran precisió. La mesura solar presentada a la figura correspon a dates properes al solstici d'estiu a latituds mitges i a 3398 m s.n.m.. L'anàlisi qualitatiu de la Figura 4.1 ja mostra les importants diferències en l'emissió de fonts artificials respecte a la distribució espectral de la radiació solar UV. Tot i que no sigui molt intuïtiu a partir de la figura, el simulador solar presenta un espectre similar al del Sol a la regió UVB i UVA curt tot i que multiplicat per un factor 16 aproximadament. Els equips de bronzejat emeten semblant o inferior al Sol a la regió UVB, en canvi, a la regió UVA les emissions poden arribar a ser 12-14 vegades superiors a les del Sol a certes longituds d'ona a partir dels 360 nm.

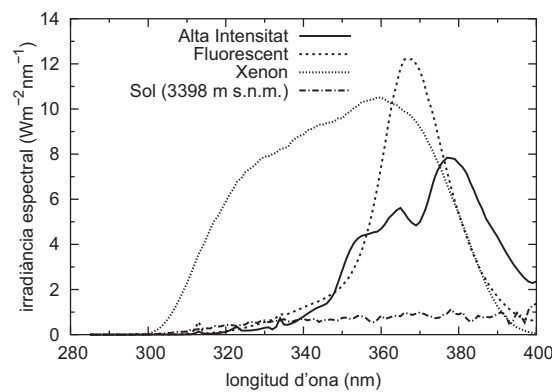


Figura 4.1: Irradiància espectral mesurada de dos equips de bronzejat (alta intensitat i fluorescent), un simulador solar de xènon. Com a comparació s'inclou la distribució amb cel serè al cim del Pic Veleta a 3398 m s.n.m.

L'estudi en detall de les emissions en els rangs de l'UV mostra la diferent dis-

tribució segons la font (Taula 4.1). La fracció d'UVB dels equips de bronzejat és molt baixa, inferior a l'1% respecte al rang UVA, a més de força més baixa que la irradiància solar. En el cas de les longituds d'ona UVA, les làmpades artificials estudiades superen el Sol 4–6 vegades.

Taula 4.1: Distribució espectral de l'emissió per les diferents fonts de radiació UV

$E_{be}(Wm^{-2})$	Alta Intensitat	Fluorescent	Xènon	Sol (3398 m)	Sol (98 m)
UVB	0,76	1,82	53,67	3,88	2,52
UVA	275,7	306,6	555,7	59,3	45,1
UV	276,5	308,4	609,4	63,2	47,6
UVB/UVA	0,29%	0,56%	9,66%	6,54%	5,59%

La irradiància eritemàtica de les cabines de bronzejat dependrà fortament de la proporció d'UVB que continguin i de l'emissió màxima en l'UVA. Existeixen alguns models on l'efecte eritemàtic es reparteix equitativament entre el rang UVB i UVA com mostra la Taula 4.2. També serà rellevant la posició espectral del màxim ja que si està situat a longituds d'ona més curtes en l'UVA pot elevar el seu poder eritemàtic. En qualsevol cas, l'UVI varia entre 6 i 11 (valors alts i extrems segons el criteri establert per l'Acció COST-713). Aquesta irradiància implica arribar a MED II en uns 15–30 minuts.

Taula 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

$E_{be}(Wm^{-2})$	Alta Intensitat	Fluorescent	Xènon	Sol (3398 m)	Sol (98 m)
UV	0,143	0,268	2,98	0,267	0,165
UVB	0,037	0,135	2,46	0,226	0,135
UVA	0,106	0,132	0,51	0,041	0,030
UVB/UV	25,9%	50,6%	82,6%	84,6%	81,8%
UVA/UV	74,1%	49,4%	17,1%	15,4%	18,2%
UVI	6	11	119	11	7

L'alta irradiància UVB que pot arribar a proporcionar el simulador solar porta a que gairebé tot l'efecte eritemàtic vingui donat per aquest interval (83%). La dosi

eritemàtica correspondria a 43 MED/h per a fototipus II. Aquest tipus d'instruments disposa de reguladors que poden filtrar l'UVB allargant els temps d'exposició. Com s'ha comentat al Capítol 2, a més de l'eritema hi ha altres efectes biològics que la radiació UV produeix sobre la pell i els ulls. La major part dels espectres d'acció estan centrats a la regió UVB, el que implica que els equips de bronzejat tenen una efectivitat semblant o inferior a la del Sol per produir-los. La distribució espectral de les làmpades marcarà el grau de diferència respecte el Sol. Els efectes sobre els ulls són baixos i a més, en principi, a les sessions es fan servir ulleres protectores. Les majors diferències es donen per aquells efectes relatius a l'UVA com es mostra a la Taula 4.3. La irradiància biològica pel fotoenvelliment per un dels equips de bronzejat és de 137 Wm^{-2} i per la irradiància solar a 3398 m s.n.m. és de 27 Wm^{-2} .

Taula 4.3: Anàlisi de diversos efectes biològics per les diferents fonts de radiació UV. Es presenten les irradiàncies biològicament efectives per cadascun

$E_{be}(\text{Wm}^{-2})$	Alta Intensitat	Fluorescent	Xènon	Sol (3398 m)	Sol (98 m)
Eritema	0,14	0,27	2,98	0,27	0,17
Síntesi vit. D	0,08	0,25	5,79	0,52	0,31
Dany ADN	0,04	0,22	1,43	0,17	0,09
Carcinogènesi	0,22	0,40	6,82	0,59	0,37
Elastosi	33,09	38,79	110,27	9,93	7,25
Fotoenvelliment	98,47	137,11	347,15	26,83	19,95
Cataractes	0,11	0,24	3,65	0,32	0,20
Fotoqueratitis	0,03	0,10	2,06	0,17	0,11
Fotoconjuntivitis	0,00	0,002	0,01	0,001	0,001

4.3 Mesures de l'UVI a Catalunya

La xarxa de mesures de l'UVI a Catalunya es va establir a mitjans de l'any 2000 i va ser dissenyada pel Dpt. d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona. La xarxa consistia inicialment en 4 estacions, tres situades a la costa i una a l'interior a una altitud de 1400 m sobre el nivell del mar tal i com mostra la Figura 4.2.

A la Taula 4.4 es donen les coordenades geogràfiques i les altituds de les esta-

a. Molló
b. Roses
c. Barcelona
d. El Perelló

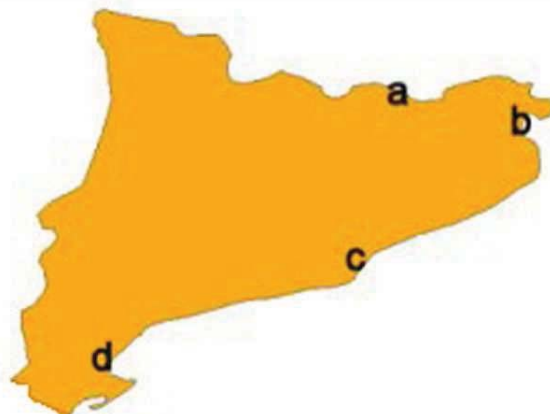


Figura 4.2: Localització de les estacions de mesures de l'UVI de la xarxa

cions. La localització d'estacions costaneres ve justificada per l'elevada densitat demogràfica i pel volum turístic anual. L'estació d'interior permet caracteritzar els efectes de continentalitat i altitud.

