DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y TERMODINÁMICA

ESTUDIO DE LA IRRADIANCIA SOLAR ULTRAVIOLETA B Y ERITEMÁTICA EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

MARÍA JOSÉ MARÍN FERNÁNDEZ

UNIVERSITAT DE VALENCIA
Servei de Publicacions
2007

Aquesta Tesi Doctoral va ser presentada a Valencia el dia 16 de Febrer de 2007 davant un tribunal format per:

- D. Jerónimo Lorente Castelló
- D. Luis Javier Cañada Ribera
- D. Josep Abel González Gutiérrez
- D ª. Inmaculada Foyo Moreno
- D. José Antonio Martínez Lozano

Va ser dirigida per:
D ª. María Pilar Utrillas Esteban
D. Fernando Tena Sangüesa

©Copyright: Servei de Publicacions
María José Marín Fernández

Depòsit legal:
I.S.B.N.:978-84-370-6762-9
Edita: Universitat de València
Servei de Publicacions
C/ Artes Gráficas, 13 bajo
46010 València
Spain
Telèfon: 963864115

VNIVERSITAT DE VALÈNCIA Facultat de Física

Departament de Física de la Terra i Termodinàmica

Tesis Doctoral

Estudio de la Irradiancia Solar Ultravioleta B y Eritemática en la Comunidad Valenciana

Memoria presentada por
MARÍA JOSÉ MARÍN FERNÁNDEZ
para optar al grado de Doctora en Física
Valencia, 2007

Dña. María Pilar Utrillas Esteban y D. Fernando Tena Sangüesa, ambos profesores titulares del área de Física de la Tierra, y adscritos al Departament de Física de la Terra i Termodinàmica de la Facultat de Física de la Universitat de València,

CERTIFICAN:

> Que la presente memoria titulada: "Estudio de la Irradiancia Solar Ultravioleta B y Eritemática en la Comunidad Valenciana", presentada por Dña. María José Marín Fernández para optar al grado de Doctora en Física, ha sido realizada bajo nuestra dirección en el Departament de Física de la Terra i Termodinàmica de este Facultad.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos el presente certificado en Burjassot, a 20 de Diciembre de 2006.

Fdo: María Pilar Utrillas Esteban Fdo: Fernando Tena Sangüesa

A Juan Antonio y a mis padres

Agradecimientos

Parece mentira que llegado a este punto una pueda seguir sintiendo pánico a la hoja en blanco. En este caso puede que esté justificado, no es sencillo plasmar tantas emociones en unas pocas líneas a sabiendas que muchos será lo único que leerán. Espero no defraudarles mucho.

Quisiera empezar agradeciendo a mis directores de tesis, Pilar Utrillas y Fernando Tena su ayuda inestimable en la elaboración de este trabajo y en tantos otros. Pero el Grupo de Radiación Solar no sería lo mismo sin nuestro jefe, José Antonio Martínez Lozano. Espero seguir colaborando con vosotros en el futuro, aunque sea lejos de este departamento.

También quisiera agradecer especialmente al profesor Manuel Nuñez y a su esposa Aldona su calurosa acogida en mi aventura en las antípodas, en Hobart (Australia). Fue una experiencia vital para mí. Asimismo al profesor Jerónimo Lorente por su amabilidad en mis visitas a Barcelona.

No puedo olvidarme de mis compañeros de Solar, que tras tantas horas juntos se han convertido en mis amigos. Especialmente a Víctor, gracias por tus ánimos. Ya sabes que cualquier tiempo futuro será mejor. Te deseo que puedas seguir en esto, hacen falta científicos apasionados. José Luis, mi alma gemela en el doctorado, espero que la suerte siga de tu lado. Gracias por recordarme que hay vida fuera del campus. Querida Anna, en la radiación ultravioleta empezaste para acabar en el otro bando. Ha sido muy agradable tenerte de compañera de fatigas. Espero que te sientas tan a gusto como he estado yo estos años. Si algo echaré de menos es el ambiente del despacho y vuestros consejos de música, cine… Al incombustible Roberto, gracias por enseñarme que hay que entusiasmarse con todo lo que uno emprende, aunque sea un viaje largo, pesado y a veces un tanto atrevido.

Al grupo de jóvenes investigadores de nuestro departamento y de Óptica, que incluye becarios, ex-becarios y algún que otro contratado como técnico. Que agradable es el café o incluso la comida en la cafetería, a pesar de los problemas *logísticos*, gracias a Xumi, Juanma, María, Almu, Carlos, Sara, Alex, Bea, Guillem,

Raúl. Al otro Raúl y Maru en la distancia y a Raquel, espero que nos veamos pronto. También a Laura que seguro que lee esto. Gracias por vuestras tertulias, adivinanzas y cotilleos.

Gracias también a otras personas de nuestro departamento, especialmente a María Jesús, tú has sabido buscar la felicidad, un besito muy fuerte a tus nenes y a Sole, hay que aprender mucho de tu *talante*. Para Amparo por hacer de secretaría un sitio agradable y a Vicente Marín, por estar siempre dispuesto a lidiar con la plataforma o con lo que haga falta.

En este momento tan especial para mí no quisiera olvidar a mis viejos amigos. Me acuerdo especialmente de Gustavo, gracias por estar siempre ahí, tan cerca en la distancia, me gustaría no defraudarte pero no sé si lo conseguiré. A Cristina, siempre entendiéndonos aunque cada vez hablemos menos, a ver si regresas y retomamos el contacto. A Jorge, cuanto me alegro que las cosas te vayan por fin como tú te mereces. Y a mis amigas de toda la vida, María José, siempre diciéndonos que tenemos que vernos. También a Yolanda y Juana Mari, siempre hay huecos para vosotras, aunque parezca imposible.

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de mis padres y de Juan Antonio, pero además muchas otras cosas en mi vida tampoco tendrían sentido sin ellos. Gracias papás por escucharme siempre, aunque ya de antemano sepáis lo que me pasa. Papá, no tengas prisa por jubilarte, yo os necesito aquí en Valencia. Juan Antonio, que te voy a decir, si hemos sido capaces de superar todos los sinsabores de este año creo que nos haremos viejecitos juntos. Mucha suerte en tu promoción, aunque sé que no la necesitas. Ánimo, mi amor.

Por último a mi familia, tan lejos y tan cerca a la vez. A mi única sobrina Carolina, para que siempre conserve ese espíritu de niña.

Índice

Introducción.....1

Capítulo 1. Fundamentos.....5

1.1.- Radiación solar ultravioleta 6
1.2.- Atenuantes de la radiación solar ultravioleta 6
1.3.- Efectos sobre los seres vivos 10
1.4.- Radiación eritemática 12
1.5.- Índice UV 14

Capítulo 2. Instrumentación..... 17

2.1.- Tipos de instrumentación para la medida de UVB y UVER 18
2.2.- Radiómetro UVB-1 de YES 19
2.3.- Espectrorradiómetros y fotómetros 27

Capítulo 3. Modelos de transferencia radiativa.....31

3.1.- Tipos de modelos de transferencia radiativa 32
3.2.- Un modelo de dispersión múltiple: SBDART 34
3.3.- Otros modelos de transferencia radiativa 39

Capítulo 4. Redes de medida de UVB y UVER.....43

4.1.- Redes de medida 44
4.2.- Red de medida de UVB y UVER en la C. Valenciana 48

Capítulo 5. Medidas y predicción del Índice UV.....55

5.1.- Resultados experimentales de la red nacional del INM 56
5.2.- Resultados experimentales de la red de la C. Valenciana 64
5.3.- Predicción del Índice UV 76
5.4.- Comparación de las medidas con la predicción 78
5.5.- Comparación entre las redes de Cataluña y la C. Valenciana 87

Capítulo 6. Medida de la UVER difusa.....99

6.1.- Dispositivo experimental de la UVER difusa 100
6.2.- La corrección de la banda de sombra 105
6.3.- Validación de los modelos de corrección de la banda 116
6.4.- Valores medios de la irradiancia eritemática difusa 134
6.5.- El Índice UV para radiación difusa 137

Capítulo 7. UVER en planos inclinados.....143

7.1.- Dispositivo experimental de la UVER en planos inclinados 144
7.2.- Resultados experimentales en planos inclinados 145

Conclusiones..... 159

Anexo A..... 165

Anexo B.....173

Referencias..... 183

Introducción

Desde el descubrimiento del agujero en la capa ozono sobre la región antártica, a principios de la década de los ochenta, la comunidad científica tomó conciencia del peligro que representa la reducción de los niveles de ozono, al debilitar la protección natural que nos brinda su presencia en la atmósfera, atenuando la radiación ultravioleta (UV) emitida por el Sol. En consecuencia, durante los dos últimos decenios se ha intensificado el estudio de la irradiancia solar en ese rango aunque las primeras investigaciones datan de principios del siglo XX. En consonancia con este auge se han establecido algunos acuerdos con el fin de preservar el ozono estratosférico. En 1985 tuvo lugar la Convención de Viena donde veintidós países firmaron el convenio para la protección de la capa de ozono y dos años más tarde el Protocolo de Montreal donde se estableció cómo erradicar las sustancias que provocan la disminución de la misma.

El rango espectral que nos ocupa presenta especial relevancia por los efectos biológicos que desencadena. Actualmente los científicos coinciden en afirmar que un nivel bajo de radiación ultravioleta aporta algunos efectos beneficiosos. Sin embargo existen evidencias innegables de efectos adversos que justifican la necesidad de establecer unas dosis límites de exposición solar. Uno de los efectos negativos más frecuentes en humanos es el cáncer de piel. A partir de los años setenta se han incrementado significativamente el número de afectados por este tipo de cáncer, especialmente en poblaciones de piel clara. Estudios epidemiológicos muestran que está estrechamente vinculado con ciertos hábitos sociales que promueven el bronceado como una imagen más saludable y atractiva a diferencia de lo socialmente establecido hace un siglo. Entonces se identificaba la piel blanca con personas de alto poder adquisitivo y que no tenían la necesidad de trabajar al aire libre.

Con el propósito de estandarizar la repercusión de la irradiancia solar ultravioleta sobre el ser humano se ha definido el espectro de acción eritemático y el Índice Ultravioleta (UVI). El primer parámetro permite ponderar la irradiancia solar con la respuesta de la piel humana a la quemadura solar. El segundo es un parámetro creado con una finalidad divulgativa y de prevención que da cuenta de la

irradiancia eritemática de un modo sencillo. Asimismo se ha constatado la necesidad de informar y concienciar a la opinión pública, mediante campañas de divulgación, de los riesgos que conlleva una exposición solar excesiva y de la necesidad de aplicar medidas de fotoprotección. Algunos organismos internacionales se encargan de esta tarea a nivel mundial coordinados por la Organización Mundial de la Salud (WHO).

El desarrollo actual de la instrumentación ha permitido la existencia de radiómetros de banda ancha que miden en el rango de la UVB o de la irradiancia eritemáticamente activa (UVER). Estos sensores, dado su bajo coste relativo, así como su fácil mantenimiento, permiten realizar medidas a la intemperie durante largos periodos de tiempo, lo que ha hecho posible la instalación de redes de medida de estas magnitudes. La disponibilidad de medidas próximas espacialmente resulta ser el modo más realista de establecer una climatología de radiación UVB y de validar tanto medidas de satélite como modelos de predicción del Índice UV.

En este sentido en el año 2002 empezó a estar operativa una red de medida en la Comunidad Valenciana, dependiente de la Conselleria de Territori i Habitatge y diseñada por el Grupo de Investigación de Radiación Solar registrando datos de UVER y calculando el Índice UV experimental. Esta red realiza la predicción del Índice UV a 24 horas, mediante simulación con un modelo de transferencia radiativa. Esta información se ofrece al público en la página web diseñada para tal fin.

Todos los estudios anteriores se centran en la irradiancia global en un plano horizontal. Sin embargo, la UVB y UVER en planos inclinados y a distintas orientaciones permiten hacer un análisis más realista de la incidencia sobre el hombre dada su verticalidad. Asimismo la componente difusa es determinante por su elevada contribución en ese rango espectral. Conscientes de la necesidad de mejorar y ampliar conocimientos en este campo, se ha puesto en marcha una estación capaz de medir UVER difusa, e inclinada en las cuatro orientaciones, en la terraza de la Facultat de Física de la Universitat de València. Los datos registrados en ella nos permitirán obtener una predicción del Índice UV en planos inclinados, así como de la componente difusa y directa de la radiación.

El objetivo general de este trabajo es la caracterización de la irradiancia UVER en el ámbito geográfico de la Comunidad Valenciana. Para llevarlo a cabo se han establecido algunos objetivos parciales como son en primer lugar el diseño, puesta a punto y análisis de los datos de la red de medida de UVB en la Comunidad Valenciana, lo que ha permitido caracterizar la irradiancia UVER y predecir el Índice UV en cinco ubicaciones del territorio de la Comunidad. Además estos

resultados han sido comparados con los obtenidos en otras redes similares de ámbito nacional o autonómico en regiones mediterráneas. Como un paso adelante en dicha caracterización se ha optado por la mejora en la descripción direccional de la radiación ultravioleta mediante el diseño de sistemas experimentales que permiten la medida de la componente difusa y en planos inclinados de la UVER y a diferentes orientaciones. Para ello se ha diseñado una banda de sombra, se han estudiado sus posibles correcciones y se han empleado modelos de transferencia radiativa para validar los resultados tanto de los valores obtenidos para la componente difusa de la UVER como para la recibida sobre planos inclinados.

Con todo lo anterior, los contenidos de esta memoria son los siguientes:

En el primer capítulo se revisan los conceptos básicos de la radiación solar ultravioleta. En ese sentido se definen las magnitudes básicas como son el Índice UV y la irradiancia eritemáticamente activa, que resultan ser las más utilizadas en este trabajo. También se analizan los efectos biológicos que produce la radiación UV así como los factores que la atenúan. Además se incluyen algunas recomendaciones de fotoprotección propuestas por la Organización Mundial de la Salud.

Posteriormente se describen los instrumentos más usuales para la obtención de estas magnitudes centrándonos principalmente en los radiómetros de banda ancha, que son los adecuados para redes de medida y los más utilizados en esta memoria. No obstante se analizan brevemente otros instrumentos, dos espectrorradiómetros y un fotómetro, cuyos resultados experimentales sirven para algunos análisis complementarios.

Seguidamente se describen otros medios para hallar la irradiancia eritemática o el Índice UV. Se trata de los modelos de transferencia radiativa que permiten, dados unos parámetros de entrada determinados, simular la irradiancia que llega a la superficie terrestre. Su complejidad depende del modo de considerar la estructura de la atmósfera. En esta memoria se han implementado para simular el Índice UV y la UVER difusa.

A continuación, en el Capítulo 4, se describen las redes de medida de la UVB y UVER, detallando especialmente la de la Comunidad Valenciana, así como la página web donde se presenta la predicción del Índice UV junto a otras informaciones de carácter divulgativo.

En el Capítulo 5 se presentan aquellos resultados que conciernen a la red de medida de la Comunidad Valenciana en los años posteriores a su instalación en el

año 2002. Se trata de evaluar la UVER, así como el Índice UV y su predicción. Este apartado tiene un precedente en el análisis realizado con los datos de la red nacional durante los años 2000 y 2001. Por último se comparan los resultados obtenidos con los de la red de Cataluña.

En el Capítulo 6 se incluye la componente difusa de la UVER. Una parte muy importante de este apartado corresponde a la corrección de la banda de sombra mediante la aplicación de varios modelos existentes en la literatura adaptados al rango de la UVER. A continuación se validan estos resultados por distintos métodos: intercomparación con un espectrorradiómetro y simulaciones mediante modelos de transferencia radiativa. Por último se analiza el Índice UV para radiación difusa así como el porcentaje que representa la componente de la UVER difusa frente a la global.

En el último capítulo se presentan los resultados de las medidas de la UVER e Índice UV en los distintos planos inclinados destacando las discrepancias en la dosis eritemática recibida según la orientación del mismo.

Por último y tras mostrar las conclusiones más relevantes de este trabajo se incluyen dos anexos. En el primero de ellos se relatan brevemente los antecedentes históricos del espectro de acción eritemático. También se enumeran algunos enlaces a las páginas web más relevantes donde se trata el Índice UV o se realiza su predicción. En el Anexo B se detallan las tablas con las constantes del último calibrado de todos los sensores de banda ancha utilizados en la memoria.