Taula 4.4: Coordenades de les estacions de mesura de l'UVI

Estació	Latitud	Altitud (m s.n.m.)
(a) Molló	42° 21' 36" N	1406
(b) Roses	42° 16' 16" N	24
(c) Barcelona	41° 23' 08" N	98
(d) El Perelló	41° 15' 25" N	179

Els sensors de la xarxa són piranòmetres de banda ampla del tipus Robertson-Berger; YES UVB-1 pel cas de Barcelona i Solar Light 501 A per la resta.

4.3.1 Resultats i discussió

A les Figures 4.3(a-d) es mostra l'evolució anual de la irradiància eritemàtica, E_{er} corresponent al migdia solar per cadascuna de les estacions de mesura.

D'igual manera, la Taula 4.5 mostra les mitjanes mensuals dels valors diaris de la E_{er} a les 12 UTC sense núvols per cada cas. Tot i que, segons les recomanacions, l'UVI hauria de representar el valor màxim diari de la irradiància eritemàtica, en

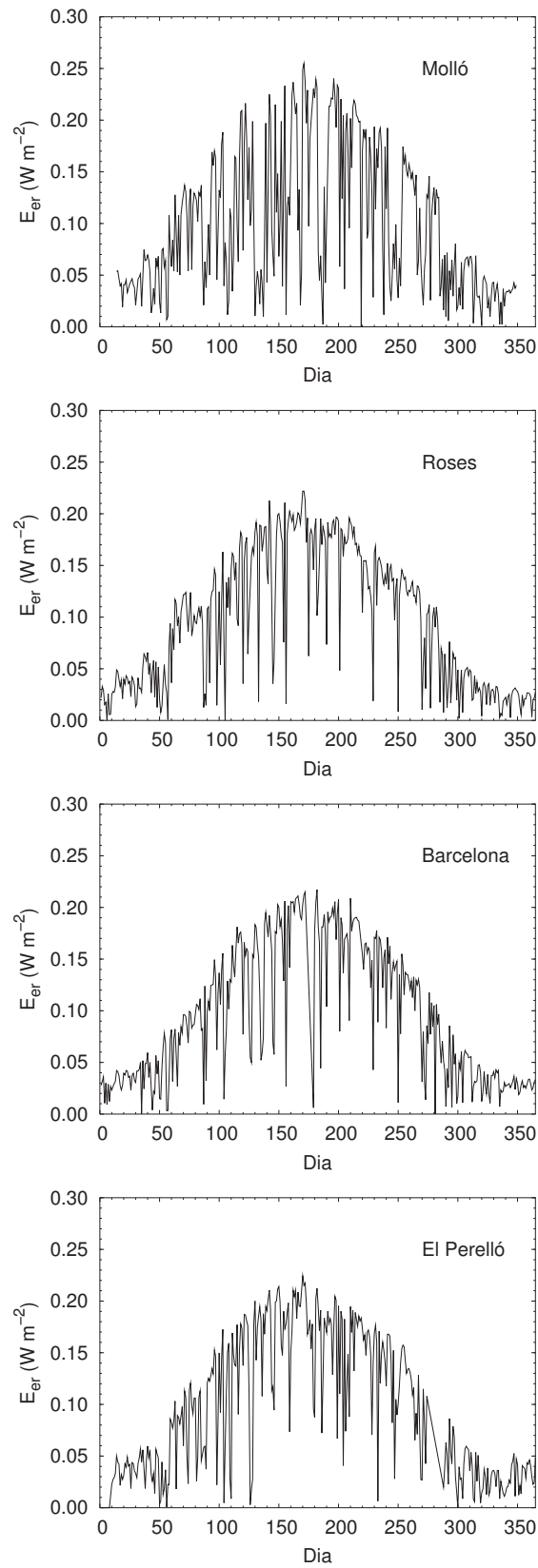


Figura 4.3: Evolució anual de la irradiància eritemàtica, E_{er} al migdia solar durant l'any 2003 per Molló, Roses, Barcelona i El Perelló

Taula 4.5: Mitjana mensual dels valors diaris de E_{er} per cels serens a les 12 UTC. Els valors estan expressats en $W m^{-2}$

E_{er} (Wm^{-2})	(a) Molló	(b) Roses	(c) Barcelona	(d) El Perelló
Gener	0,040	0,030	0,032	0,035
Febrer	0,056	0,045	0,045	0,041
Març	0,121	0,102	0,090	0,098
Abril	0,157	0,142	0,140	0,147
Maig	0,192	0,181	0,175	0,187
Juny	0,225	0,194	0,199	0,196
Juliol	0,214	0,184	0,187	0,187
Agost	0,188	0,157	0,167	0,166
Setembre	0,145	0,127	0,132	0,119
Octubre	0,107	0,087	0,073	0,055
Novembre	0,043	0,032	0,041	0,037
Desembre	0,032	0,020	0,028	0,030

aquest treball l'UVI observat s'ha determinat a partir de la mesura del migdia solar. *Martínez-Lozano et al.* (2002) van analitzar dades procedents d'11 estacions de la Península Ibèrica i van trobar un bon acord entre el valor màxim diari i el corresponent a les 12 UTC. De fet, les diferències entre els dos criteris per determinar l'UVI eren d'1 unitat o inferior en un 90–96% dels casos, depenent de l'estació considerada. Segons aquell estudi, els millors resultats s'obtenen per les estacions properes a la costa mediterrània, fet que recolza la idoneïtat del procediment seguit al present treball.

A partir dels valors mostrats a la Taula 4.5 es poden extreure algunes observacions sobre la influència de l'altitud i la latitud. Per a l'efecte latitudinal, s'han analitzat els valors de les estacions que equidistaven 2° però que estaven a altituds semblants prop del nivell del mar, algunes d'elles situades a la Comunitat Valenciana —Roses ($42^\circ 16' 16''$ N), Prat de Cabanes ($40^\circ 08' 13''$ N) i La Mata ($38^\circ 00' 30''$ N)— i s'ha observat una disminució del 6% en valor mig per grau cap al nord. L'efecte d'altitud s'ha deduït comparant dades entre Molló i Roses (a latituds semblants) i Aras de Olmos i Valencia (separades $0,5^\circ$ en latitud). Pel primer parell d'estacions l'increment és del 16% km^{-1} en valor mig i pel segon, del 21% km^{-1} .

La Taula 4.6 mostra l'UVI per cada estació de mesura i la seva recurrència (en %) durant el període d'estudi. Es pot apreciar que l'UVI més alt mesurat es dona a Molló (10) degut a l'efecte altitudinal.

Taula 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

Estació	UVI										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(a) Molló	16(5)	52(16)	66(20)	43(13)	23(7)	38(12)	14(4)	21(6)	26(8)	22(7)	5(2)
(b) Roses	19(5)	94(26)	39(11)	20(5)	37(10)	45(12)	33(9)	41(11)	33(9)	4(1)	
(c) Barcelona	17(5)	79(22)	56(16)	36(10)	25(7)	32(9)	29(8)	45(13)	35(10)	2(1)	
(d) El Perelló	25(7)	70(20)	60(17)	22(6)	25(7)	28(8)	32(9)	48(14)	34(10)	4(1)	

Basant-se en les dades anteriors s'ha creat una base d'irradiació eritemàtica diària (Jm^{-2}) que s'ha fet servir per a calcular les dosis acumulades durant l'any 2003. Les corbes acumulades (començant a 1 de gener) es van obtenir dividint aquestes dosis per les dosis SED i MED corresponents a cada fototipus. Els valors corresponents a cada MED i a la SED es poden consultar a la Taula 2.1 del Capítol 2. A la Figura 4.4 es presenten els resultats corresponents a les quatre estacions i que mostren les irradiàncies que s'acumularien en el cas d'una exposició al sol ininterrompuda al llarg d'un any en un pla horitzontal. Es pot apreciar el canvi de pendent observat durant els mesos d'estiu. Sota aquestes condicions d'exposició, un fototipus I rebria aproximadament 3000 MEDs en un any, de les quals al voltant de les tres quartes parts serien durant l'estiu; les dosis acumulades, per exemple, a Roses entre els dies 90 i 270 per al fototipus I serien de $2350 Jm^{-2}$ i per la resta de l'any, de $862 Jm^{-2}$.

4.3.2 Valors simulats de l'UVI

Les estimacions de l'UVI a les 12 UTC han estat calculades diàriament amb el model SBDART per a les estacions considerades. El model s'ha aplicat per cels serens, donada la complexitat de caracteritzar els núvols, comparant els resultats amb els valors observats de l'UVI. Prediccions i observacions de l'UVI són gairebé coincidents i únicament presenten desacords substancials els dies en que l'UVI és anormalment baix per l'època degut a nuvolositat variable o cels tapats. Considerant que la sortida del model no té en compte els núvols, el resultat obtingut és molt bo. Per totes les estacions, els UVI simulats i observats estan en acord o difereixen en 1 unitat en més

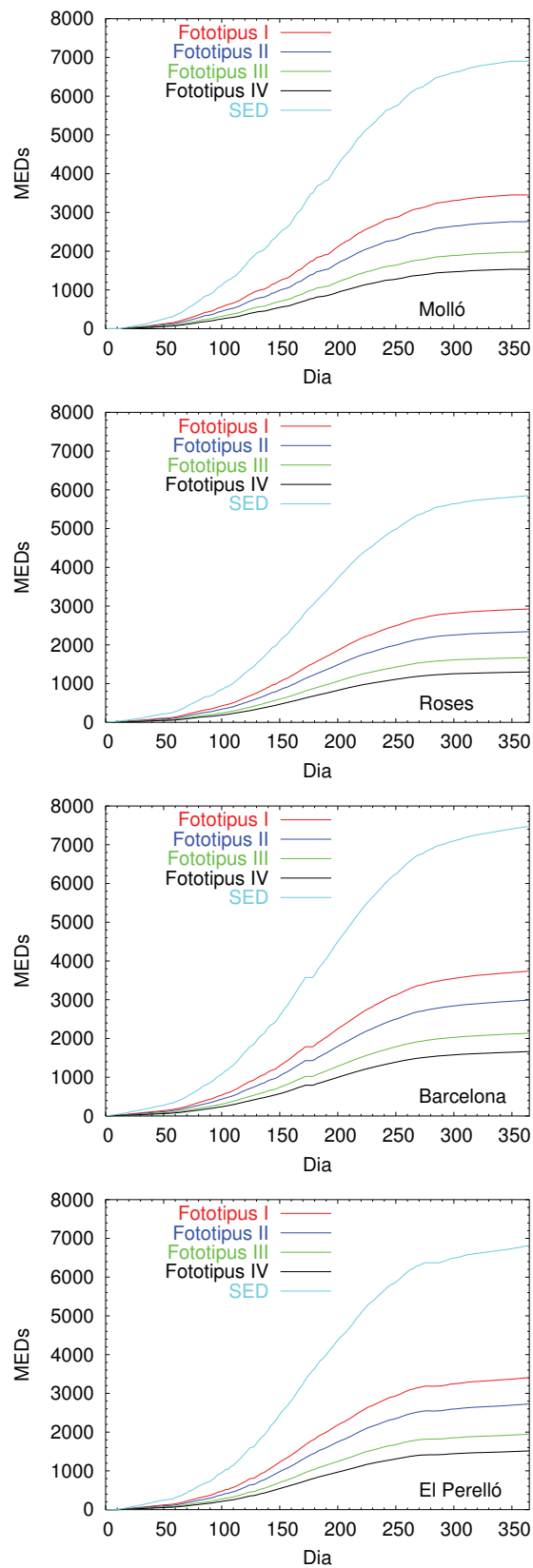


Figura 4.4: Irradiació acumulada al llarg de l'any per les quatre estacions, expressada en SED i en MED pels diferents fototipus de pell

del 81% dels casos. Aquest resultat és acceptable donat que l'índex s'arrodoneix a l'enter més proper, el que pot significar que les diferències reals en irradiància eritemàtica siguin inferiors a $0,025 \text{ Wm}^{-2}$. Fent servir dades de nuvolositat del Servei Meteorològic de Catalunya s'han eliminat els dies que presenten núvols baixos tapant el sol. En el cas de considerar únicament dies amb cels serens i comparant amb la sortida del model s'obté que l'UVI mesurat i modelitzat està en acord fins a 1 unitat de diferència en més del 90% dels casos per a totes les estacions. Els resultats es resumeixen a la Taula 4.7, trobant un acord total d'1 unitat de diferència en el 94% dels casos. L'anàlisi de les desviacions mostren que el model SBDART sobreestima els valors observats en un 10%.

Taula 4.7: Percentatge de dies en que predicció i observació de l'UVI difereixen en 0, 1 o 2 unitats

Estació	Diferència		
	0	1	2
(a)Molló	47,5	45,0	7,4
(b)Roses	61,9	36,8	1,4
(c)Barcelona	57,1	41,0	1,7
(d)El Perelló	54,9	43,9	1,2

4.3.3 Conclusions sobre la mesura i predicció de l'UVI

S'han analitzat els valors d'irradiància eritemàtica mesurats per la xarxa de piranòmetres de Catalunya durant l'any 2003. Considerant només valors d'UVI superiors o iguals a 3 (entre moderat i molt alt) es troba una dependència latitudinal (a nivell del mar) del 3–4% per grau. A partir d'aquestes mesures, l'UVI diari mostra valors màxims anuals de 9 (molt alt) per totes les estacions tret de Molló on va arribar a 10 degut a l'efecte d'altitud. Els valors mesurats són útils per a comprovar la precisió de l'UVI predit diàriament fent servir el model SBDART. En el 94% dels casos les diferències entre mesures i prediccions, en condicions de cel serè, eren d'una unitat o inferior.

4.4 Determinació de la columna d'ozó amb mesures espectrals

Malgrat que representen un gran avantatge per l'àmplia cobertura espacial i temporal, en cas de dies nuvolosos els satèl·lits han d'estimar la quantitat d'ozó de les capes baixes de l'atmosfera. Aquesta aproximació comporta una subestimació de la columna total. Existeix la possibilitat de corregir aquest error sistemàtic a partir de la comparació amb mesures des de superfície. El Departament d'Astronomia i Meteorologia no disposa d'ozonosondatges ni d'instruments operatius per a determinar la columna total d'ozó però sí que compta amb un espectroradiòmetre d'alta precisió mesurant des de 1999.