Capítulo 1

Fundamentos

En este primer capítulo se revisan algunos conceptos básicos sobre la radiación solar ultravioleta que alcanza la superficie terrestre y afecta a los seres vivos. Se definen los factores que la atenúan, principalmente la absorción por ozono. También se analizan la altura solar, la altura sobre el nivel del mar, la capa nubosa y la reflectividad del suelo. El estudio de la radiación ultravioleta es de gran interés por los efectos biológicos que produce. En el hombre afecta principalmente a la piel y a los ojos, pero también al sistema inmunodepresivo. El eritema es el efecto más común e inmediato, por lo que este trabajo se centrará en el análisis de la radiación eritemática, que es la radiación ultravioleta que llega a nivel del suelo ponderada por la respuesta eritemática de la piel. Por último el Índice UV surge como un parámetro sencillo cuya finalidad es informar y concienciar a la opinión pública del nivel de radiación solar ultravioleta eritemática incidente y de sus posibles efectos nocivos sobre la salud.

1.1.- Radiación solar ultravioleta

La radiación ultravioleta, en adelante radiación UV, es parte del espectro electromagnético, en concreto el rango comprendido entre 100 y 400 nm. Dados los efectos biológicos que origina, la radiación ultravioleta se suele dividir en tres bandas: UVC (100-280 nm), UVB (280-315 nm) y UVA (315-400 nm) (CIE, 1999).

La radiación solar ultravioleta que alcanza el techo de la atmósfera es aproximadamente un 8% de la constante solar, es decir, de la irradiancia solar que llega en todo el espectro de emisión. Sin embargo, tras su paso por la atmósfera, y los procesos de atenuación que sufre dicha irradiancia, el porcentaje de radiación ultravioleta procedente del Sol que alcanza la superficie es de tan sólo el 5%. A pesar de esta pequeña proporción, su estudio es de gran interés dado que produce efectos importantes sobre los seres vivos.

La atmósfera absorbe todo el rango de UVC y aproximadamente el 90% del UVB. De otro modo sería imposible la vida en la Tierra debido a sus efectos ionizantes. La atmósfera absorbe la radiación UVA en menor medida, y, en consecuencia, la radiación UV que alcanza la superficie terrestre se compone en su mayor parte de radiación UVA, con una pequeña parte de UVB.

1.2.- Atenuantes de la radiación solar ultravioleta

La atmósfera terrestre es una capa de distintos gases, principalmente nitrógeno, oxígeno y argón, que envuelve la Tierra y que se extiende varios cientos de kilómetros de altura, aunque el 90% de la masa se acumula en los primeros 10 km. Esta envoltura gaseosa atenúa la radiación solar incidente mediante procesos de absorción y dispersión. La absorción es un proceso de origen cuántico, y por lo tanto selectivo, es decir, sólo se produce en longitudes de onda discretas cuya energía corresponde a la necesaria para provocar transiciones de un nivel energético a otro. Cuando la absorción se produce en varias longitudes de onda muy próximas, se generan bandas de absorción. Los principales absorbentes en el rango UV son el ozono (O_3), el oxígeno (O_2) y el nitrógeno (N_2) molecular. En la Tabla 1.1 se detallan estas bandas, así como su rango espectral. El oxígeno y nitrógeno monoatómico (O y N respectivamente) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) son otros absorbentes menos importantes.

Tabla 1.1- Bandas de absorción más importantes en el UV.

Gas	Banda de absorción	Rango
O_3	Hartley	200-320 nm
O_3	Huggins	300-360 nm
O_2	Schummann-Runge	125-200 nm
O_2	Herzberg	200-260 nm
N_2	Lyman-Birge-Hopfield	100-145 nm

El proceso más importante que sufre la radiación solar UV en la atmósfera terrestre es la absorción por las moléculas de ozono. La banda de Hartley es la más absorbente y elimina toda la UVC. Su efecto se superpone a la banda de Herzberg del oxígeno molecular. A pesar de que el ozono se encuentra a distintos niveles de altura en la atmósfera, la mayor concentración se da en la estratosfera, entre los 15 y 35 km. Allí se acumula en una capa de espesor variable. Si precipitásemos, en condiciones normales, esa capa a nivel del suelo tendría unos pocos milímetros de espesor. Es la conocida popularmente como "capa de ozono". Se suele medir en atm·cm o DU (Unidades Dobson). Una unidad Dobson se define como 0.01 mm de espesor en condiciones normales[1] en una columna de base unidad. El valor promedio de ozono en la atmósfera es de 300 DU. Se suelen obviar los niveles de concentración que se dan en la troposfera, capa más próxima al suelo, ya que a pesar de que el ozono troposférico es un contaminante secundario importante, su cantidad frente al ozono estratosférico es prácticamente despreciable (menos de 10%).

El ozono se va formando mediante la reacción de una molécula de oxígeno con un átomo de oxígeno liberado en presencia de radiación UV y se va destruyendo por fotodisociación por absorción en las bandas de Hartley, Huggins y Chappuis (longitud de onda del visible). Estas reacciones fueron estudiadas por Chapman en 1930. Sin embargo este estudio es incompleto, ya que hay otros mecanismos que

[1] p=1atm y T=0ºC.

aceleran la destrucción del ozono. El óxido nítrico (NO) o la clorina (Cl) (creados por disociación de clorofluorcarbonos (CFC)), reaccionan eliminando moléculas de ozono (Lenoble, 1993). Estos procesos son los que han dado lugar a la disminución de ese componente, conocida como el agujero de ozono.

La radiación solar también sufre otro proceso de atenuación a su paso a través de la atmósfera, la dispersión. Este proceso, de naturaleza electromagnética, es continuo y presenta una fuerte dependencia en función del valor de la longitud de onda y del tamaño de la partícula en la que incide la radiación. En el caso de que el tamaño de las partículas sea mucho más pequeño que la longitud de onda incidente se denomina dispersión de Rayleigh mientras que en el caso en que el tamaño de las partículas sea comparable o mayor que la longitud de onda, se llama dispersión de Mie. La radiación solar dispersa también recibe el nombre de difusa. La radiación solar total o global es la suma de la que proviene directamente del Sol y la radiación difusa. La dispersión de Rayleigh presenta una fuerte dependencia con la longitud de onda, del orden de λ^{-4}, y por tanto en el rango de la radiación UV es muy importante, hasta tal punto que la radiación UV difusa en días despejados puede ser del orden del 50% de la radiación UV global.

Existen otros factores que influyen en la intensidad de la radiación UV que incide finalmente a nivel de suelo, como la latitud, la nubosidad, la altitud, la altura solar y la reflectividad del suelo. La posición geográfica del lugar considerado es determinante, ya que los rayos solares inciden de forma más perpendicular cuanto más cerca del Ecuador nos encontremos. Asimismo es importante la posición del Sol, variando según el día del año y la hora. Se recibe un porcentaje mucho mayor de irradiancia solar en verano y en horas centrales del día. Todos estos factores geográficos se incluyen en la altura solar, o ángulo que forma el suelo con la radiación incidente (o su complementario, el ángulo cenital solar).

La altura también influye en la cantidad de irradiancia que llega al suelo. Obviamente, a mayor altura sobre el nivel del mar, la irradiancia tiene que recorrer un espesor de atmósfera menor y por tanto se encuentra con menos elementos absorbentes y dispersores. Algunas medidas muestran un incremento que alcanza el 6-8% por kilómetro de elevación (Vanicek *et al*., 2000). Otros autores sugieren valores más altos (Blumthaler *et al.*, 1997; McKenzie *et al.*, 2001), e incluso una dependencia con la turbiedad y el ángulo cenital (Lorente *et al.*, 2004). La nubosidad disminuye la intensidad de la radiación UV, especialmente en el caso de nubes medias o bajas mientras que las nubes altas apenas atenúan dicha radiación. Sin embargo, la dispersión producida en las nubes puede producir el mismo efecto que la reflectividad en la superficie y por tanto aumentar la intensidad de la radiación UV (Sabburg y Wong, 2000).

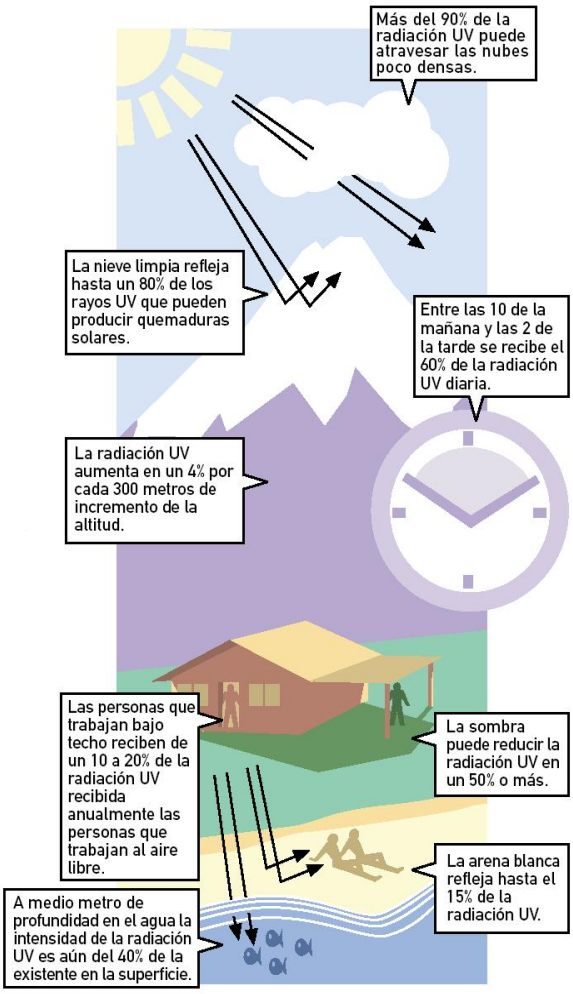


Figura 1.1- Algunos factores que atenúan la radiación UV (WHO, 2003).

La reflectividad de la superficie puede hacer que aumente la radiación UV y es un factor importante a tener en cuenta en casos como la nieve o la arena dado su elevado albedo.

En la Figura 1.1 se muestran algunos de los factores descritos. Esta Figura está incluida en la Guía "Índice UV" que publicó la Organización Mundial de la Salud (WHO), en colaboración con la Organización Meteorológica Mundial (WMO), el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) para ser usada por las autoridades, medios de comunicación y centros de meteorología encargados de difundir e informar sobre la radiación UV.

1.3.- Efectos sobre los seres vivos

El efecto biológico de la radiación UV es muy importante debido a que la energía de los fotones emitidos en ese rango es mayor que la energía de los fotones de la parte visible del espectro. Esos fotones tienen suficiente energía para producir alteraciones fotoquímicas que desembocan en efectos biológicos muy diversos.

Los efectos de la radiación ultravioleta sobre los seres vivos han merecido una atención considerable en los últimos veinte años (Frederick y Lubin, 1988; Scotto *et al.*, 1988), desarrollándose guías y recomendaciones sobre los umbrales de exposición a la radiación UV para evitar daños puntuales o crónicos (WHO, 2003; ICNIRP, 2004). Entre sus acciones fotobiológicas más importantes se encuentran la bactericida, la eritemática y la hemolítica, así como la coagulación de la albúmina y la destrucción del ADN. Este conjunto de efectos hace que la radiación UV, y particularmente la UVB, tenga una gran influencia en el desarrollo de los ecosistemas terrestres y marinos, siendo en muchos casos un indicador del desarrollo de los mismos (Tevini, 1994).

Sobre los seres humanos los efectos de la radiación UV se manifiestan principalmente sobre la piel (Diffey, 1982) y sobre los ojos (Zigman, 1977; Rosenthal *et al*., 1985). También el ADN se ve afectado, habiéndose especificado la acción de la radiación ultravioleta a nivel de las bases pirimídicas de la doble hélice del ADN, produciendo efectos que son oncogénicos y específicos en fotocarcinogénesis.

El efecto inmediato debido a una exposición intensa y puntual a la radiación UV se traduce generalmente en una quemadura severa. Se trata del efecto directo más común y se produce por una dilatación de los vasos sanguíneos más superficiales. Origina acaloramiento, eritema y otras molestias entre las 16 y 24 horas después de la exposición a la luz (Diffey, 1982; Berger y Urbach, 1982). A su vez el exceso de exposición crónica a la radiación UV produce fotoenvejecimiento de la piel y una predisposición al desarrollo de condiciones cutáneas

precancerígenas que han sido bien establecidas (Diffey, 1987; Scotto y Fears, 1987; Kelfkens *et al.*, 1990; Madronich y de Grujil, 1993). Existen tres tipos de carcinomas que vienen caracterizados por diferentes aspectos de la radiación UV: carcinoma escamoso, carcinoma basal y melanoma maligno. Los mayores factores de riesgo en el caso de carcinoma escamoso es el exceso de exposición solar acumulada en toda la vida. En cuanto al carcinoma basal, el factor determinante puede ser la exposición excesiva al Sol y además desde la primera infancia. Por último en el caso de melanoma maligno los factores de riesgo mayores son episodios de exposiciones excesivas al Sol que acaban en quemaduras y piel no acostumbrada, como en el caso de piel de tipo caucásico (MacKie, 2000). No obstante, aunque estudios epidemiológicos parecen implicar a la radiación ultravioleta en la patogenia de este tumor, hechos como la existencia del melanoma en mucosas, hacen que esta influencia sea discutible. Por su parte los efectos oculares más comunes son la fotoqueratoconjuntivitis, conocida como resplandor del soldador, las cataratas y fotoretinitis (ICNIRP, 2004).

Existen indicadores concluyentes de que estos efectos nocivos de la radiación solar UV se han incrementado de forma considerable en los últimos decenios. Desde 1981 la tasa de crecimiento anual del melanoma maligno ha sido cuantificada en un 3% (ACS, 2005). Por su parte, la Organización Mundial de la Salud ha estimado que cada año se desarrollan entre dos y tres millones de casos de cáncer de piel no melánico y unos 132.000 casos de melanomas malignos. Además, a escala mundial, entre 12 y 15 millones de personas padecen ceguera originada por cataratas. Hasta el 20% de las cataratas desarrolladas anualmente pueden serlo por exposición a la radiación ultravioleta, especialmente en los países del llamado "cinturón de cataratas", la zona de mayor incidencia, cercana al ecuador (WHO, 2003). En la actualidad parece existir consenso entre los epidemiólogos en que la causa de este crecimiento en los efectos nocivos asociados a los rayos del Sol no radica tanto en la disminución de la capa de ozono, como en los hábitos de la población que han cambiado, y ello desde la infancia. Las vacaciones generalizadas y la mejora de la calidad de vida, junto con el mito del bronceado estético y saludable, han hecho que se incremente la exposición al Sol, y en condiciones más agresivas.

Por el contrario, los efectos beneficiosos de la exposición humana a la radiación ultravioleta son pocos. El mejor beneficio de la UVB es la síntesis en la piel de la vitamina D obtenida como pro-vitamina D a través de la dieta (Webb y Holick, 1988). Por eso, una exposición en la cara, brazos y manos a una radiación típica como la que se recibe en el Norte de Europa durante 10-15 minutos es imprescindible para mantener la síntesis de la vitamina D y prevenir la eliminación de la previamente acumulada (MacKie, 2000). Otros efectos beneficiosos de la

radiación ultravioleta son terapéuticos. Al margen de su interés para tratar enfermedades tales como psoriasis recalcitrante, eczemas rebeldes y otras, también es posible que la radiación ultravioleta produzca beneficios psicológicos. El problema del desorden afectivo estacional, (Seasonal Affective Disorder, SAD), que aumenta el riesgo de depresión durante los meses de invierno en el Norte de Europa está principalmente asociado a una falta de luz visible, pero además el espectro de acción para el SAD, también comprende las longitudes de onda de la radiación UVA (MacKie, 2000).

1.4.- Radiación eritemática

Para cuantificar los efectos biológicos de la radiación ultravioleta es necesario conocer la respuesta de los organismos vivos cuando incide sobre ellos esta radiación. La curva que representa esta respuesta se llama espectro de acción.