En la literatura s'han desenvolupat diferents tècniques per a determinar la columna d'ozó a partir de mesures espectrals. En el present capítol se seguirà la metodologia d'una d'elles a partir de la irradiància solar global. *Stammes et al.* (1991) van ser els primers a proposar l'ús del ràtio entre dues longituds d'ona per a determinar el contingut d'ozó de l'estratosfera. En el seu estudi mostren que el quocient entre la irradiància en una longitud d'ona fortament absorbida per ozó (UVB) i una altra fora de l'interval d'absorció en la regió UVA, és més sensible a la quantitat d'ozó que a la terbolesa i a la nuvolositat. Seguint el procediment desenvolupat posteriorment per *Masserot et al.* (2002) s'ha utilitzat el ratio entre les irradiàncies integrades sobre dos intervals de longituds d'ona diferents: 305–310 nm i 340–345 nm. L'ús d'un interval integrat enfront d'una única longitud d'ona redueix la influència de possibles desalineaments de l'escala de longituds d'ona entre la mesura i la referència ja que l'espectre solar UV presenta unes línies d'absorció de Fraunhofer fortes.

Amb l'objectiu de comprovar la bondat del mètode s'ha escollit un període d'un any com exercici de primera aproximació al mètode. Les mesures d'irradiància global durant l'any 2007 van ser registrades entre l'orto i l'ocàs amb un interval quinze-minutal per l'espectroradiòmetre Benthan DMc 300. El temps necessari per a completar un espectre en l'interval UV (amb una precisió de 0,5 nm) és de 3 minuts. Per a cadascun dels intervals de longitud d'ona seleccionats, l'instrument empra 6 segons amb un salt temporal de 33 segons. Tant l'escàs temps per a cada seqüència com la proximitat entre intervals permet considerar les mesures gairebé simultànies. Això implica no haver de tenir en compte possibles interferències de núvols o d'aerosols que podrien introduir errors en la determinació de la columna

total d'ozó. No obstant això, aquests paràmetres sí podrien afectar el resultat final d'ozó ja que, com es veurà posteriorment, els càlculs es realitzen sota la suposició de cels serens.

A partir dels ratios es determinarà la columna total d'ozó buscant i interpolant una taula de consulta (LUT, Look Up Table). Aquesta taula es construirà a partir dels ratios calculats amb un model de transferència radiativa, en aquest cas l'SB-DART 2.4 (*Ricchiazzi et al.*, 1998). S'imposaran unes condicions comunes per a totes les simulacions i únicament es deixaran lliures dues variables: SZA i TOC. L'angle zenital solar variarà entre 20° i 85° cada 1° i l'ozó entre 200 UD i 500 UD amb un interval de 10 UD. Els paràmetres comuns per a totes les simulacions són:

- Perfil vertical d'atmosfera MLS (Mid Latitude Summer)
- Albedo (0,055)
- Propietats òptiques dels aerosols determinades a partir de la mitjana del fotòmetre CIMEL (*Rodríguez*, 2004) ($\alpha = 1$; $\tau_{550} = 0$). Per als paràmetres d'asimetria i l'albedo de dispersió simple s'han fet servir els valors de 0,7 i 0,85, respectivament ja que no han estat determinats encara amb dades experimentals.
- Espectre solar extraterrestre: UARS/SUSIM²

La Figura 4.5 mostra les LUT obtingudes per 3 valors de columna total d'ozó segons el mètode descrit.

El resultat obtingut són unes corbes polinòmiques de tercer grau amb coeficients de correlació superiors a 0,999 en tots els casos. Donat un valor de ratio i un SZA serà possible determinar la corba a la qual s'adscriuen aquests punts i així determinar l'ozó. Es pot apreciar que els ratios disminueixen segons augmenta l'ozó i l'angle zenital solar. Un augment de la columna total d'ozó afecta a la irradiància espectral a 305 nm, reduint-se per tant el numerador del ratio. Al seu torn, la incidència dels raigs solars amb major obliquïtat repercuteix més en les longituds d'ona curta produint-se el mateix resultat que en el cas anterior.

²Upper Atmosphere Research Satellite/Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor

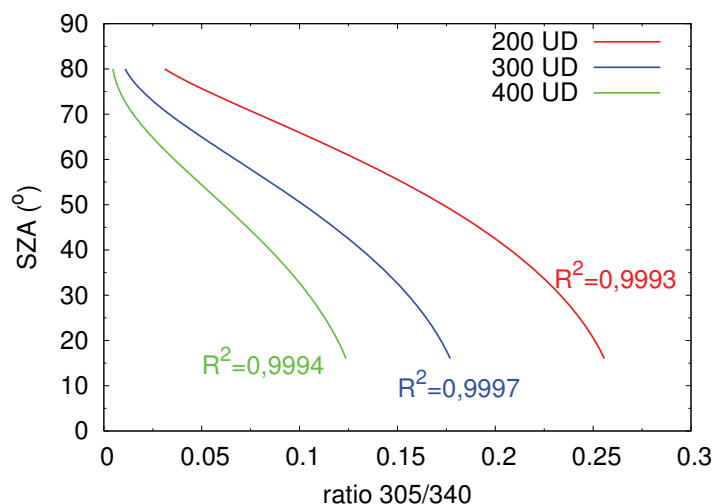


Figura 4.5: LUT per a 200, 300 i 400 UD

Una altra representació de les LUT segons el SZA mostra també corbes polinòmiques de grau 3 (Figura 4.6). Per a un mateix ratio, la columna total d'ozó disminueix de manera inversa al SZA sent les majors diferències com més gran és el SZA.

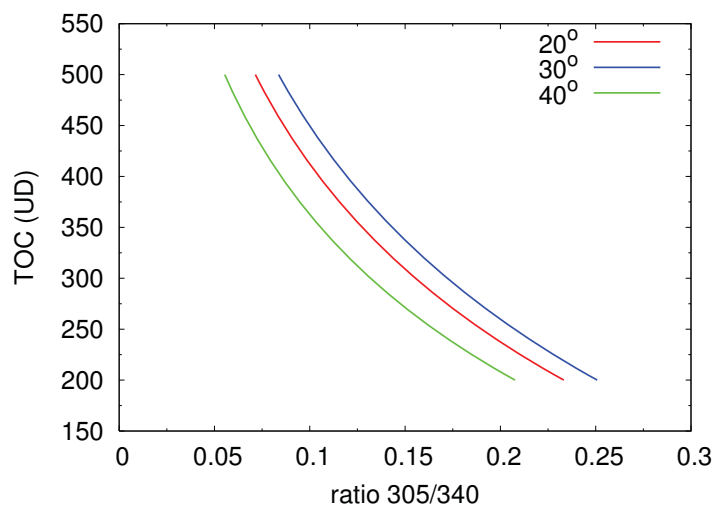


Figura 4.6: LUT per a 20°, 30° i 40°

Aplicant el mètode descrit anteriorment s'ha determinat la columna total d'ozó a partir de les mesures d'irradiància solar global a Barcelona durant l'any 2007. Per a cada mesura realitzada entre la sortida i la posta de sol, s'ha calculat la columna

total d'ozó a partir del SZA i el ratio. Amb els resultats obtinguts s'han determinat les mitjanes segons dos criteris:

- Valor mig diari per a totes les mesures entre sortida i posta de sol
- Valor mig diari per a les mesures compreses entre les 8 i les 11 UTC

L'elecció del segon criteri es basa en el pas habitual del sensor OMI sobre la localitat. Les mesures d'aquest satèl·lit es realitzen dins de l'interval 10–12 h local en qualsevol píxel de la malla. Així per a estudiar la validesa del mètode s'han comparat els resultats obtinguts per als dos criteris amb la columna total d'ozó mesurada des de satèl·lit (Figura 4.7).