De todos los efectos que desencadena la radiación UV en los seres humanos, el más común es el eritema o quemadura solar. La respuesta de la piel a esta agresión es el espectro de acción eritemático. La CIE (Comission Internationale de l'Eclarage) adoptó en 1987 una "Curva Estándar de Eritema" (McKinlay y Diffey, 1987; CIE, 1998), Figura 1.2. El espectro de acción muestra un descenso brusco a partir de los 300 nm siendo la efectividad eritemática relativa del orden de 3 órdenes de magnitud menor para longitudes de onda por encima de 300 nm. Teniendo en cuenta el rango espectral que estamos considerando, se justifica la afirmación de que es necesaria una dosis unas 1000 veces mayor de UVA para que cause los mismos efectos sobre la piel que la radiación UVB.

Esta curva es la recomendada actualmente para la determinación de la radiación UV eritemáticamente activa o biológicamente efectiva (UVER). Esta radiación UVER se calcula multiplicando la curva espectral de la radiación solar incidente a nivel de suelo, I_λ, por la curva del espectro de acción propuesta por la CIE, $EE(\lambda)$, según la ecuación 1.1. La UVER es más significativa entre los 300 y 325 nm, es decir, fundamentalmente en el rango de la UVB, lo que indica que en cuanto a efectos biológicos la radiación UVA es mucho menos relevante que la UVB. Para evaluar los efectos sobre los seres humanos a partir de ahora tendremos en cuenta la radiación UV eritemáticamente activa por su interés desde el punto de vista biológico, a pesar de constituir tan sólo el 0.02% de la irradiancia global (Cañada *et al.*, 2006).

$$I_{UVER} = \int_{280}^{400} I_{\lambda} \cdot EE(\lambda) \cdot d\lambda. \qquad (1.1)$$

En el Anexo A de esta memoria se encuentran más detalles de la historia de la curva del espectro de acción eritemático, desde las primeras propuestas hasta su estandarización.

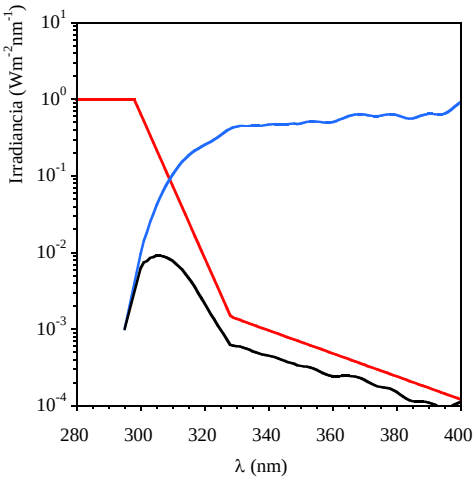


Figura 1.2.- Curva de irradiancia solar espectral a nivel de suelo (—), espectro de acción eritemático (—) y producto de ambas curvas, UVER, (—).

El estudio de la influencia eritemática se realiza a partir de la dosis mínima de UVER que produce un enrojecimiento perceptible en una piel humana no expuesta previamente a la radiación solar. Esta dosis se conoce internacionalmente como dosis eritemática mínima (MED) (Diffey, 1990; Grainger *et al.*, 1993), y siempre está referida a un determinado tipo de piel (fototipo).

Los fototipos cutáneos se establecen en función de la cantidad de melanina presente y, consecuentemente, de la capacidad natural para evitar el eritema. Se considera que los fototipos I y II corresponden a individuos deficientes en melanina y el III y IV con melanina suficiente. Algunas clasificaciones de fototipos incluyen los fototipos V y VI, de piel morena y negra natural respectivamente, que tienen protección melánica (Fitzpatrick, 1988). Actualmente, la mayoría de los países

europeos han adoptado, a partir de las recomendaciones de la COST 713 (Vanicek *et al*., 2000), cuatro tipos para la piel humana en función de su capacidad para broncearse. Las principales características de estos tipos, definidos por la norma DIN 5050, se muestran en la Tabla 1.2, en la que también se indica la dosis (en J/m^2) necesaria para producir una MED. Dado que la MED depende de cada individuo, se define también la dosis eritemática estándar (SED), para evaluar los efectos de la radiación UV en la piel de forma objetiva, siendo 1 SED = 100 J/m^2 (CIE, 1998).

Tabla 1.2.- Valores de la dosis eritemática mínima (MED) para los tipos de piel humana definidos por la COST 713.

Fototipo	Se quema tras la exposición al Sol	Se broncea tras la exposición al Sol	MED
Tipo I	Siempre	Raramente	200 J/m^2
Tipo II	Habitualmente	Algunas veces	250 J/m^2
Tipo III	Algunas veces	Habitualmente	350 J/m^2
Tipo IV	Raramente	Siempre	450 J/m^2

1.5.- Índice UV

El Índice UV (UVI) es una medida que tiene como finalidad informar y concienciar a la opinión pública, mediante su divulgación en medios de comunicación, del nivel de radiación solar ultravioleta eritemática incidente y de los posibles efectos nocivos para la salud.

Cuantitativamente, el Índice UV se obtiene multiplicando el valor de la UVER (expresado en $W \cdot m^{-2}$) por 40, y debe redondearse este valor al entero más próximo, lo que proporciona un valor numérico comprendido entre 0 y 16, tal y como se muestra en la ecuación 1.2:

$$UVI = 40 \cdot \int_{280}^{400} I_\lambda \cdot EE(\lambda) \cdot d\lambda. \qquad (1.2)$$

Dependiendo del tipo de piel, es habitual considerar que para valores superiores a 6 existe riesgo alto de eritema, y para valores superiores a 11 riesgo

extremo. La Organización Mundial de la Salud, en su Guía "Índice UV" (WHO, 2003), propone las distintas categorías de la exposición a la radiación UV en función del valor del Índice UV tal y como se detalla en la Figura 1.3, y que supone una estandarización del mismo. Sin embargo, durante los dos decenios anteriores no existía ese consenso. A mediados de los años 80, y debido a la sensibilización social originada por el descubrimiento del agujero de la capa de ozono en el Hemisferio Sur (Farman *et al.*, 1985), surgió en determinados sectores de investigadores de la atmósfera y de profesionales de las ciencias de la salud, la necesidad de introducir índices para la predicción de las dosis de radiación ultravioleta incidente a nivel del suelo. Inicialmente se utilizó en programas de información pública en diferentes países de forma no estandarizada. Las primeras predicciones se iniciaron en los años 80, en Australia (Roy *et al*., 1995) y Nueva Zelanda (McKenzie, 1998), basándose, respectivamente, en valores de MED y de tiempo de exposición para provocar quemaduras. Canadá fue el primer país que, en 1992, introdujo de forma sistemática la predicción de valores del UVI a través del Servicio Canadiense de Medio Ambiente (Burrows *et al.*, 1994). En el Anexo A de la presente memoria se detallan algunas direcciones web donde se proporciona información sobre el Índice UV actualmente.

CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN	INTERVALO DE VALORES DEL UVI
BAJA	< 2
MODERADA	3 A 5
ALTA	6 A 7
MUY ALTA	8 A 10
EXTREMADAMENTE ALTA	11+

Figura 1.3.- Categorías de exposición en función del Índice UV (WHO, 2003).

En 1995 se alcanzó un acuerdo que recomendaba definir un Índice UV solar global (ICNIRP, 1995). De acuerdo con estas directrices la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1998) recomienda que el UVI debe ser referido como "Índice UV", y nombres como el "Índice UVB", el "Índice UV solar", el "Índice de bronceado" y otros no son recomendados. El Índice UV está definido como un parámetro físico promediado biológicamente, por lo que representa una unidad de medida y no sólo el valor máximo diario. Esta redefinición del UVI permite la posibilidad de predecir o tomar valores continuos a lo largo del día. El Índice UV está definido en referencia a una superficie horizontal. Hay que tener en

cuenta que para dicha superficie la cantidad de radiación UV podría ser menor que la que obtendríamos para otras superficies orientadas al Sol. En ese caso habría que considerar que el riesgo de daños por la radiación UV sería mayor (McKenzie *et al.*, 1997). Un pronóstico del Índice UV debería al menos presentar el valor máximo diario aunque esto no ocurriera al mediodía solar.

La estandarización del UVI incluye recomendaciones de fotoprotección e incluso un código de colores según el valor del Índice UV. Con la finalidad de hacer extensivas estas recomendaciones, los pictogramas relativos al UVI se encuentran a disposición pública en Internet: http://www.who.int/uv/. A modo de ejemplo se incluye en la Figura 1.4 el código de colores del Índice UV junto a unas recomendaciones de fotoprotección.

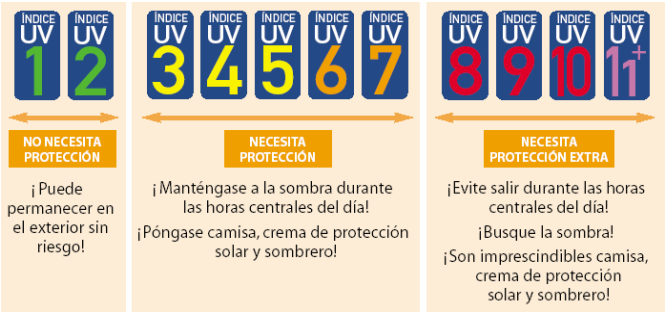


Figura 1.4.- Algunas medidas de fotoprotección recomendadas según el valor del Índice UV.

Capítulo 2

Instrumentación

En este capítulo se describe el tipo de instrumentación utilizada habitualmente para la medida de la irradiancia solar eritemática. A pesar de las dificultades que tiene la medida de esta radiación, dado su orden de magnitud, existen distintos instrumentos cuyas principales diferencias no sólo están en su precisión y su estabilidad, sino también en su coste y tamaño. Obviamente la elección de un instrumento u otro dependerá de la finalidad del estudio. Para las redes de medida de la radiación UVB o UVER se utilizan los radiómetros de banda ancha. Como instrumentos más precisos que sirven para calibrar los radiómetros de banda ancha están los espectrorradiómetros, pero son menos estables y requieren de un mantenimiento más cuidadoso. Por último se describe someramente el fotómetro Cimel, que sirve para fijar determinadas condiciones atmosféricas. En este trabajo ha sido utilizado para determinar la carga de aerosoles atmosféricos.

2.1.- Tipos de instrumentación para la medida de UVB y UVER

La medida de la radiación UVB y UVER a nivel del suelo es una tarea ardua dado que se trata de una magnitud que toma valores muy pequeños, sobre todo si se compara con el valor de la radiación en otros rangos, como el visible. El orden de magnitud hace que los instrumentos deban tener gran precisión, además de tener que amplificar la señal incidente. En estas condiciones la calibración de los instrumentos cobra vital importancia ya que cualquier variación en la toma de la medida puede cambiar significativamente el resultado. Actualmente existen distintos tipos de instrumentos que sirven para medir la radiación UVB y UVER, y podríamos clasificarlos en cuatro categorías básicamente: dosímetros, radiómetros, fotómetros y espectrorradiómetros. Esta clasificación se debe a sus características, completamente diferentes, tanto de coste como de precisión y versatilidad.

Los dosímetros son los más simples y económicos, y como su nombre indica se limitan a medir las dosis eritemáticas acumuladas. El fundamento de estos instrumentos suele ser un elemento químico que cambia sus propiedades, en concreto su absortividad, cuando se expone a la radiación UVB. Se utiliza ampliamente para determinar la dosis que reciben las personas expuestas a dicha radiación. En concreto la película de polisulfuro (PS), se viene utilizando desde 1976 (Davis *et al.*, 1976) y actualmente se realizan estudios relacionados con la dosis recibida por niños (Gies, 1998) o por trabajadores que se exponen todo el día a la luz solar (Gies, 2003). Para determinar la dosis recibida es necesario disponer de medidas simultáneas de UVER para poder relacionar el cambio de absortividad del material del dosímetro con el cambio de la radiación eritemática.

Los radiómetros son probablemente los más extendidos para la determinación de la radiación UVB y UVER. Se trata de instrumentos de banda ancha, tipo Robertson-Berger (RB) (Robertson, 1972; Berger, 1976) cuyo rango espectral coincide con la UVB. Algunos además tienen un filtro cuya respuesta espectral es similar a la del espectro eritemático de la piel humana, Figura 1.2, permitiendo la medida directa de la UVER. En concreto los tres modelos más utilizados, UVB-1 de Yankee Environmental Systems (YES), 501 de Solar Light Company (SLC) y UV-S-E-T de Kipp&Zonen (KZ), presentan una respuesta espectral muy similar a la función de la respuesta eritemática dada por la CIE (Badosa, 2005). Presentan varias ventajas, entre otras que son instrumentos bastante estables con un mantenimiento relativamente sencillo, siendo necesaria su recalibración al menos una vez al año. Mayer y Seckmeyer (1996) han obtenido más de 21.000 espectros medidos entre Abril 1994 y Diciembre de 1995. Su comparación con medidas

procedentes de radiómetros de dos fabricantes diferentes (YES y SLC), muestra una buena relación entre la irradiancia eritemática calculada a partir de medidas espectrales. Trabajos recientes asignan a este tipo de instrumentos una imprecisión entre un 8 y un 10% (Leszczynski *et al*., 1998; Pearson *et al.*, 2000; Bais *et al*., 2001a). Seguidamente se dedica un apartado al radiómetro UVB-1 de YES, por ser el más utilizado en las medidas de esta memoria.

Los fotómetros son instrumentos que miden el flujo solar en estrechas bandas espectrales y que se utilizan principalmente para aplicaciones como, por ejemplo, determinar el contenido de aerosoles, el vapor de agua, el ozono u otros gases, en la columna atmosférica. Disponen de diferentes canales en todo el rango, alguno de ellos en el ultravioleta, aportando información importante en esa banda sobre parámetros de entrada relevantes en modelos de transferencia radiativa, en particular sobre el espesor óptico de aerosoles. Existen distintos tipos de fotómetros, algunos de tipo manual como el Microtops II de SLC y otros de tipo automático como el CE-318 de Cimel Electronique.

Los espectrorradiómetros son instrumentos que miden la irradiancia espectral en un rango amplio y con un paso muy pequeño. Normalmente abarcan el visible, el ultravioleta y el infrarrojo próximo. Estos instrumentos son mucho más delicados, aunque también son más precisos. Suelen ser muy sensibles a los cambios de temperatura si no están aislados térmicamente siendo recomendable una corrección de medidas a posteriori (Gómez *et al.*, 2006). A menudo tardan del orden de varios minutos para hacer un barrido en todo el rango considerado. Entre los espectrorradiómetros más extendidos está el Brewer de KZ, que actualmente está considerado el estándar para la medida de la columna total de ozono. También existen otros equipos portátiles que pueden utilizarse para campañas de medida, como el LI-1800 de LI-COR (LI) y el OL-754 de Optronic (OL). Actualmente está comprobado que las medidas del Índice UV realizadas con espectrorradiómetros tienen una imprecisión del 5% (Bais *et al*., 2001b; Seckmeyer *et al*., 2001).

2.2.- Radiómetro UVB-1 de YES

El radiómetro UVB-1, Figura 2.1, es un instrumento de banda ancha cuyo intervalo espectral abarca el UVB y el UVA (280-400 nm). Estos detectores están diseñados para tener una sensibilidad espectral próxima al espectro de acción eritemático. La técnica de medida empleada consiste en utilizar filtros de vidrio coloreado para no dejar pasar toda la luz visible del sol y hacerla incidir sobre un fósforo sensible a la radiación UVB, que la convierte en luz visible en la longitud de onda del verde (Robertson, 1972; Berger, 1976). La luz resultante es medida por

un fotodetector de estado sólido. El piranómetro UVB-1 está diseñado para ser estable durante largos períodos y para trabajos de campo sin vigilancia.

La radiación solar, directa y difusa, es transmitida a través de la cúpula de cuarzo que permite el paso del rango UV. El primer filtro, un vidrio negro que transmite sólo radiación UV, absorbe la luz visible excepto una pequeña fracción en el rango del rojo. La transmitancia de este filtro permite al instrumento tener una respuesta espectral parecida al espectro de acción de la CIE. La luz transmitida a través del filtro impresiona al fósforo sensible a la radiación UVB. Este material, tungstato de magnesio ($MgWO_4$), absorbe la componente UVB y la reemite por fluorescencia en el rango visible, predominantemente en longitudes de onda correspondientes al verde. A través de un segundo filtro de vidrio se transmite la luz reemitida mientras que se bloquea la luz roja que se había filtrado a través del vidrio negro. La intensidad de la luz saliente es medida por un fotodiodo de estado sólido (GaAsP), cuya respuesta máxima está en el verde y no es sensible a la luz roja. Un esquema detallado de todos estos procesos viene representado en la Figura 2.2.

Todos los componentes ópticos, detector y fósforo están estabilizados a una temperatura de (45 ± 1) ºC siempre que la temperatura ambiente esté comprendida entre los – 40 ºC y los + 40 ºC. Esto permite mantener la eficiencia de los procesos descritos anteriormente independientemente de la temperatura ambiente, como la conversión de radiación UVB en luz verde, por ejemplo. La respuesta coseno según el fabricante es de ± 4% hasta 55º de ángulo cenital solar (Dichter *et al.*, 1993).

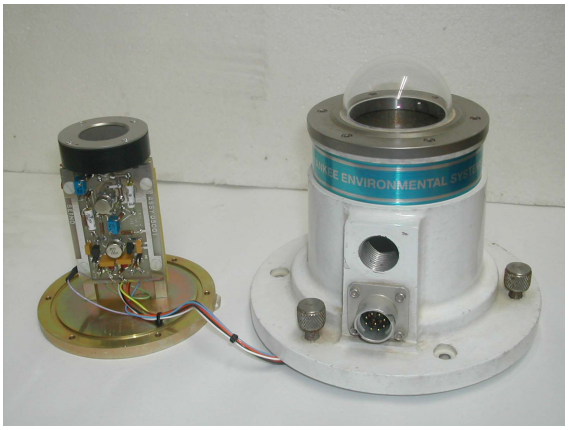


Figura 2.1.- Radiómetro UVB-1: aspecto interior (izquierda) y carcasa exterior (derecha).

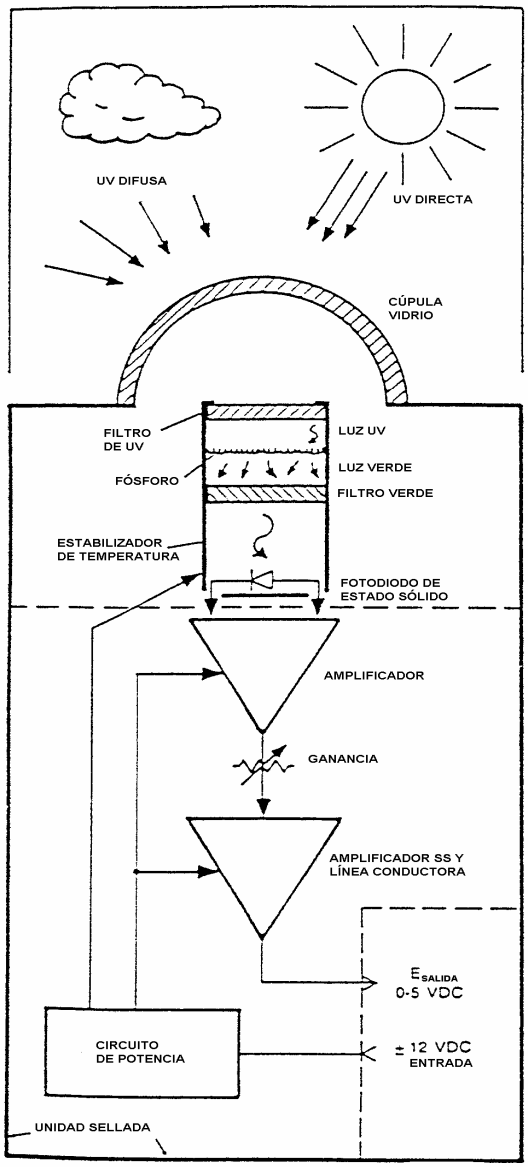


Figura 2.2.- Esquema operativo del UVB-1 de YES.

La salida del instrumento es una señal analógica en voltios y para convertirla en irradiancia hay que aplicar unos factores de conversión. El factor de conversión se define como el cociente entre la energía con una respuesta de coseno y espectral ideal y la energía medida por el sensor. En la práctica, este factor es determinado tomando el cociente entre la irradiancia total UVB y el valor de la señal de salida del instrumento UVB-1 en el tiempo de medida. Dado que la respuesta espectral del instrumento UVB-1 es ligeramente diferente al espectro de acción eritemática y no es uniforme en la región UVB, estos factores de conversión dependen al menos del ángulo cenital solar y del intervalo espectral, aunque otros autores también consideran la dependencia con la columna total de ozono, (Schreder, 2006).

La respuesta espectral del instrumento puede cambiar con el tiempo, variando la transmitancia del primer filtro, por lo que es necesario recalcular los factores de conversión. Esto no es ni más ni menos que una calibración del instrumento y se realiza periódicamente. Si el instrumento forma parte de una red de medida, es aconsejable recalibrarlo juntamente con los demás instrumentos pertenecientes a la red al menos una vez al año.

Figura 2.3.- Intercomparación de UVB-1 de YES.

La calibración se lleva a cabo por dos procedimientos diferentes, comparación con un espectrorradiómetro de alta resolución, y comparación con un radiómetro patrón de sus mismas características. El segundo método, conocido como intercomparación, es el utilizado habitualmente en las redes de medida de UVB (Leszczynski *et al.*, 1998; Bais *et al.*, 2001a; Sánchez *et al.*, 2004). En este caso, los

radiómetros de la red se calibran comparando sus respuestas con las de un radiómetro similar, que recibe el nombre de patrón, y que a su vez ha sido calibrado previamente mediante una lámpara de referencia en laboratorio o con un espectrorradiómetro de precisión. Para el primero de estos procedimientos, en nuestro caso, se emplea el espectrorradiómetro Optronic OL-754. Las principales características de este instrumento se describen en un apartado posterior.

Para la intercomparación, los instrumentos deben situarse sobre una plataforma horizontal, a una altura uniforme sobre el nivel del suelo y separados entre sí para evitar sombras, tal y como se aprecia en la Figura 2.3. Se realizan medidas simultáneas durante dos o tres días, con especificaciones relativas muy concretas, como el tiempo de muestreo o el factor de escala. El radiómetro YES-UVB-1 utilizado como referencia por nuestro grupo, fue sometido a un proceso de calibración estándar del 4 al 23 de Febrero de 2005 en la Estación de Sondeos Atmosféricos "El Arenosillo" perteneciente al INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) que depende del Ministerio de Defensa. Esta calibración implicó actuaciones de laboratorio así como medidas de campo, realizando un análisis de la desviación del espectro de acción eritémico de la CIE, así como una intercomparación con un espectrorradiómetro Brewer, en condiciones meteorológicas de cielo despejado. Al ser una calibración certificada ésta debe cumplir con los requisitos de normalización exigibles en estos casos, como condiciones de temperatura y humedad controladas y sistemas de medida que siguen el estándar establecido por los centros de referencia europeo ECUV (European Reference Centre for Ultraviolet Radiation Measurements) o norteamericano NIST (Nacional Institute of Standard and Technology).

En la calibración estándar, (Schreder, 2006), en primer lugar se mide la respuesta espectral relativa del radiómetro (RSE) para compararla con la respuesta del espectro eritemático de la CIE, de manera que una respuesta ideal sería aquella cuyo cociente entre ambas fuera la unidad. En la Figura 2.4 se ha representado la respuesta espectral relativa del radiómetro YES-UVB-1 y la respuesta espectral eritemática donde se puede apreciar como ambas curvas difieren sustancialmente, lo que justifica su corrección.

La matriz ADA, ecuación 2.1 y Figura 2.5, cuantifica la medida en que la irradiancia pesada por la RSE del instrumento se aparta de la irradiancia eritemática pesada por el espectro de acción eritemático de la CIE en función del ángulo cenital solar y del contenido total de ozono. Para hallar dicha matriz la irradiancia espectral (I) se obtiene por simulación del modelo de transferencia radiativa Tropospheric Ultraviolet and Visible Radiation Model (TUV*)* (Madronich, 1987).

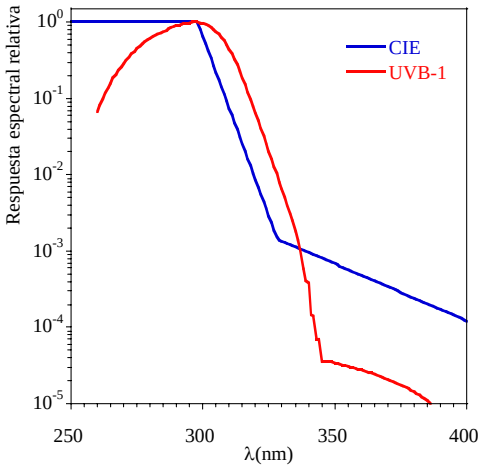


Figura 2.4.- Respuesta Espectral Relativa del radiómetro YES-UVB-1 y Espectro de Acción Eritemático de la CIE.

$$ADA(\theta, O_3) = \frac{\int_\lambda I \cdot CIE \cdot d\lambda}{\int_\lambda I \cdot RSE \cdot d\lambda}. \qquad (2.1)$$

En segundo lugar se realiza una intercomparación de campo entre nuestro radiómetro y un espectrorradiómetro Brewer MKIII#150. Mediante esta intercomparación se observa que la señal del radiómetro es proporcional a la irradiancia integrada del espectrorradiómetro, lo que nos permitirá calcular la irradiancia eritemáticamente activa. El resultado final resultará ser también una matriz (ADACAL) que dependerá del ángulo cenital solar y de la columna total de ozono.

La respuesta angular del Brewer#150 ha sido caracterizada en laboratorio, estimándose que el error coseno de la irradiancia global está comprendido entre 0.977 (SZA = 0º) y 0.935 (SZA ≈ 90º). Así pues, y dada la dificultad de corregir el error coseno en medidas individuales, se ha aplicado un factor de corrección (offset) de 0.023 (≈ 2.3%) a las medidas del Brewer, asumiendo que éste es el menor error experimental posible. Con esto se reduce el error coseno de las medidas hasta un máximo de 4.2%. Esta caracterización del error coseno está incluida en la matriz de

calibración del radiómetro. De este modo, la incertidumbre relativa al error angular en las medidas del radiómetro transformadas en unidades físicas mediante esta matriz (ADACAL) será en todos los casos inferior al 4.5%.

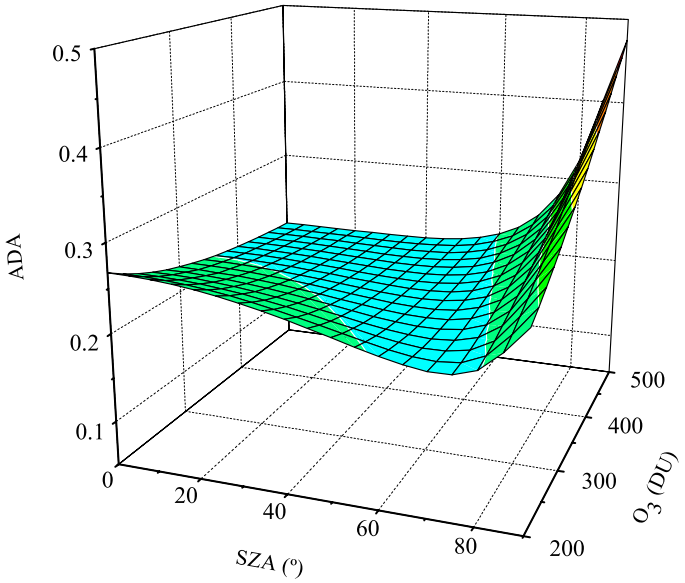


Figura 2.5.- Matriz de sensibilidad del instrumento a las variaciones del ángulo cenital solar y contenido total de ozono (ADA).

La metodología empleada ha sido la siguiente: si se comparan ambos instrumentos, la señal del radiómetro, C_B, debe ser proporcional a la irradiancia integrada del espectrorradiómetro Brewer en el rango considerado pesada por la respuesta espectral del UVB-1, RSE. El factor de proporcionalidad (S_B) no es más que el factor corrector o función de calibración, como se aprecia en la expresión:

$$C_B(SZA) = \frac{1}{S_B} \cdot \int_{\lambda} I \cdot RSE \cdot d\lambda. \qquad (2.2)$$

Para obtener finalmente la UVER corregida basta con multiplicar la señal del radiómetro por la función de calibración obtenida por intercomparación con el

Brewer y por la matriz ADA (θ,O_3) calculada según la ecuación 2.1, que nos da la corrección debida a la discrepancia entre la respuesta espectral concreta de nuestro sensor y la esperada, es decir la del espectro de acción eritemático. Por tanto se trata de aplicar:

$$I_E = S_B \cdot C_B \cdot ADA(\theta, O_3) = S_B \cdot ADACAL(\theta, O_3) \qquad (2.3)$$

El resultado final que resulta ser también una matriz dada la dependencia con el ángulo cenital solar y la columna total de ozono se muestra en la Figura 2.6.

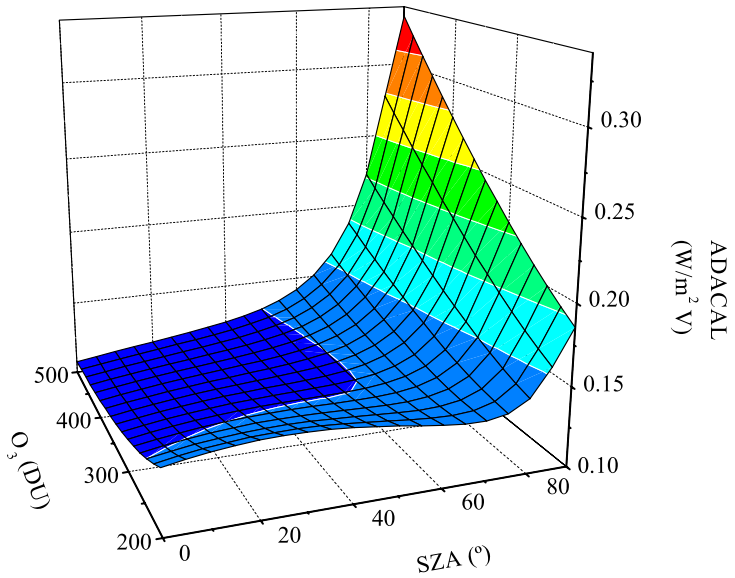


Figura 2.6.- Matriz de calibración (ADACAL) para el radiómetro YES-UVB-1.

2.3.- Espectrorradiómetros y fotómetros

En este apartado se describen brevemente dos espectrorradiómetros portátiles del Grupo de Radiación Solar, el OL-754 de Optronic y el LI-1800 de Licor, así como un fotómetro automático, el CE-318 de Cimel Electronique.

Espectrorradiómetro OL-754 de Optronic

El OL754-O-PMT es un espectrorradiómetro transportable de alta precisión que permite determinar la irradiancia solar espectral directa y global, así como la radiancia de cielo espectral, en el rango 250 - 800 nm, es decir ultravioleta, visible e infrarrojo próximo.

Figura 2.7.- Espectrorradiómetro OL-754 en la configuración para medir irradiancia global horizontal (izquierda) y con el colimador para medir irradiancia directa normal (derecha).

Para la medida en irradiancia global horizontal, en el puerto de entrada del cabezal óptico se acopla una esfera integradora, cuyo objetivo es minimizar el error del coseno, Figura 2.7 izquierda. Para la medida de irradiancia directa normal se acopla un colimador en el puerto de entrada retirando la cúpula de cuarzo, Figura 2.7 derecha. El colimador limita el campo de visión a 5.72º.

Este instrumento consta de un doble monocromador para seleccionar las longitudes de onda y de un fotomultiplicador como elemento sensor. El doble monocromador tiene una resolución de 0.05 nm, lo cual requiere un sensor muy preciso para detectar los pocos fotones en ese rango de longitudes de onda. Según el

fabricante, en conjunto, la exactitud del espectrorradiómetro relativa al estándar NIST es ±1-3%.