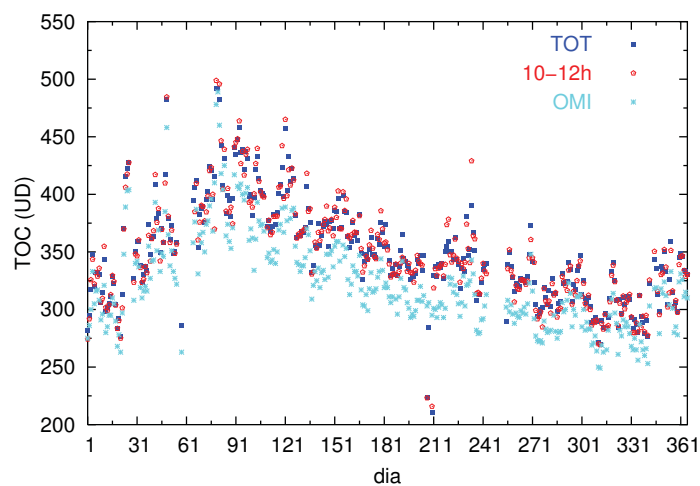


Figura 4.7: Columna total d'ozó (UD) calculada a partir de mesures espectrals i mesurada amb el sensor satel·lital OMI. Les mitjanes s'han realitzat per tot el dia (TOT) i per les hores compreses entre les 10 i les 12 UTC (10–12)

Com es pot observar a la Figura 4.7, la columna total d'ozó, determinada a partir de mesures d'irradiància solar global, s'ajusta prou bé a les mesures de satèl·lit per al període en qüestió. No obstant, és evident que en termes generals sobreestimen el valor de la columna respecte a la mesura des de l'espai. Si s'analitzen els resultats amb més deteniment s'obté que el ratio Bentham/OMI és de $1,08 \pm 0,04$ en valor mig per als dos casos descrits, el que es traduiria en una diferència d'unes 24 UD (diferència del $\sim 8\%$). Els valors obtinguts són superiors als mostrats al treball de *Masserot et al.* (2002) realitzat a Briançon (França) amb un espectroradiòmetre de

similars característiques durant l'any 2000. En aquell cas s'obtenia un ratio de $1,04 \pm 0,04$ per a les mitjanes diàries. Les diferències existents entre els dos treballs són degudes a que, en aquest cas, s'ha fet servir tota la sèrie de dies sense desestimar aquells amb una certa presència de núvols. Tot i els bons resultats, existeixen dies puntuals en que les diferències poden arribar al 15%.

Tot i les discrepàncies observades entre les mesures de satèl·lit i les derivades de mesures espectrals resulta útil disposar de la possibilitat de determinar la columna total d'ozó a partir de dades de superfície en el cas de no disposar de les altres. Els dies amb cels serens s'obtiniran els millors ajustos i les dades obtingudes seran més precises.

4.5 Sensibilitat de l'SBDART als perfils d'atmosfera

Entre les moltes variables d'entrada que es poden introduir en el model SBDART, una de les que es fa servir el valor per defecte del model és el perfil vertical d'atmosfera. La versió 2.4 del model disposa de 6 perfils atmosfèrics estàndard que intenten simular condicions climàtiques tipus: tropical, latituds mitges a l'estiu i l'hivern, subàrtic a l'estiu i l'hivern i US62 (condicions típiques sobre Estats Units). Aquests models d'atmosfera (*McClatchey et al.*, 1971) han estat àmpliament utilitzats per la comunitat científica atmosfèrica i ofereixen perfils verticals estàndard de pressió, temperatura, vapor d'aigua i densitat d'ozó. Addicionalment, els usuaris poden definir un model d'atmosfera propi a partir de dades mesurades amb sondatges o simulades.

Les propietats òptiques dels aerosols poden ser definides mitjançant una sèrie de paràmetres que s'introdueixen en el model o triant un dels models d'aerosols del propi programa (rural, urbà, oceànic i troposfèric). En el cas de disposar de mesures de les propietats d'aerosols es pot introduir l'espessor òptic d'aerosols a 550 nm, l'alfa de Ångstrom, l'albedo de dispersió simple i el paràmetre d'asimetria.

El perfil vertical d'atmosfera del model SBDART requereix la introducció de la densitat de vapor d'aigua o humitat absoluta de l'aire, que pot determinar-se en cada nivell a partir de les dades del radiosondatge termodinàmic. Al seu torn

també es pot conèixer la massa d'aigua precipitable (w), definida com la massa de vapor d'aigua continguda en la columna de secció unitat per sobre de cada nivell, a partir del perfil de valors d'humitat relativa. No obstant això, els perfils d'humitat relativa determinats pels radiosondatges han de corregir-se a causa de determinats errors associats a la formació de gel, al desfasament temporal entre els termòmetres humit i sec, la incertesa del sensor de pressió (*Richner and Phillips*, 1982) i l'abast de la sonda. *Bruegge et al.* (1992) durant el projecte FIFE (First ISLSCP³ Field Experiment) van mostrar resultats que arribaven a un error de fins a un 13% en la determinació de la massa d'aigua precipitable. A partir dels radiosondatges realitzats a les 12 UTC des de l'estació del Departament d'Astronomia i Meteorologia de Barcelona durant el període 2003–2004 es va trobar una sobreestimació propera o lleugerament superior al 10% respecte als valors d'aquesta variable determinats mitjançant les mesures del fotòmetre CIMEL (*Campmany*, 2005).

Amb una menor freqüència, tant geogràfica com temporal, es realitzen ozonosondatges conjuntament amb els radiosondatges. El resultat és un perfil vertical de la pressió parcial d'ozó, el qual es pot integrar per a obtenir la columna d'ozó entre superfície i l'altitud màxima a la qual arriba, típicament al voltant de 35 km. Com en el cas de la massa d'aigua precipitable, el fet que l'ozonsonda arribi només fins a una altura límit fa que existeixi una quantitat residual que no és mesurada i que ha de ser estimada. Per a sondes que arriben fins a uns 30 km, aquesta quantitat és de l'ordre del 15% respecte a la columna total real.

4.5.1 Perfils d'atmosfera estàndard

Dels 6 perfils d'atmosfera estàndard que disposa el model SBDART, existeixen 2 que s'ajusten a les característiques de l'atmosfera de latituds mitges: Mid-latitude Summer (MLS) i Midlatitude Winter (MLW). Les Figures 4.8 i 4.9 mostren els perfils verticals de temperatura, densitat d'ozó i humitat absoluta per a ambdós.

A la Figura 4.8 es pot observar que les diferències de temperatura entre ambdós models es troben principalment en les capes més baixes de la troposfera. Així, en MLW la temperatura en superfície és de 0 °C i en canvi, el valor estàndard per a la temperatura en MLS és de 20 °C. Considerant la densitat d'ozó, aquesta és menor durant l'hivern a causa de la menor radiació solar que arriba a la superfície

³International Satellite Land Surface Climatology Project (<http://www.gewex.org/islscp.html>)

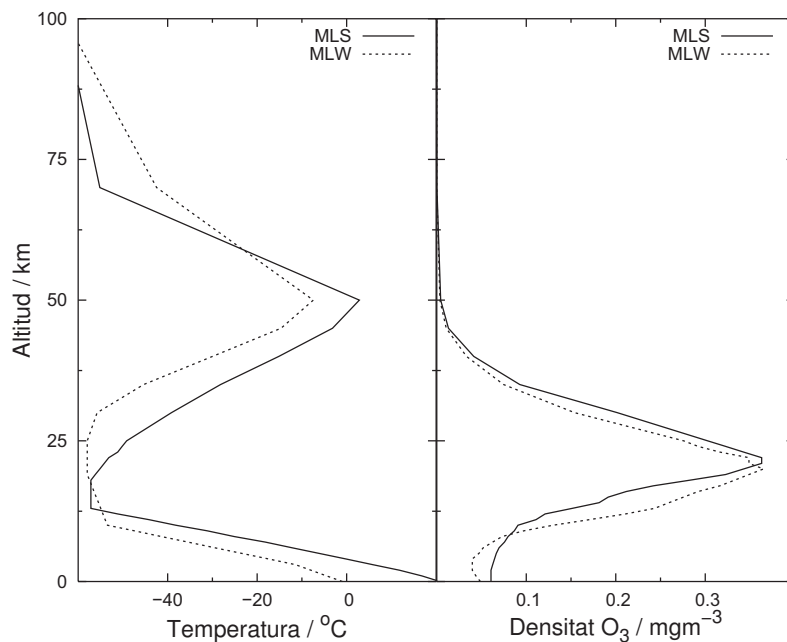


Figura 4.8: Perfil vertical de temperatura i densitat d'ozó per als models d'atmosfera MLS i MLW

en aquestes latituds. A les capes més altes els perfils verticals presenten una menor diferència. En quant a la humitat absoluta s'aprecia a la Figura 4.9 com a l'estiu els valors són quasi cinc vegades majors que a l'hivern per a les capes més baixes de la troposfera. En canvi, per a altituds superiors als 12 km la humitat es redueix considerablement fins a valors inferiors a 10^{-2} gm⁻³ i pràcticament no existeixen diferències entre ambdós perfils.

Amb l'objectiu d'estudiar la sensibilitat del model SBDART als perfils atmosfèrics, es realitzen dues simulacions amb idèntiques característiques de visibilitat, ozó i albedo per a un determinat lloc en un dia i hora concrets, variant únicament el perfil vertical d'atmosfera entre els dos anteriors. El resultat és una diferència de $0,06$ Wm⁻² a la regió de l'UVB, sent superior en el cas d'usar el model d'atmosfera MLW. En el cas de la irradiància biològicament efectiva, les diferències arribarien al 3% i encara que petites, aquestes podrien dur a variacions en 1 unitat de l'UVI en el procés d'arrodoniment. És per aquest motiu que interessa treballar l'estructura fina del model introduint aquest tipus de variables el més ajustadament possible amb l'objectiu d'obtenir millores en la irradiància simulada i en la posterior predicció de l'UVI.

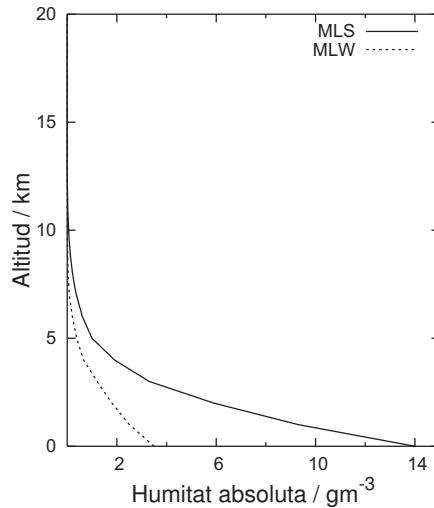


Figura 4.9: Perfil vertical d'humitat absoluta per als models d'atmosfera MLS i MLW

4.5.2 Resultat de les simulacions amb diferents perfils

A partir dels radiosondatges termodinàmics realitzats des de l'estació de Barcelona ($41,35^\circ \text{ N}$; $2,16^\circ \text{ E}$) s'ha determinat la massa d'aigua precipitable per a l'any 2003. Els models d'atmosfera estàndard, MLS i MLW descriuen d'igual forma qualsevol lloc situat en latituds mitges malgrat tenir temperatures i humitats característiques quantitativament diferents a les donades en un altre punt. Per aquest motiu, s'ha portat a terme un estudi comparatiu dels valors de massa d'aigua precipitable i columna total d'ozó d'ambdós perfils estàndard amb els valors mesurats a Barcelona a partir de radiosondatges termodinàmics i mesures de satèl·lit (TOMS–Earth Probe)

A l'estudi no s'ha tingut en compte la temperatura malgrat les diferències que presenta, especialment en superfície com s'observa en la Figura 4.8 ja que les variacions que introdueix en l'UVI simulat són inferiors a l'1% a l'estiu i només per a determinats angles zenitals solars. Segons aquest estudi es conclou que l'ús dels models MLS i MLW per a les estacions pròpiament d'estiu i hivern és unívoc, en canvi els dies de les dues estacions restants han de dividir-se entre ambdós models. Així el perfil propi de MLS pot utilitzar-se entre maig i mitjans d'octubre com es mostra en la Figura 4.10.

Després d'aquest estudi s'ha introduït la massa d'aigua precipitable a les simulacions amb SBDART per a l'any 2003 a les 12 UTC en les quals es va aplicar el

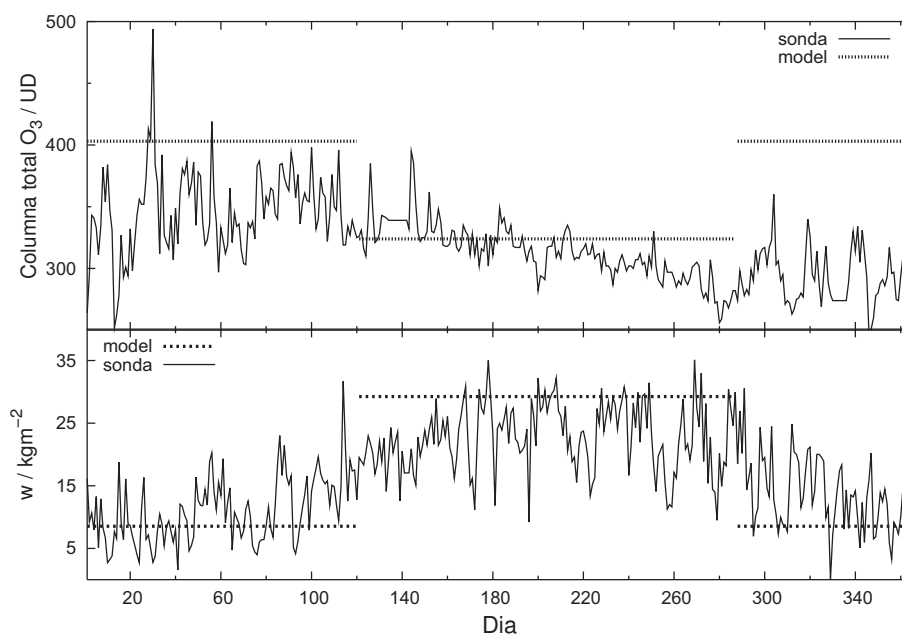


Figura 4.10: Evolució anual (2003) de la massa d'aigua precipitable (w) del radiosondatge i la columna total d'ozó del TOMS. Comparació amb els valors estàndard dels models MLS i MLW per cada període temporal corresponent

model d'atmosfera MLS i MLW dependent del dia, la columna total d'ozó mesurada amb el sensor TOMS, aerosols troposfèrics de tipus urbà i una visibilitat màxima. En el model SBDART, el model d'aerosols determinat per l'usuari no té definida la dependència amb la humitat sinó que ha utilitzar-se un model físic d'atmosfera; per aquest motiu s'usen els aerosols urbans definits i amb dependència amb la humitat relativa en el model i que s'ajusten als propis d'una ciutat com Barcelona.