Un esquema sencillo del interior del instrumento, de la parte del bloque óptico se detalla en la Figura 2.8, donde se puede distinguir como elementos más destacables el puerto de entrada, la rueda de filtros que selecciona el rango de longitudes de onda apropiados, las redes holográficas del doble monocromador (de 1200 líneas/mm) y por último el fotomultiplicador.

Éste es el instrumento utilizado para la comparación con los UVB-1 de YES tanto en medidas de campo (Tena *et al.*, 2000) como en calibrados. La UVER calculada a partir de medidas espectrales se halla a partir de la ecuación 1.1.

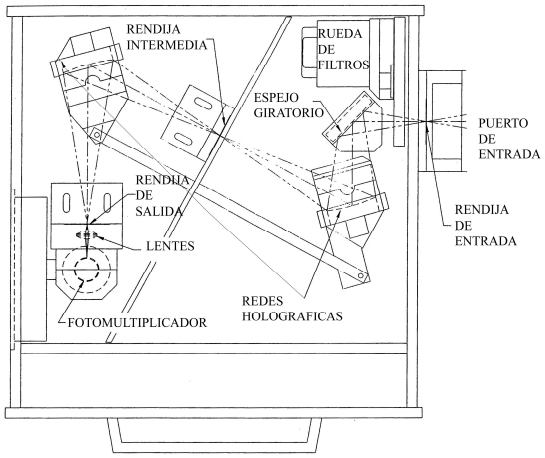


Figura 2.8.- Bloque óptico del espectrorradiómetro OL-714.

Espectrorradiómetro LI-1800 de Licor

El LI-1800 es un espectrorradiómetro portátil que permite la medida de la irradiancia espectral en el rango [300, 1100] nm. La precisión, relativa al estándar NIST, oscila entre 3% y 10% dependiendo de la longitud de onda, siendo más preciso en el rango del visible y menos en el ultravioleta.

En la Figura 2.9 se muestra un diagrama de los elementos que lo constituyen. La irradiancia incidente pasa por un difusor de PTFE[2] cuya función es corregir los efectos de la dirección y posición de la radiación incidente, así como minimizar el efecto coseno. Un espejo manda la radiación a una rueda de filtros que selecciona el rango de interés y por último llega al monocromador simple que está formado por una red holográfica de 600 líneas/mm que discrimina la longitud de onda. Por último el elemento sensor es una fotocélula de silicio.

El espectrorradiómetro está diseñado para medir la irradiancia global horizontal pero es posible medir también la irradiancia directa normal mediante un colimador que se le acopla al puerto de entrada y que limita la irradiancia que llega al difusor en un campo de visión de 4.6º.

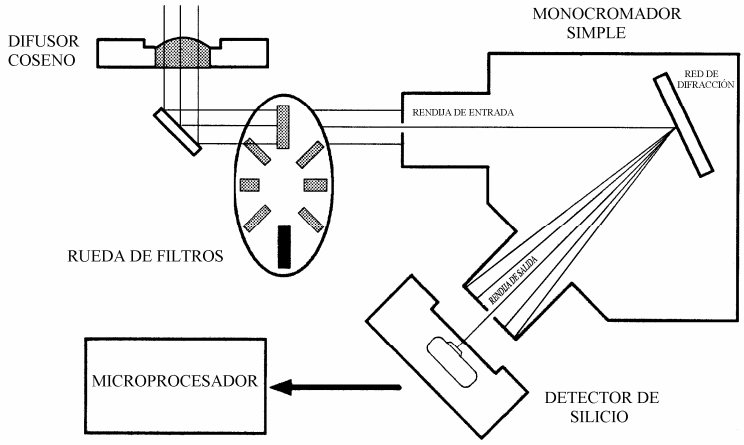


Figura 2.9.- Esquema del espectrorradiómetro LI-1800.

Este instrumento compensa su limitada precisión con respecto a otros espectrorradiómetros de serie alta, como el OL-754 o los Brewer, por su fácil instalación, transporte y sencillez de manejo, así como por su estabilidad, robustez y buen precio.

[2] PTFE: Politetrafluoretileno más conocido como teflón.

Fotómetro CE318 de Cimel Electronique

El equipo CE318 es un fotómetro solar diseñado para la medida autónoma y automática de la radiancia solar directa y de cielo, tanto en el plano almucantar solar como en el principal, cuyo aspecto externo se observa en la Figura 2.10. Sus principales productos son el espesor óptico de aerosoles y el contenido en vapor de agua precipitable, obtenidos ambos a partir de las medidas de irradiancia directa. De forma más elaborada, pueden obtenerse también las distribuciones de tamaño así como otras propiedades de los aerosoles (Estellés, 2006). Este instrumento se compone de un cabezal óptico y de dos colimadores de campo de visión de 1.2º, uno de ellos para apuntar directamente al Sol y el otro para medidas de radiancia de cielo. Dispone de 5 canales (340, 440, 670, 870, 940 y 1020 nm), con un ancho de banda entre 2 y 40 nm según la región del espectro, siendo de 2 nm en el ultravioleta. En este trabajo se incluirá tan sólo para obtener los espesores ópticos de aerosoles como parámetros de entrada en los modelos de transferencia radiativa para simular la radiación UVB o UVER.

Figura 2.10.- Fotómetro CE-318: Cabezal óptico en movimiento (izquierda) y cabezal óptico en reposo y caja electrónica de control (derecha).

Capítulo 3

Modelos de transferencia radiativa

En este capítulo se responde a la pregunta de qué son los modelos de transferencia radiativa atmosféricos y se describen algunos de lo más utilizados en la literatura para el rango de la radiación UVB y eritemática. Con los parámetros de entrada adecuados permiten simular la radiación solar que alcanza la superficie terrestre. El uso de los modelos se justifica por varios motivos: para efectuar un control de calidad de los datos experimentales, para comprender mejor los fenómenos que afectan a la radiación en su paso por la atmósfera e incluso para estimar los valores de la radiación donde no es posible disponer de datos experimentales. Además son imprescindibles para predecir el Índice UV. Los modelos se clasifican en empíricos, de dispersión simple y de dispersión múltiple: difieren entre sí en la estructura de la atmósfera que consideran, los parámetros de entrada que necesitan y el tiempo de cómputo, así como en su validez generalizada o específica de un emplazamiento concreto. En este trabajo se explica con detalle el modelo SBDART, por ser el más utilizado en esta memoria. También se describen brevemente los modelos STAR, LIBRADTRAN, SMARTS y UVA-GOA.

3.1.- Tipos de modelos de transferencia radiativa

Los modelos de transferencia radiativa permiten calcular la irradiancia solar que llega a la superficie terrestre, simulando los procesos que sufre a través de la atmósfera. Tienen gran utilidad práctica en la investigación en física de la atmósfera porque posibilitan la predicción de dicha irradiancia una vez determinados los parámetros de entrada. Asimismo permiten efectuar controles de calidad de las medidas experimentales mediante la comparación de los resultados de los modelos con éstas. Su utilización ayuda a comprender mejor los fenómenos que afectan a dicha radiación en su paso por la atmósfera, permitiendo obtener datos en distintos puntos del planeta, incluso en aquellos donde no se dispone de instrumental adecuado. En el caso de la radiación UVB y la UVER algunos modelos las hallan directamente e incluso determinan el Índice UV. Otros dan como salida la irradiancia espectral y hay que realizar una integral numérica, de acuerdo con las ecuaciones 1.1 y 1.2, para hallar la UVER o el Índice UV respectivamente.

Con la finalidad de resolver la ecuación de transferencia radiativa, los modelos proponen distintas aproximaciones, lo que conlleva que se puedan clasificar en tres tipos, los de dispersión simple o espectrales rápidos, los de dispersión múltiple y los empíricos. Lo que diferencia unos de otros es la estructura, el número de parámetros de entrada y la complejidad del modelo (Weihs y Webb, 1997; Koepke *et al*., 1998).

Los modelos empíricos establecen relaciones más o menos simples entre los datos experimentales y algunos parámetros de entrada. También se llaman modelos estadísticos, porque realizan regresiones estadísticas entre éstos. Se suelen utilizar para objetivos muy específicos y funcionan bien para la región en la que han sido desarrollados, pero no para otras. Los parámetros de entrada que se consideran habitualmente son la altura solar y el contenido total de ozono. Algunos ejemplos son el modelo empírico canadiense (Burrows *et al.*, 1994) basado en medidas de irradiancia UV realizadas en días de cielo claro de verano en Toronto y aplicado por la Universidad de Munich para hacer la predicción de la radiación UV y el modelo suizo (Renaud, 1998) desarrollado por el Instituto de Ciencias Atmosféricas de Zurich y basado en medidas realizadas en Davos (Suiza) a unos 1600 m sobre el nivel del mar. Existen algunas excepciones de modelos empíricos que se utilizan para predecir el Índice UV a escala global, como son el modelo de Allaart *et al*., (2004) creado a partir de medidas del espectrofotómetro Brewer, o el desarrollado por Schmalwieser y Schauberger, (2000) que calcula la irradiancia global para 16

longitudes de onda discretas entre 297.5 y 380 nm. Ambos modelos se utilizan en la actualidad para predecir el Índice UV a escala mundial[3].

Los modelos de dispersión simple, también denominados espectrales rápidos, consideran la atmósfera constituida por una sola capa, es decir, homogénea vertical y horizontalmente. Algunos ejemplos de modelos son el SPCTRAL2 (Simple Solar Spectral Model) (Bird y Riordan, 1986), el SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) (Gueymard, 2001) o el UVA_GOA3 (Carreño *et al.*, 2002). El modelo UVA_GOA, desarrollado por el Grupo de Óptica Atmósferica de la Universidad de Valladolid es el que se utliza para realizar la predicción del Índice UV del Instituto Nacional de Meteorología (INM).

Los modelos de dispersión múltiple son los más complejos y tratan de explicar los procesos que ocurren en la atmósfera de la forma más completa posible. Consideran una atmósfera plano-paralela, lo que supone una buena aproximación de la real, formada por distintas capas con absorción y dispersión en cada una de ellas, de manera que las propiedades del medio varían mucho más rápidamente en la dirección vertical que en la horizontal. Estos modelos utilizan, por tanto, una distribución vertical de los parámetros de entrada como ozono, temperatura o aerosoles. Algunos de ellos están basados en el algoritmo DISORT (Discrete Ordinate Radiative Transfer) (Stamnes *et al*., 1988), que resuelve la ecuación de transferencia radiativa con la aproximación de las ordenadas discretas. Entre éstos podemos considerar el STAR (System for a Transfer of Atmospheric Radiation) (Nakajima y Tanaka, 1986), el TUV (Tropospheric Ultraviolet and Visible radiative transfer code) (Madronich, 1987), el SBDART (Santa Barbara Disort Atmospheric Radiative Transfer) (Ricchiazzi *et al.*, 1998) o el LIBRADTRAN (Library for radiative transfer) (Mayer y Kylling, 2005).

Varios autores han realizado intercomparaciones de distintos modelos en función del Índice UV que simulan. La acción COST 713, "Predicción de UVB", comparó hasta 18 modelos de transferencia radiativa: seis de dispersión múltiple, ocho espectrales rápidos y cuatro modelos empíricos (Koepke *et al.*, 1998). La conclusión del trabajo fue que el mejor resultado se obtiene con los modelos de dispersión múltiple, donde en el 80% de los casos se obtiene una coincidencia de ±0.5 unidades de Índice UV. En el caso de los modelos de dispersión simple se

[3]Tropospheric Emission Monitoring Internet Service:
http://www.temis.nl/uvradiation/UVindex.html
Institute of Medical Physics, University of Veterinary Medecine, Vienna:
http://i115srv.vu-wien.ac.at/uv/uv_online.htm

observa una diferencia entre ±1 unidades de Índice UV. En el caso de los modelos empíricos los resultados son muy buenos pero sólo para aquellos tipos de atmósfera para los que fueron desarrollados.

De Cabo *et al*., (2004) compararon recientemente dos modelos de dispersión simple y dos de dispersión múltiple y concluían que los modelos de dispersión múltiple sobrestiman el Índice UV mientras que los de dispersión simple lo subestiman, coincidiendo con otros autores (De Backer *et al.*, 2001).

En cualquier caso puede existir gran discrepancia en las salidas de los modelos en función de los parámetros de entrada, como por ejemplo en función de las propiedades ópticas de aerosoles (Mayer *et al.*, 1997; Kazantzidis *et al.*, 2001; De Backer *et al.*, 2001). Los mayores errores se producen por la acumulación de incertidumbres en varios parámetros de entrada como el ángulo cenital solar, la presión, el ozono o el espesor óptico de aerosoles (Weihs y Webb, 1997).

En los próximos apartados se describen los modelos utilizados en los cálculos de esta memoria. A continuación se dedica un apartado completo al modelo SBDART, por ser el más utilizado ya que se emplea en la predicción del Índice UV en las redes de medida de la radiación UVB de la Comunidad Valenciana y Cataluña. En un apartado posterior se describen someramente otros modelos utilizados, tanto de dispersión múltiple como de dispersión simple.

3.2.- Un modelo de dispersión múltiple: SBDART

SBDART es un modelo de transferencia radiativa de dispersión múltiple que considera la aproximación de una atmósfera plano-paralela. Este programa, escrito en código FORTRAN, está disponible de forma gratuita a través de las páginas web http://www.crseo.ucsb.edu/esrg/pauls_dir y http://arm.mrcsb.com/sbdart/. La segunda de estas páginas consiste en una versión del programa que se puede ejecutar sin necesidad de instalación en la máquina local, aunque esta opción restringe el número de parámetros de entrada que se pueden modificar. En la predicción del Índice UV, se ha estado utilizando la versión completa, en concreto la 2.0, aunque en la actualidad se está implementando la última versión, la 2.4.

Este modelo resuelve la ecuación de transferencia radiativa numéricamente, con el algoritmo DISORT. El método de ordenadas discretas proporciona un algoritmo estable para resolver las ecuaciones de la transferencia radiativa plano-paralela en una atmósfera verticalmente no homogénea. SBDART permite utilizar hasta 65 capas de atmósfera y 40 ángulos cenitales y azimutales.

El SBDART toma como modelo de absorción por gases, o absorción molecular, los de baja resolución del LOWTRAN7 (Pierluissi y Marogoudakis, 1986), lo que resulta una resolución de 5 nm en el rango del visible y de 200 nm en el infrarrojo térmico. A partir de la versión 2.0 se considera la posibilidad de introducir una distribución de espesores ópticos de alta resolución introducidas por el usuario.

En cuanto al espectro solar que llega al techo de la atmósfera, el SBDART permite elegir entre tres espectros distintos: el proporcionado por el programa LOWTRAN-7 (Thekeakara, 1974), el usado en los modelos solares 5S (Tanre *et al.*, 1990), o el del MODTRAN-3, que es una composición de varios rangos espectrales medidos por distintos autores. En los cálculos utilizaremos el espectro dado por LOWTRAN-7 por ser el que tiene mayor resolución espectral.

Este modelo permite elegir entre seis perfiles de atmósfera estándar, que son los utilizados con el código 5S: tropical, verano en latitudes medias, invierno en latitudes medias, verano subártico, invierno subártico y US62. Estos modelos incluyen el perfil vertical de presión, temperatura, vapor de agua y ozono. Sin embargo el usuario, podría incluir su propio modelo de atmósfera si dispone de radiosondeos. Para todos los cálculos realizados en esta memoria es adecuado elegir un perfil atmosférico de verano o de invierno en latitudes medias dependiendo de la época del año, de manera que, desde mitad de la primavera hasta mitad del otoño se considera “verano” y el resto del año “invierno” a efectos de los parámetros de entrada al modelo.

Con respecto a la turbiedad, el SBDART permite considerar aerosoles estratosféricos y troposféricos. Los aerosoles troposféricos pueden ser de tres tipos, rurales, urbanos o marítimos según los modelos estándar de aerosoles propuestos por Shettle y Fenn (1979). Éstos modelos difieren entre sí en el factor de eficiencia de extinción, el albedo de dispersión simple y el factor de asimetría. Todos estos parámetros varían con la longitud de onda, la superficie relativa y la humedad. El espesor total de la columna de aerosoles se calcula a partir del parámetro de entrada de la visibilidad a 550 nm y un modelo de distribución vertical. En cuanto a los aerosoles estratosféricos se tratan únicamente en casos especiales, ya que su contribución es mucho menor que la de los aerosoles troposféricos excepto en casos muy puntuales como por ejemplo el de erupciones volcánicas. En los cálculos vamos a considerar tan sólo aerosoles troposféricos. Para ambos tipos de aerosoles, el programa permite elegir un modelo de aerosoles según los definidos por el modelo LOWTRAN7 o incluso definir un perfil de aerosoles definido por el propio usuario.