Dels resultats s'obté que en el cas d'introduir la massa d'aigua precipitable en el model, l'UVI disminueix entre 0,05 i 0,6 respecte al cas de deixar el seu valor per defecte. Les diferències més acusades es donen durant els mesos d'estiu amb valors entre $-0,4$ i $-0,6$. En corregir l'error de sobreestimació del 13% en el càlcul de la massa d'aigua precipitable mitjançant radiosonda, se suavitzen diferències de comportament diferent, fins i tot positiu fruit de masses d'aigua precipitable molt altes i una columna total d'ozó especialment baixa. Com s'observa a la Figura 4.11, aquestes diferències són més pròpies dels mesos d'estiu en els quals s'utilitza el model d'atmosfera MLS.

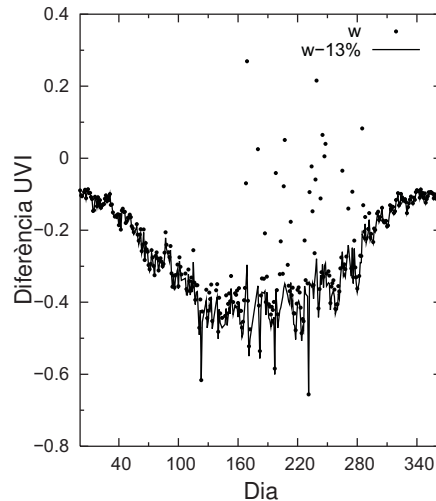


Figura 4.11: Diferència en l'UVI tenint en compte la massa d'aigua precipitable dels radiosondatges respecte a deixar el valor del model per defecte ($w-13\%$ i w , depenent de si es fa servir la correcció o no d'aquesta variable)

En el cas de disposar de dades procedents d'ozonosonda és possible definir un model d'atmosfera propi a través dels perfils verticals. A les Figures 4.12 i 4.13 es representen els perfils verticals per a 3 dies concrets mesurats a Armilla ($37,13^\circ$ N, $3,62^\circ$ O) mitjançant radiosondatge termodinàmic i ozonosondatge. Es pot apreciar que les diferències en el perfil vertical de temperatura són mínimes, únicament els valors en superfície són més elevats. En canvi, la humitat i la concentració d'ozó a les capes més baixes de la troposfera presenten importants diferències.

Així, en superfície l'aire seria més sec amb valors inferiors en alguns casos a la meitat del valor proporcionat pel model MLS. Quant a l'ozó, aquest és superior als valors estàndard per sota dels 5 km en un 38% a causa de la formació d'ozó troposfèric pròpia de les ciutats. D'aquesta forma s'ha procedit a realitzar diferents simulacions per a situacions comunes en quant a la localització, els aerosols, l'espectre extraterrestre i l'albedo; diferenciant-se entre elles en el perfil vertical d'atmosfera i en la manera de determinar la columna total d'ozó. S'han realitzat 3 simulacions que es designaran amb els números 0, 1 i 2 amb les següents característiques pròpies de cadascuna:

- Simulació 0: O3 TOMS, perfil MLS

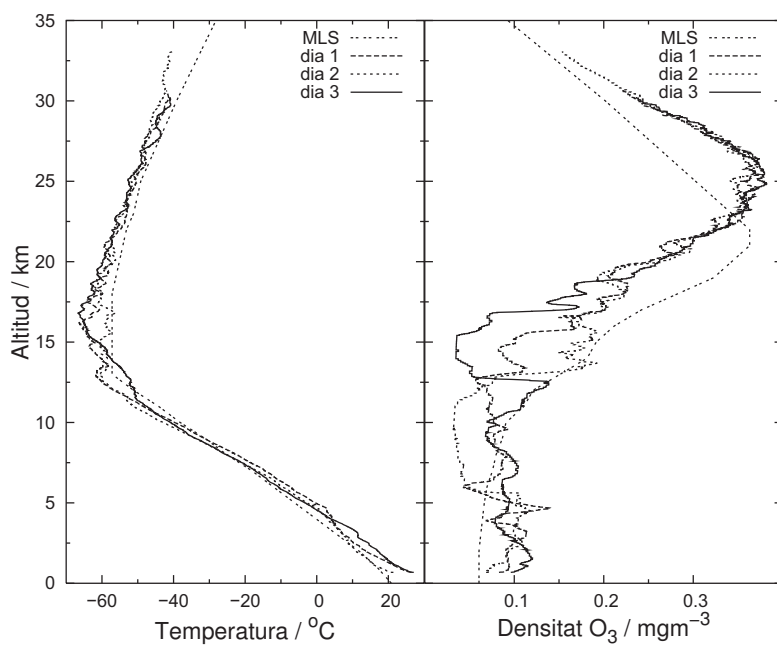


Figura 4.12: Perfil vertical de temperatura i densitat d'ozó per als models d'atmosfera MLS i per a tres mesures d'ozonsonda de tres dies diferents

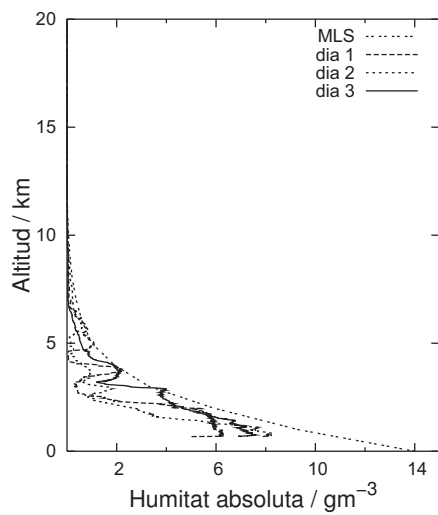


Figura 4.13: Perfil vertical d'humitat absoluta per als models d'atmosfera MLS i per a tres mesures de radiosonda atmosfèrica de tres dies diferents

- Simulació 1: O3 sonda, perfil MLS
- Simulació 2: O3 sonda, perfil sonda corregit

Típicament els sondatges atmosfèrics arriben fins a una altitud de 35 km, amb la qual cosa no es disposa d'informació per a les capes superiors de l'atmosfera. Per aquest motiu s'ha estimat el valor residual de la columna total d'ozó i respecte a la densitat d'ozó s'han completat els nivells finals dels perfils d'atmosfera amb dades del model d'atmosfera MLS. Els resultats obtinguts en les simulacions es detallen en la Taula 4.8.

Taula 4.8: Irradiància UVB i UVI per als 3 dies estudiats i per a les 3 simulacions proposades

	Dia 1		Dia 2		Dia 3	
	UVB (Wm^{-2})	UVI	UVB (Wm^2)	UVI	UVB (Wm^{-2})	UVI
0	3,764	10,4	3,613	9,9	3,706	10,6
1	3,710	10,2	3,611	9,9	3,571	9,9
2	3,707	10,1	3,605	9,8	3,535	9,7

A la Taula 4.8 es pot observar com introduir dades d'ozonosondatges en el model pot donar lloc a variacions d'entre 0,1 i 0,9 en l'UVI simulat. Les majors diferències es produeixen a l'introduir la columna total d'ozó determinada integrant el perfil de densitats o a partir de mesures de satèl·lit. En el cas del dia 3, les diferències entre ambdós valors d'ozó se situaven en el 6% degut probablement a que es tractava d'un dia amb gran terbolesa i aerosols de tipus saharià; en canvi, en els altres dos casos les diferències eren inferiors a l'1%. Respecte a l'ús o no del perfil vertical real dona lloc a diferències de 0,1 en l'UVI.