En cuanto al albedo o reflexión en la superficie, el modelo permite seleccionar entre seis tipos de superficies básicas como son agua clara, agua de océano, agua de lago, vegetación, nieve, arena o cualquier combinación de estas que pueda definir el usuario. El SBDART asume también la reflexión lambertiana, es decir considera que la superficie refleja la radiación de forma isotrópica, independientemente del ángulo de observación. Este modelo permite introducir una función de apertura aplicable a la irradiancia espectral lo que posibilita la comparación de la salida del programa con las medidas experimentales efectuadas con un espectrorradiómetro.

El modelo SBDART permite considerar las nubes en sus cálculos. Dispone de una base de datos para nubes compuestas de gotitas de hielo y agua y cubre un rango de radio efectivo de entre 2 y 128 µm. Sin embargo en este trabajo vamos a calcular el Índice UV para cielos despejados y se aplicará una corrección a posteriori por nubosidad de acuerdo con el criterio de la acción COST 713 (Vanicek *et al.*, 2000):

$$\mathrm{UVI} = \mathrm{UVI}_0 \cdot \mathrm{CMF} \cdot (1 + 0.08 \cdot \Delta \mathrm{h}) \tag{3.1}$$

donde UVI_0 es el valor del Índice UV para cielos despejados y a nivel de mar, CMF el factor de modificación de nubes, que es un número adimensional comprendido entre 0 y 1 en función del tipo de nubosidad y del grado de cobertura nubosa, y Δh es el gradiente de altura, en km. Los valores del CMF propuestos por la COST 713, que son los que se han utilizado en este trabajo, vienen dados en la Tabla 3.1.

A continuación describimos los parámetros de entrada utilizados en esta memoria. Éstos se escriben en un fichero de texto, llamado INPUT, Figura 3.1, en el que se especifica una serie de variables y su valor. Una ventaja que presenta el SBDART es que se pueden introducir multitud de parámetros si se dispone de las medidas experimentales correspondientes o bien modificar sólo algunos, y el programa utiliza el resto de variables con el valor que él asigna por defecto. Por tanto basta con modificar el fichero INPUT con las variables que vayan a cambiar de valor.

Un estudio sobre la variación en la simulación del Índice UV y la UVER con este modelo en función de los parámetros de entrada más significativos (ozono y espesor óptico de aerosoles) fue llevada a cabo por Marín *et al.*, (2006).

Tabla 3.1.- Factor de corrección para diferentes tipos de nubes y cubierta nubosa (0 octavas representa el cielo completamente despejado y 8 octavas representa cielo totalmente cubierto) (Vanicek *et al.*, 2000).

Nubosidad				
Octavas	**0 – 2**	**3 – 4**	**5 – 6**	**7 - 8**
Alta	1.0	1.0	1.0	0.9
Media	1.0	1.0	0.8	0.5
Baja	1.0	0.8	0.5	0.2
Niebla	-	-	-	0.4
Lluvia	-	-	-	0.2

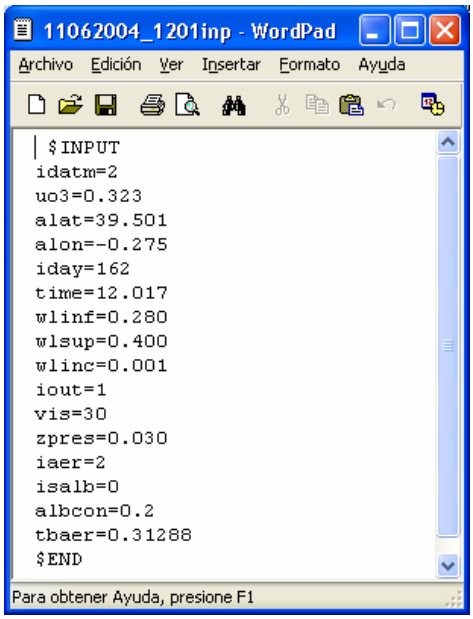


Figura 3.1.- Fichero INPUT para el día 11 de Junio 2004 en Burjassot (Valencia).

El ejemplo de Fichero INPUT de la Figura 3.1 lo utilizamos para la predicción del Índice UV el día 11 de Junio de 2004 en Valencia. Los datos de entrada utilizados fueron:

- idatm = 2, que corresponde al perfil atmosférico de verano para latitudes medias.
- uo3 = 0.323, que corresponde al dato de la columna total de ozono, dado por el TOMS[4] (en atm·cm).
- alat = 39.501, es la latitud de Burjassot (Valencia) (en grados).
- alon = 0.275, es la longitud de Burjassot (Valencia) (en grados).
- iday = 162, corresponde al día juliano.
- time = 12.017, es la hora solar (en horas).
- wlinf = 0.280 y wlsup = 0.400, son los límites inferior y superior de longitudes de onda, siendo wlinc = 0.001 el paso. En este caso estamos calculando la distribución espectral de UVB y UVA (desde 280-400 nm).
- iout = 1, define el tipo de fichero de salida que en este caso tiene ocho columnas siendo de interés la primera de ellas porque se trata de la longitud de onda y la sexta porque se trata de la irradiancia global espectral a nivel de suelo.
- vis = 30, es la visibilidad (en km). Estima el valor del espesor óptico de aerosoles y afecta al perfil vertical.
- zpres = 0.030, es la altura sobre el nivel del mar (en km).
- iaer = 2, identifica el tipo de aerosoles troposféricos, que corresponden a aerosoles de tipo urbano.
- isalb = 0, indica que se trata de un albedo uniforme en todo el rango.
- albcon =0.2, es el valor del albedo.
- tbaer = 0.31288, es el espesor óptico de aerosoles a 550 nm.

Una vez ejecutado el SBDART y a partir del fichero de salida, que nos proporciona la irradiancia espectral, se procede, como se ha explicado anteriormente, al cálculo del Índice UV.

[4] Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), sensor a bordo del satélite Earth Probe de la NASA: http://toms.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone_overhead.html.

3.3.- Otros modelos de transferencia radiativa

Modelo STAR

El modelo de dispersión múltiple STAR, http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/strahlung/uvrad/Star/STARinfo.htm, resuelve la ecuación de transferencia radiativa mediante el algoritmo DISORT utilizando el método de las ordenadas discretas e incorpora una aproximación casi esférica para ángulos cenitales altos. Este modelo permite calcular la irradiancia horizontal y vertical tanto en directa como en difusa así como el flujo actínico en el rango ultravioleta y en el visible. Proporciona valores integrados para un rango determinado y dispone de varios espectros de acción entre ellos el de la CIE, lo que permitirá calcular el Índice UV. A través de una interfaz en Java muy cómoda para el usuario, este programa permite modificar numerosos parámetros de entrada, como el contenido total de ozono en columna, la cantidad de algunos contaminantes como el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, definir un perfil de presión y temperatura, la humedad relativa, el espesor óptico de aerosoles a 550 nm o la altura de la capa de mezcla. Dispone de hasta ocho modelos de aerosoles y tres modelos más de aerosoles estratosféricos, doce modelos de albedos espectrales e incluye parámetros de nubosidad como el vapor de agua para capas de nubes homogéneas. El usuario puede utilizar los espectros de acción predeterminados por el programa o añadir algunos nuevos. Además permite introducir algunos parámetros adecuados para comparar los datos obtenidos con los de un espectrorradiómetro, como la respuesta coseno o la función de apertura.

Modelo LIBRADTRAN

El modelo de dispersión múltiple LIBRADTRAN, http://www.libradtran.org/, fue originalmente diseñado para el cálculo de la irradiancia espectral en el ultravioleta y parte del visible; originalmente se denominaba UVSPEC, y fue reescrito en 1997 cambiando el nombre a LIBRADTRAN. El cambio más significativo fue la extensión hasta el rango térmico incluyendo algunas librerías que permiten hacer cálculos auxiliares tales como la posición del Sol o determinar algunas propiedades de aerosoles o de las nubes.

Probablemente se trate del modelo más completo y complejo de los que se exponen en este capítulo. Este modelo permite elegir entre varias formas de resolver la ecuación de transferencia radiativa, incluida la DISORT, pero también otras que consideran una atmósfera bicapa y otros métodos que no incluyen la aproximación

de la atmósfera plano-paralela y son especialmente útiles para ángulos cenitales muy grandes. Incluso permite definir los perfiles verticales de los parámetros de entrada de dos formas: por alturas o niveles, como la información dada en un radiosondeo, o por capas atmosféricas, como utiliza el algoritmo DISORT. El perfil estándar incluye cincuenta niveles entre 0 y 120 km que es razonable para la mayoría de las aplicaciones. Análogamente al SBDART, a pesar de las múltiples opciones que ofrece, es posible especificar sólo unos pocos parámetros de entrada tomándose el resto de ellos por defecto. Además el usuario puede proporcionar el valor total de la columna de ozono o el espesor óptico de aerosoles en columna y aplicarle un perfil vertical en función del modelo de aerosoles elegido entre rural, marítimo y urbano. El modelo incluye nubes, tanto de hielo como de agua y seis tipos de atmósferas estándar permitiendo al usuario definir su propia atmósfera. En cuanto al albedo, que puede ser espectral, se considera una superficie lambertiana. Por último se puede definir la función de apertura del espectrorradiómetro para comparar con la irradiancia espectral experimental.

Modelo SMARTS

El modelo SMARTS es un modelo de dispersión simple desarrollado en lenguaje FORTRAN y disponible en: http://rredc.nrel.gov/solar/models/SMARTS. Este modelo calcula la irradiancia espectral directa y difusa tanto en el plano horizontal como en planos inclinados. No admite la posibilidad de introducir la nubosidad. La última versión, la 2.9 dispone de una interfaz de usuario que permite fácilmente elegir entre diez tipos de atmósfera estándar o una propia introducida por el usuario. El algoritmo dispone de albedos espectrales, así como datos de los coeficientes de absorción de los principales componentes atmosféricos. Este modelo permite calcular la componente circunsolar por separado así como introducir funciones de apertura para comparar los resultados con las medidas de un espectrorradiómetro. También da la posibilidad de calcular medidas de todo el rango integradas, la dosis eritemática, el Índice UV y otras medidas ponderadas con diferentes espectros de acción. Dispone de hasta siete espectros extraterrestres, destacando uno propuesto por el autor, Gueymard, en 2002. Este modelo se caracteriza por la multitud de opciones que considera en los parámetros de entrada y la cantidad de modelos que utiliza. Como ejemplo cabe destacar que propone hasta nueve modelos diferentes de aerosoles: los cuatro tipos propuestos por Shettle y Fenn (Shettle y Fenn, 1979), y otro cinco más de otros autores. Además a diferencia de los modelos detallados anteriormente existe la posibilidad de considerar la superficie del suelo como no lambertinana por lo que se puede calcular la salida a diferentes ángulos de visión.

Modelo UVA_GOA

Se trata de un modelo de transferencia radiativa espectral monocapa. El método de resolución de la ecuación de transferencia radiativa para una atmósfera dispersora sin absorción está basada en el método de Ambartsumina (Sobolev, 1963) que permite una expresión analítica para la transmitancia total de la atmósfera. La elección de este método viene dada por su mayor sencillez y rapidez en comparación con otros, como el de Ordenadas Discretas. Su limitación estriba en que sólo nos permite evaluar irradiancias. La irradiancia normal directa viene dada por la Ley de Beer-Lambert-Bourger en la que el espesor óptico puede expresarse de forma más sencilla como producto de transmitancias debidas a cada efecto independientemente. Entre dichos efectos podemos citar la dispersión por moléculas (espesor óptico de Rayleigh), la dispersión por aerosoles (espesor óptico de aerosoles) y la absorción selectiva. La absorción que presenta el rango visible e infrarrojo cercano es la debida a la banda de Chappuis del ozono, dióxido de nitrógeno y el vapor de agua, y en el caso del ultravioleta el modelo tiene en cuenta el ozono correspondiente a la bandas de Hartley (200-310 nm) y Huggins (300-350 nm).

El modelo utiliza datos espectrales del coeficiente de absorción del ozono y del dióxido de nitrógeno y el espectro de irradiancia extraterrestre dado por el MODTRAN con un paso de 1 nm entre 280-400 nm. Como datos de entrada hay que conocer el día juliano, la presión atmosférica, el ángulo cenital, el contenido total de la columna de ozono, los parámetros de turbiedad: alfa y beta de Ángstrom o el espesor óptico de aerosoles a 500 nm y la resolución espectral. Este programa proporciona como salida la irradiancia UV espectral e integrada correspondiente a la irradiancia horizontal global, difusa y a la directa normal y horizontal, así como la UVER y el Índice UV. También determina la transmitancia espectral, y la absorción en la componente global y directa.

A continuación en la Tabla 3.2 se resumen las principales características de los modelos considerados en este capítulo, lo que permite una comparación entre ellos.

Tabla 3.2.- Resumen de las principales características de los modelos considerados.

Modelo	SBDART	STAR	LIBRADTRAN	SMARTS	UVA_GOA
Tipo	Dispersión múltiple	Dispersión múltiple	Dispersión múltiple	Dispersión simple	Dispersión simple
Ecuación Transferencia	DISORT	DISORT	DISORT y otras	Paramétrico	Paramétrico
Espectros extratrerrestres	LOWTRAN-7, 5S y MODTRAN-3	ATLAS3 y LABS&NECKER	ALTLAS2, ALTLAS3 y MODTRAN3.5	6 estándar y 1 propio	MODTRAN
Perfiles atmosféricos	6	2	6	10	--
Tipos de aerosoles	Estratosféricos (5) y troposféricos (5)	Estratosféricos (3) y troposféricos (8)	A más de 2 km de altura (4), y hasta 2 km (4)	Troposféricos (9)	--
Albedo	6 perfiles lambertianos	12 perfiles lambertianos	Superficie lambertiana	37 perfiles lambertianos o no	--
Nubosidad	sí	sí	sí	No	no
Función apertura	sí	sí	sí	sí	no
Cálculo directo del Índice UV	no	sí	no	sí	sí

Capítulo 4

Redes de medida de UVB y UVER

La climatología de la radiación UVB y de la UVER es objeto de estudio en los últimos decenios y su análisis requiere del dispositivo experimental adecuado. En este sentido es imprescindible disponer de medidas próximas geográficamente y que hagan un barrido significativo de la orografía del lugar a estudiar. En este contexto surge la necesidad de instalar redes de medidas de instrumentos de banda ancha colocados homogéneamente que permitan analizar la evolución de la radiación UVB y UVER, lo que servirá para validar los modelos de predicción del Índice UV y también las medidas desde satélite. En este capítulo se describe qué son las redes de medidas de la radiación UVB y UVER detallando especialmente la red ubicada en la Comunidad Valenciana que fue diseñada y puesta en marcha por el grupo de Radiación Solar de Valencia. Esta red tuvo como referencia las que empezaron a funcionar previamente en España como la red nacional del INM y la regional de Cataluña. Actualmente hay redes extendidas en muchos países y la predicción del Índice UV se realiza en todo el mundo.

4.1.- Redes de medida

Las redes de medidas de la radiación UVB y UVER están ampliamente extendidas en distintas regiones del planeta. La medida continuada de dicha radiación permite evaluar su tendencia a medio y largo plazo. La variabilidad espacial se puede establecer a partir de la ubicación de instrumentos de medida en distintos puntos geográficos. En el caso de la predicción del Índice UV es necesario disponer de datos experimentales que permitan validar los modelos de transferencia radiativa utilizados.