4.5.3 Conclusions sobre el perfil d'atmosfera als models radiatius

El valor de la irradiància solar UV que arriba a la superfície terrestre depèn d'un gran nombre de variables. Els models de transferència radiativa permeten introduir gran part d'elles com a entrada per a la simulació. No obstant això, disposar de

valors per a moltes d'aquestes variables, tant mesurats com simulats no sempre és factible i han de deixar-se per defecte els valors que disposa el model. Aquests valors no són sempre comuns a tots ells i poden donar lloc a diferències en el resultat fruit de la inhomogeneïtat de les entrades per defecte. Per aquest motiu, resulta de gran importància disposar d'informació el més detallada i extensa possible especialment en el cas de les prediccions de l'UVI determinades a partir dels resultats del model.

Per a algunes d'aquestes variables d'entrada està àmpliament estudiada la seva relació amb la irradiància UV com és el cas de l'ozó del qual es pot disposar de mesures tant des de superfície com des de satèl·lit. No obstant això, existeixen altres que s'acostumen a deixar per defecte com és el cas dels perfils verticals d'atmosfera i que permeten caracteritzar situacions atmosfèriques diferents a les proposades pels perfils estàndard propis del model.

En el present treball s'ha estudiat la influència d'aquests models d'atmosfera en la irradiància UV simulada. Canvis en els perfils verticals són inversament proporcionals a la longitud d'ona, així, les variacions es reflecteixen especialment en la radiació UVB mentre la regió UVA roman gairebé invariable. Conseqüentment, es donen canvis a les irradiàncies biològicament efectives centrades en aquest rang com és el cas de la eritemàtica. En el cas de disposar únicament de valors de massa d'aigua precipitable determinada a partir de radiosondatge termodinàmic, les diferències en l'UVI simulat segons s'introdueixi o no en el model varien entre 0,1 i 0,6. Les diferències màximes es donen durant els mesos d'estiu. El fet d'introduir una correcció sobre la massa d'aigua precipitable, fruit de determinats errors de la sonda, suavitza algunes simulacions en les quals el valor de la massa d'aigua precipitable era marcadament diferent als proposats per MLS i MLW.

En el cas de disposar d'ozonosondatges, es pot determinar la columna total d'ozó a partir de les mesures i posteriorment introduir el seu valor corregit en el model. Disposar d'aquest valor pot resultar útil en el cas de simular la irradiància a diferents altituds en les quals no es disposa de mesures. Per al cas estudiat, existeixen importants diferències entre la columna total d'ozó mesurada i la MLS, especialment per sota dels 5 km on el valor real és un 38% superior a l'estàndard.

A l'introduir la columna total d'ozó i el perfil vertical s'obtenen diferències en l'UVI de 0,1–0,9 depenent de les diferències en l'ozó total. En el cas de variar únicament el perfil vertical respecte a l'estàndard del model dóna lloc a diferències de 0,1 en l'UVI. Resulta llavors important caracteritzar al màxim la situació atmosfèrica

real amb l'objectiu d'ajustar la simulació de la irradiància solar UV als valors reals.

El major coneixement de les variables d'entrada és el camí a la millor caracterització de la irradiància solar UV, el que condueix a una major precisió en les prediccions de l'UVI.

Bibliografia

Antón, M. (2007), Modelos empíricos para la estimación de la irradiancia solar ultravioleta, Ph.D. thesis, Universidad de Extremadura.

BOE (2002), Boletín Oficial del Estado.

Bruegge, C. J., J. E. Conel, R. O. Green, J. S. Margolis, R. G. Holm, and G. Toon (1992), Water vapor column abundance retrievals during FIFE, *J. Geophys. Res.*, 97(D17), 18,759–18,768.

Campmany, E. (2005), Predicció de la radiació solar espectral UV mitjançant models de dispersió múltiple. Aplicació a l'índex UV a Catalunya, Ph.D. thesis, Universitat de Barcelona.

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 Cabo, X., E. Campmany, M. Martín, and J. Lorente (2004), *The first Iberian UV-Visible instrumentals intercomparison. Final Report*, chap. 10, pp. 101–107, Ministerio de Medio Ambiente.

Gueymard, C. (1995), SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment, *Tech. rep.*, Technical Report FSEC-PF-270-95, Florida Solar Energy Center.

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.
- Lorente, J., Y. Sola, E. Campmany, X. de Cabo, and J. Bech (2007), Climatología de la radiación solar UV en Cataluña, in *5º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da Associação Portuguesa de Meteorologia e Geofísica*.
- Madronich, S., S. Flocke, J. Zeng, I. Petropavlovskikh, and J. Lee-Taylor (2002), Tropospheric Ultraviolet-Visible Model (TUV) version 4.1, *Tech. rep.*, National Center for Atmospheric Research, P.O. Box 3000, Boulder, Colorado 80307.
- Marín, M. J., Y. Sola, F. Tena, M. P. Utrillas, E. Campmany, X. de Cabo, J. Lorente, and J. A. Martínez-Lozano (2005), The UV Index on the Spanish Mediterranean Coast, *Photochem. Photobiol.*, *81*, 659–665.
- Martínez-Lozano, J., M. Marín, F. Tena, M. Utrillas, L. Sánchez-Muniosguren, C. González-Frías, E. Cuevas, A. Redondas, J. Lorente, X. de Cabo, V. Cachorro, R. Vergaz, A. de Frutos, J. Díaz, F. Expósito, B. de la Morena, and J. Vilaplana (2002), UV Index Experimental Values During the Years 2000 and 2001 from the Spanish Broadband UV-B Radiometric Network, *Photochem. Photobiol.*, *76*(2), 181–187, doi:10.1562/0031-8655(2002)0760181UIEVDT2.0.CO2.
- Masserot, D., J. Lenoble, C. Brogniez, M. Houet, N. Krotkov, and R. McPeters (2002), Retrieval of ozone column from global irradiance measurements and comparison with TOMS data. A year of data in the Alps, *Geophys. Res. Lett.*, *29*(9), doi:10.1029/2002GL014823.
- McClatchey, R. A., R. W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volz, and G. J. S (1971), *Optical properties of the atmosphere*, vol. Report AFCRL-71-0279, Air Force Cambridge Research Lab., Bedford, Massachusetts.
- Nakajima, T., and M. Tanaka (1986), Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Trans.*, *35*, 13–21.
- 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.

- Richner, H., and P. D. Phillips (1982), The radiosonde intercomparison sondex spring, *Pure Appl. Geophys.*, *120*, 851–1198.
- Rodríguez, J. (2004), Característiques d'aerosols a la ciutat de Barcelona mitjançant el CIMEL CE 318 N - V B S7. Resultats provisionals, informe intern, no publicat.
- 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., J. Lorente, E. Campmany, X. de Cabo, J. Aguilera, F. López-Figueroa, M. V. de Gálvez, and E. Herrera (2005), Evaluation of different harmful effects of the UV radiation from artificial sources, *Ann. Meteorol.*, *41*(2), 699–700.
- 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*.
- Stammes, K., S. Tsay, W. Wiscombe, and K. Jayaweera (1988), Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media, *Appl. Opt.*, *27*, 2502–2509.
- Stammes, K., J. Slusser, and M. Bowen (1991), Derivation of total ozone abundance and cloud effects from spectral irradiance measurements, *Appl. Opt.*, *30*, 4418–4426.
- Vanicek, K., T. Frei, Z. Litynska, and A. Schmalwieser (2000), UV-Index for the Public, *Publication of the European Communities, Brussels, Belgium*.