Estas redes están constituidas por radiómetros de banda ancha, tal y como se detalló en el Capítulo 2, dadas su características de alta estabilidad y coste sensiblemente menor al de los espectrorradiómetros. Sin embargo, la cantidad de factores que influyen en la medida de la irradiancia hacen que sea preciso un estricto control de calidad de los datos y el uso de una metodología para la calibración de los instrumentos y la corrección de errores. A su vez, la mayor dificultad a la que nos enfrentamos a la hora de acometer predicciones del Índice UV radica en la gran variabilidad a la que están sometidas las variables atmosféricas que intervienen. Para afrontar predicciones tridimensionales (latitud-longitud-altitud) aparece como única alternativa, realista a corto plazo, el empleo de modelos que introduzcan datos de entrada de variables conocidas.

El primer análisis de tendencia de la radiación UV fue el publicado por Scotto y colaboradores (Scotto *et al.*, 1988) y estaba basado en una red de radiómetros tipo Robertson-Berger en Estados Unidos. Desde ese momento se ha extendido su uso y en 1998 se cifraban en más de 400 los radiómetros de banda ancha con sistema de estabilizador de temperatura que existían en todo el mundo (Leszczynski *et al.*, 1998). A modo de ejemplo podemos nombrar la red de medida de UVB norteamericana (Long *et al.*, 1996), la austriaca (Schmalwieser y Schauberger, 2000) o la red argentina (Cede *et al.*, 2002).

En España el Instituto Nacional de Meteorología (INM), junto a varias universidades, instaló una red de medida y predicción de la radiación UVER en el año 1999, basada en radiómetros de banda ancha y espectrorradiómetros para la medida de ozono, que consta de 17 estaciones de medida, como se detalla en la Figura 4.1 (Martínez-Lozano *et al.*, 2002a). Las coordenadas geográficas y la altura sobre el nivel del mar de las estaciones de esta red se detallan en la Tabla 4.1. La red está compuesta por dos tipos de estaciones: 6 estaciones miden tanto radiación UVER como ozono total en columna (señaladas con * en la Tabla 4.1), y las 11 estaciones restantes miden únicamente radiación UVER. La medida de radiación

UVER se realiza mediante piranómetros UVB-1 (YES), mientras que la medida de la columna total de ozono se realiza mediante espectrorradiómetros Brewer. Los datos semihorarios se transmiten diariamente al Centro Radiométrico Nacional (Madrid), donde se concentran y elaboran los productos derivados de los mismos. Se dispone de otros dos piranómetros UVB-1, que se utilizan como patrones de la red. Uno de ellos permanece fijo en el Observatorio Especial de Izaña (Islas Canarias) y el otro, depositado en el Centro Radiométrico Nacional (Madrid), se utiliza como patrón itinerante. La estación de Granada empezó a estar operativa en 2005. Se han instalado cuatro estaciones más en pruebas, Igueldo (Guipúzcoa), Salamanca, Córdoba y Santa Cruz de Tenerife.

La predicción del Índice UV máximo para cielos despejados se realiza en cada capital de provincia para el día en vigor y el siguiente. Se dispone de un mapa con el código de colores en función del valor del Índice UV y de su evolución diaria. Está disponible en la página web del INM como información meteorológica en: http://www.inm.es/web/infmet/predi/ulvip.html.

Figura 4.1.- Estaciones de medida de la red del INM. En rojo aquellas que miden UVER y ozono total en columna, en negro aquellas que sólo miden UVER.

Tabla 4.1.- Coordenadas de las estaciones que constituyen la red española de medida de UVB. (*): estaciones que miden irradiancia UVER y ozono total en columna. Resto: estaciones que miden únicamente UVER.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)
La Coruña *	43º 21’N	8º 25’W	67
Santander	43º 28’N	3º 49’W	79
Valladolid	41º 39’N	4º 46’W	740
Zaragoza *	41º 38’N	0º 55’W	250
Barcelona	41º 38’N	2º 12’E	60
Madrid *	40º 27’N	3º 44’W	680
Roquetas	40º 49’N	0º 30’E	44
Badajoz	38º 53’N	6º 58’W	186
Ciudad Real	38º 59’N	3º 55’W	628
Valencia	39º 29’N	0º 23’W	23
Palma de Mallorca	39º 33’N	2º 37’E	10
Murcia *	38º 00’N	1º 10’W	69
El Arenosillo *	37º 10’N	6º 73’W	41
Granada	37º 08’N	3º 28’W	685
Málaga	36º 43’N	4º 29’W	61
Izaña *	28º 17’N	16º 29’W	2367
Maspalomas	27º 45’N	15º 34’W	30

Los UVB-1 de la red radiométrica UVB española fueron comparados antes de su instalación en la red, en el Centro Radiométrico Nacional (Madrid). Posteriormente, una vez realizada la puesta en marcha de la red, en Julio de 1999, los dos instrumentos de referencia participaron en una intercomparación de detectores UV de banda ancha organizada por el LAP (Laboratorio de Física Atmosférica) de la Universidad Aristotle de Thessaloniki (Grecia) en Septiembre de 1999, dirigida por A. Bais (Bais *et al.*, 2001a). A partir de ese momento son recalibrados cada año en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

En Junio de 2000, el Servicio Meteorológico de Cataluña y la Universidad de Barcelona instalaron tres piranómetros 501 (SLC) en diferentes ubicaciones que, juntamente con el piranómetro UVB-1 (YES) instalado en la terraza de la Facultat de Física por el Instituto Nacional de Meteorología, configura la red de medida de UVB de Cataluña, mostrada en la Tabla 4.2, (Marín *et al.*, 2005). La predicción del Índice UV, incluyendo la predicción de la nubosidad, se realiza en los puntos donde se sitúan los cuatro piranómetros citados y en otro enclave más, situado en el interior de la Comunidad Autónoma, en Castellnou de Seana (41.64ºN, 0.96ºE y 252 m de altura). En el caso de cobertura nubosa variable se ofrece la predicción del Índice UV en un intervalo que abarca desde el valor máximo en caso de cielo despejado y el mínimo posible en caso de cielo cubierto. Esta información está disponible en: http://www.meteocat.com/marcs/marcos_previsio/marcs_uvi.htm. Un ejemplo de la predicción del Índice UV se muestra en la Figura 4.2.

Por último en Extremadura también se ha diseñado recientemente una red de medida de UVB con tres radiómetros UV-S-E-T (KZ) situados en Badajoz, Cáceres y Plasencia (Serrano *et al.*, 2004).

Tabla 4.2.- Estaciones de la red de medida de UVB de Cataluña.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Molló	42º21’36”N	2º23’34”E	1406
Roses	42º16’16”N	3º10’12”E	24
Barcelona	41º23’08”N	2º07’13”E	98
El Perelló	41º15’25”N	0º42’36”E	179

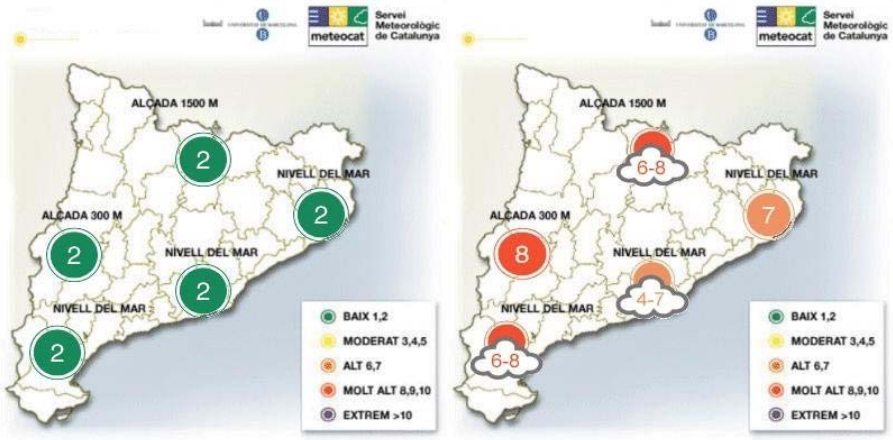


Figura 4.2.- Predicción del Índice UV máximo diario en los mismos puntos donde se dispone de radiómetros para la medida de la UVER y en otro punto más en el interior de Cataluña.

4.2.- Red de medida de UVB y UVER en la Comunidad Valenciana

A mediados del 2001 un convenio entre la Conselleria de Medi Ambient (actualmente Conselleria de Territori i Habitatge) y el Grupo de Radiación Solar de Valencia hizo posible el diseño y la instalación de una red de medida de UVB y UVER. Dicha red empezó a registrar datos a finales del 2001 y se dispone de datos para todas las estaciones a partir del 2002. Esta red consta de cinco estaciones de medida donde se han ubicado radiómetros UVB-1 (YES). Además esta red dispone de un radiómetro análogo, que ejerce el papel de patrón para el calibrado. Este patrón ha sido calibrado en laboratorio siguiendo el procedimiento estándar que se detalló en el Capítulo 2.

Considerando que un diseño adecuado de una red de medida de UVB puede basarse en una rejilla de coordenadas geográficas de densidad grado-grado, y teniendo en cuenta que La Comunidad Valenciana se enmarca entre los 37º 50’ de latitud de Pilar de la Horadada (Alicante) y los 40º 42’ de Fredes (Castellón), es razonable considerar un total de cuatro estaciones de medida. Parece conveniente, tanto por la distribución de la población y la afluencia turística, como por la importancia de los estudios sobre los ecosistemas marítimos, instalar estas estaciones lo más próximo posible a la costa. Además, con el fin de poder analizar

la influencia de la altura sobre el nivel del mar, así como la posible presencia de nieve, es conveniente instalar una quinta estación en una zona a la mayor altitud posible y alejada de la costa para estudiar el efecto de continentalidad. La decisión final en cuanto a la ubicación de las estaciones de medida debe tomarse en base a dos consideraciones básicas adicionales: la existencia de un horizonte libre de obstáculos y la disponibilidad de una infraestructura mínima (fluido eléctrico, limitación de acceso, etc.).

En base a las consideraciones anteriores se establecieron cinco estaciones de medidas en la Comunidad Valenciana como se aprecia en la Figura 4.3 y cuya longitud, latitud y altitud con respecto a nivel del mar se especifica en la Tabla 4.3.

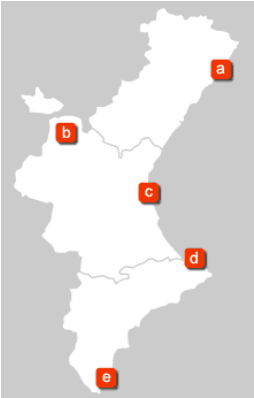


Figura 4.3.- Localización de las estaciones de la red de medida de UVB de la Comunidad Valenciana: a) Prat de Cabanes, b) Aras de los Olmos, c) Valencia, d) Denia y e) Torrevieja.

Tabla 4.3.- Características de las estaciones en la Comunidad Valenciana.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Prat de Cabanes	40º08’13”N	00º09’56”E	14
Aras de los Olmos	39º57’01”N	01º06’33”W	1277
Valencia	39º27’49”N	00º20’09”W	0
Denia	38º49’19”N	00º02’09”E	44
Torrevieja	38º00’30”N	00º39’31”W	12

En la Figura 4.4 se detalla la ubicación exacta de los radiómetros de la red.

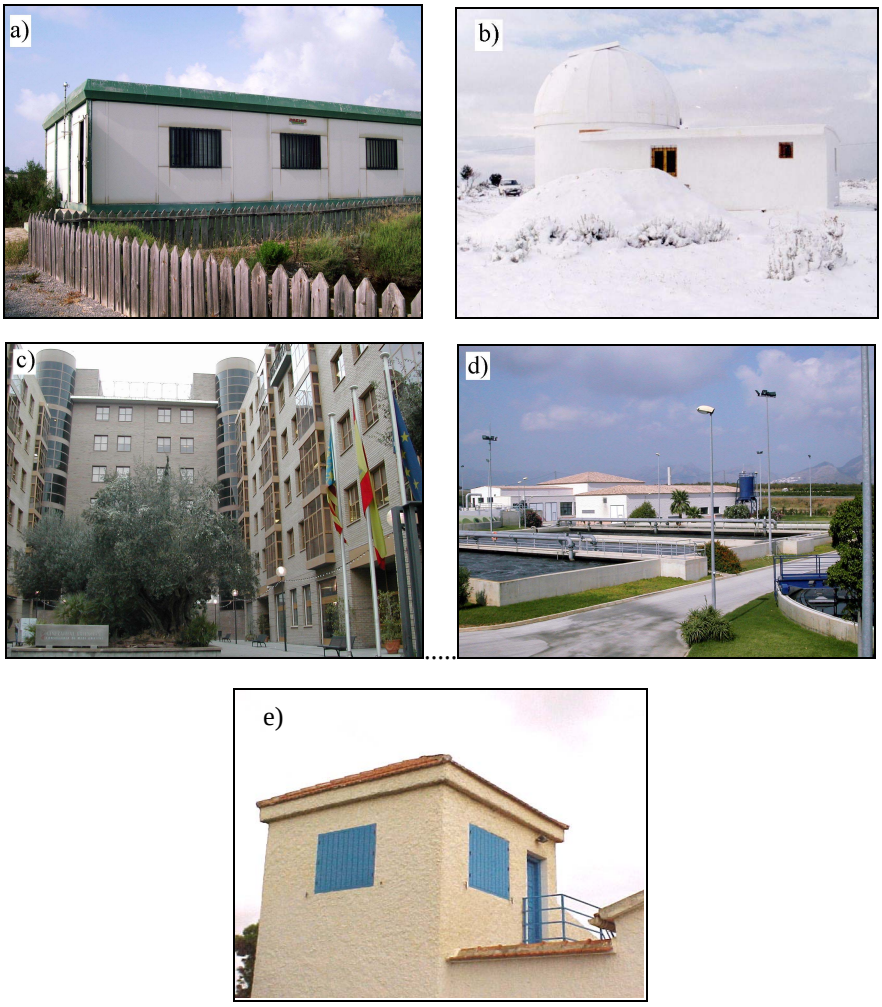


Figura 4.4.- Edificios donde están ubicados los radiómetros UVB-1 de la red de la Comunidad Valenciana: a) Centro de Información del Parque Natural del Prat de Cabanes. Torreblanca-Cabanes (Castellón), b) Observatorio Astronómico de la Universitat de València. Aras de los Olmos (Valencia), c) Edificio de la Conselleria de Territori i Habitatge C/ Francesc Cubells, 7. Valencia, d) Estación Depuradora de Aguas Residuales. La Xara, Denia (Alicante) y e) Centro de Información del Parque Natural de las Lagunas de la Mata-Torrevieja. Carretera N-332 Alicante-Cartagena, km 64. Torrevieja (Alicante).

Con la finalidad de informar a la opinión pública de los niveles de radiación UV a través del Índice UV así como de los riesgos que implica una exposición solar prolongada y proporcionar algunas recomendaciones de fotoprotección se ha creado una página web dónde se encuentra toda la información sobre la red de medida de UVB de la Comunidad Valenciana: http://www.cth.gva.es/cidam/emedio/uv/. En dicha página web se pueden distinguir dos partes: una con información dinámica que se va actualizando y otra estática con información de tipo general sobre el tema.

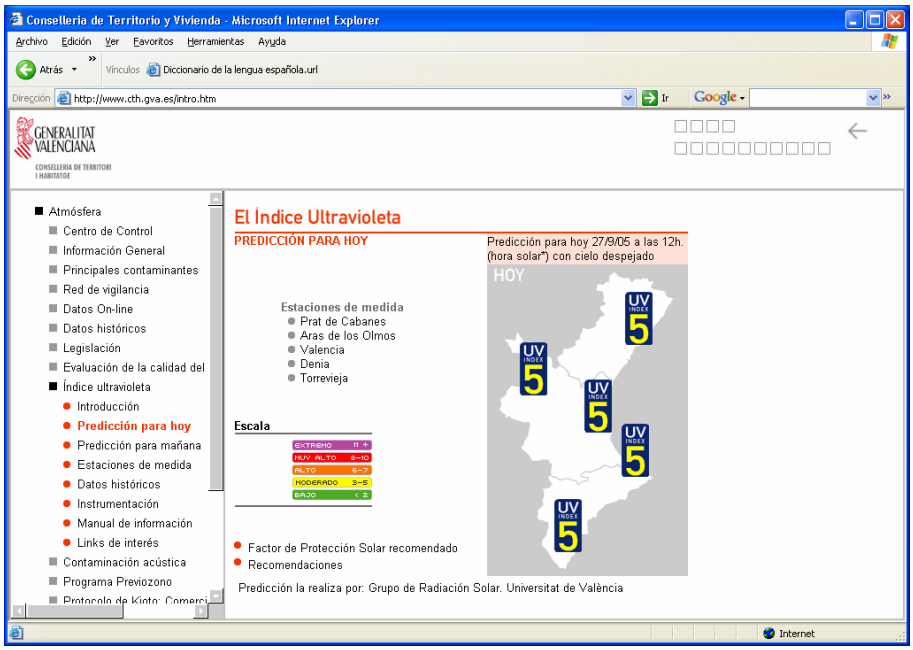


Figura 4.5.- Página web (I): Predicción del Índice UV para el día en vigor a las 12 GMT y con cielos despejados.

En la parte dinámica se incluye la predicción del Índice UV para el día en vigor y el día siguiente. La predicción se realiza para el mediodía solar, que coincide en la mayoría de los casos con el valor máximo diario (Martínez-Lozano *et al.*, 2002a), y para cielos despejados. Para este cálculo se utiliza el modelo SBDART, y el valor del ozono en columna se toma del estimado por el TOMS para la víspera y para esa ubicación. La hipótesis de la persistencia en el valor del ozono ha sido analizada por distintos autores. Según Long *et al.* (1996) la variación de

ozono en verano es del 1% en latitudes medias, mientras que Lorente *et al*. (2002) llegan a la conclusión de que en verano, que es cuando más significativo es el Índice UV, el error relativo cometido al tomar el ozono del día anterior puede llegar a ser del 6%, lo que repercute en valores de menos de una unidad de Índice UV, cuando el Índice UV alcanza un valor entre 8 y 9.

El Índice UV previsto se muestra con los pictogramas y código de colores correspondientes a la escala recomendada por la WHO (2003), Figura 4.5. Además se ofrece una evolución horaria por estación y en función de la nubosidad: para cielos despejados, nubosidad alta, media o baja (Figura 4.6). Ésta se realiza a partir de la predicción para cielos despejados aplicando el factor de corrección correspondiente para el caso extremo de cobertura nubosa total (8 octavas), según la Tabla 3.1. Por último se ha incluido recientemente los datos experimentales medidos en las estaciones de la red, en el apartado de "datos históricos".

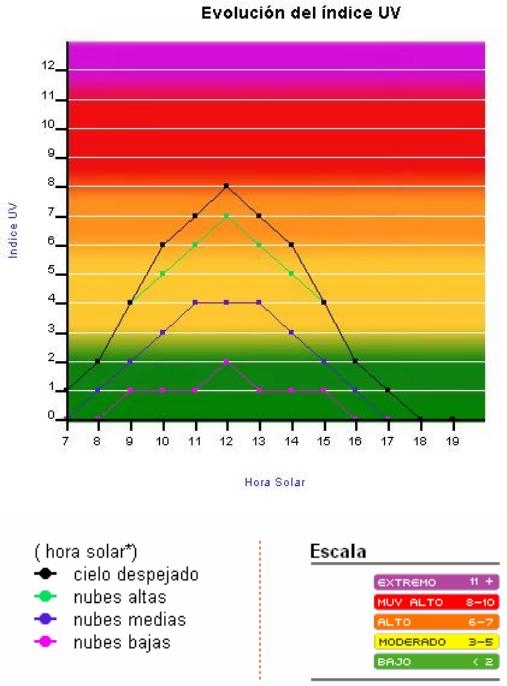


Figura 4.6.- Página web (II): Evolución horaria del Índice UV para cielos despejados y con distinto tipo de nubosidad.

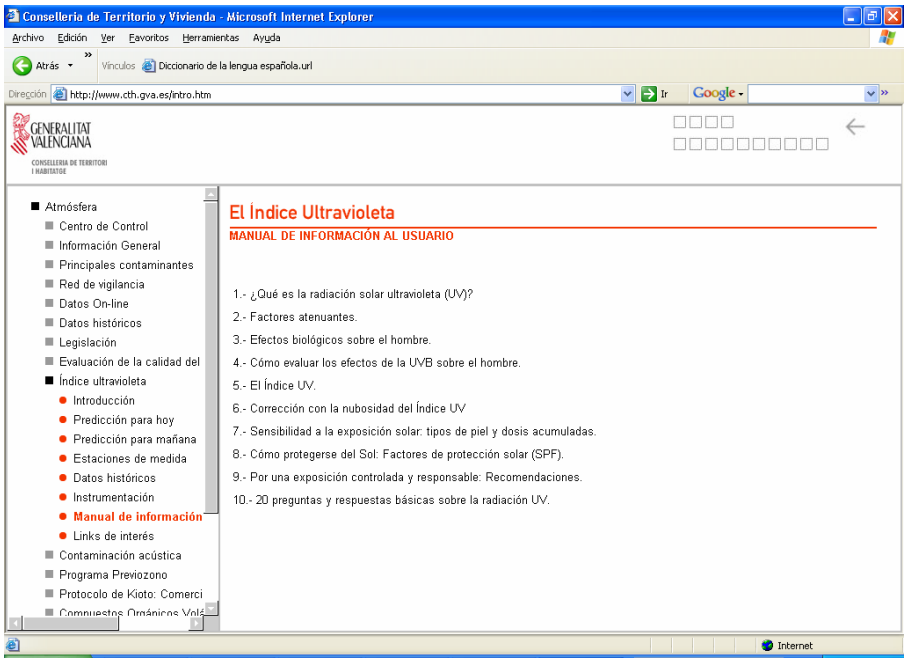


Figura 4.7.- Página web (III): Manual de información al usuario.

La parte estática se compone de información de la red de medida por una parte, como la ubicación de las estaciones, y por otra de información de tipo divulgativo. Cabe destacar el apartado denominado “Manual de Información al Usuario” donde se explica qué es el Índice UV y algunos de los efectos más comunes de la radiación UVB sobre el hombre y se especifican medidas de fotoprotección como por ejemplo el factor de protección solar adecuado según el Índice UV y el tipo de piel. En la Figura 4.7 se detalla el índice del “Manual de Información al Usuario” y en la Figura 4.8 el factor de protección solar recomendado.

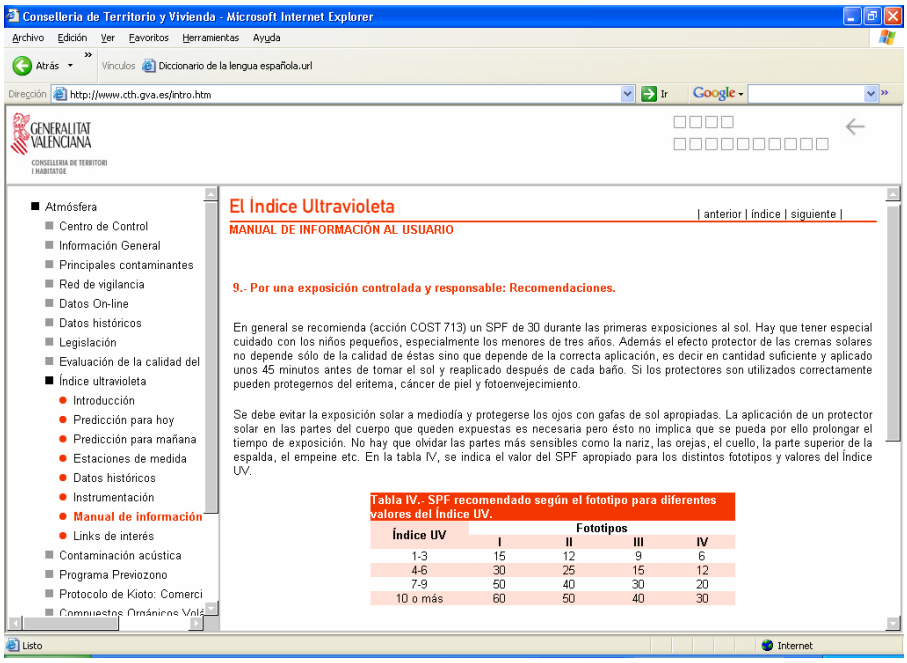


Figura 4.8.- Página web (IV): Factor de Protección Solar recomendado en función del Índice UV y del fototipo.

Capítulo 5

Medidas y predicción del Índice UV

En este capítulo se muestran los resultados de la medida experimental de la UVER y del Índice UV para la red nacional del INM y la regional de la Comunidad Valenciana. Los periodos considerados son los años 2000 y 2001 para el primer análisis y el trienio comprendido desde el 2002 hasta el 2004 en el segundo estudio. En el caso de la Comunidad Valenciana se ha llevado a cabo un trabajo más detallado en el que se especifica la calibración de los sensores y se ha realizado la predicción del Índice UV para todos los días en que se disponía de medidas experimentales comparándola con éstas, como método de validación. Por último se han cotejado los resultados con los hallados en la red análoga de Cataluña para el año 2003.

5.1.- Resultados experimentales de la red nacional del INM

En este apartado se expone un análisis de los datos experimentales registrados en la red de medida de UVB y UVER del INM. Este estudio corresponde a los años 2000 y 2001, es decir, los dos primeros años en los que se dispone de datos ya que la red se puso en funcionamiento en 1999. Se han considerado once estaciones y se ha descartado el resto por no disponer de datos suficientes en este periodo. Se ha analizado la evolución anual de la UVER, se ha calculado el Índice UV máximo diario y el de las 12 GMT[5] y por último se ha hallado la dosis eritemática acumulada anual. Un estudio más detallado de este trabajo lo llevaron a cabo Martínez-Lozano *et al.*, (2002a) y un análisis previo del año 2000 Marín (2001).

En la Figura 5.1 se muestra la evolución del UVER para los años 2000 y 2001 para cuatro estaciones: Santander, Madrid, Ciudad Real y Valencia. Se han elegido estas estaciones como representativas dado que dos de ellas están situadas en la costa (Santander y Valencia) mientras que hay dos en el interior (Madrid y Ciudad Real). En el trabajo de Martínez-Lozano *et al.*, (2002a) se consideraron otras estaciones a modo de ejemplo.

La evolución anual del UVER tiene una forma sinusoidal para días despejados con un máximo próximo a 0.25 W/m^2. Cabe destacar la estación de Ciudad Real, donde se supera en ocasiones este valor, que es muy alto ya que equivale a un Índice UV de 10. Las curvas de cada estación muestran una evolución distinta que viene marcada por la nubosidad a lo largo del año. La estación de Santander muestra más dientes de sierra comparados con las curvas del resto de estaciones, lo que indica un predominio de días nubosos. En cuanto a las estaciones de interior se observa como alcanzan un valor más alto en verano que las situadas en la costa. Las curvas correspondientes al año 2001 son análogas a la del 2000 excepto en Valencia donde se observa una disminución apreciable. Probablemente esto se deba a algún cambio en el sensor de medida que debiera ser subsanado con una recalibración del radiómetro.

[5] GMT (Greenwich Mean Time): hora del meridiano de Greenwich o meridiano cero. También se denomina hora zulú, z o UTC (Universal Time Coordinated): tiempo universal coordinado.

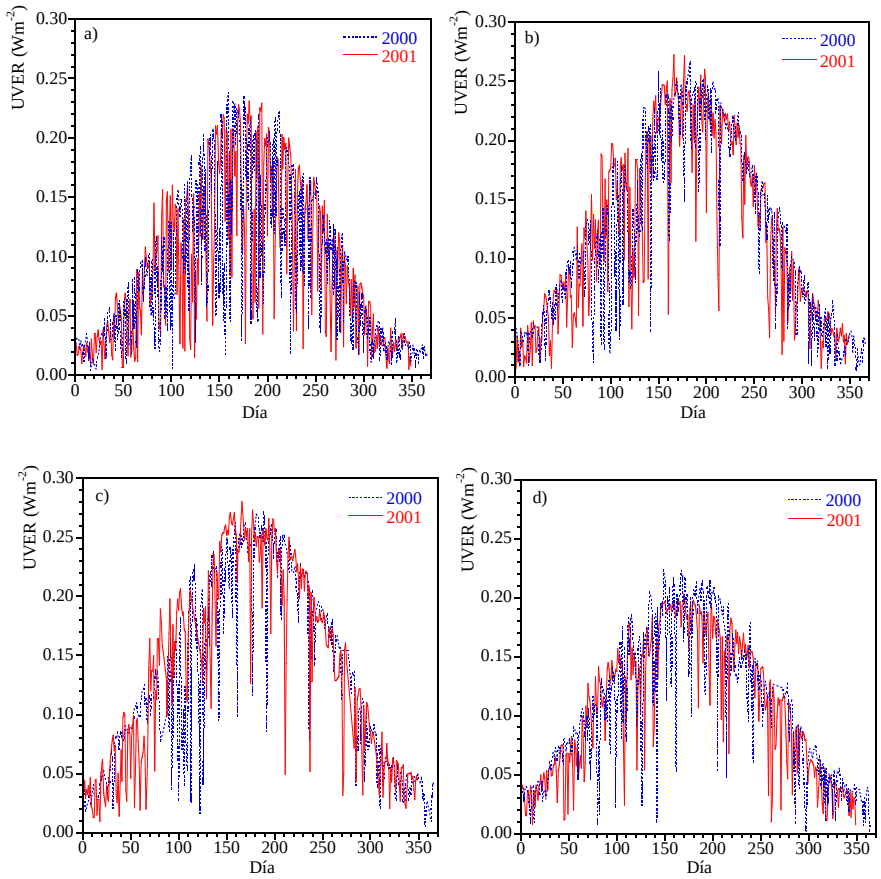


Figura 5.1.- Evolución anual del UVER para los años 2000 y 2001. a) Santander, b) Madrid, c) Ciudad Real y d) Valencia.

En la Tabla 5.1, 5.2 y 5.3 se detallan las diferencias (en unidades de Índice UV) entre el Índice UV máximo diario y el Índice UV a las 12 GMT para el año 2000, 2001 y ambos a la vez respectivamente. En estos casos se han considerado las once estaciones de la red.

Tabla 5.1.- Diferencia entre el Índice UV máximo diario y a las 12 GMT (en unidades de Índice UV) expresado en % de los valores diarios. Año 2000.

Estaciones	Datos	0	1	2	3 ó más
La Coruña	358	69	21	7	3
Santander	364	70	21	5	4
Valladolid	363	77	15	6	2
Zaragoza	348	78	15	4	3
Barcelona	349	76	14	6	4
Madrid	366	77	18	4	1
Badajoz	356	79	15	4	2
Ciudad Real	342	79	12	6	3
Valencia	366	83	13	3	1
Palma Mallorca	328	83	13	2	2
Murcia	354	82	14	3	1

Tabla 5.2.- Diferencia entre el Índice UV máximo diario y el de las 12 GMT (en unidades de Índice UV) expresado en % de los valores diarios. Año 2001.

Estaciones	Datos	0	1	2	3 ó más
La Coruña	322	68	23	7	2
Santander	349	64	29	5	2
Valladolid	334	75	18	4	3
Zaragoza	331	77	17	4	2
Barcelona	336	74	19	4	3
Madrid	348	76	18	5	1
Badajoz	181	88	9	1	2
Ciudad Real	318	80	16	3	1
Valencia	348	85	12	2	1
Palma Mallorca	348	82	13	3	2
Murcia	332	83	14	2	1

Tabla 5.3.- Diferencia entre el Índice UV máximo diario y el de las 12 GMT (en unidades de Índice UV) expresado en % de los valores diarios. Años 2000 y 2001.

Estaciones	Total	0	1	2	3 ó más
La Coruña	680	68	22	7	3
Santander	713	67	25	5	3
Valladolid	697	76	17	5	2
Zaragoza	679	78	16	4	2
Barcelona	685	75	16	5	4
Madrid	714	76	18	4	2
Badajoz	537	82	13	3	2
Ciudad Real	660	79	14	5	2
Valencia	721	84	13	2	1
Palma Mallorca	676	82	13	3	2
Murcia	686	83	14	2	1

Existe coincidencia o discrepancia en una unidad entre el Índice UV máximo diario y el de las 12 GMT de al menos el 90% en todas las estaciones consideradas y para los dos años estudiados. Esta afirmación nos permitirá realizar la predicción del Índice UV en la Comunidad Valenciana a las 12 GMT sabiendo que es una buena aproximación del valor máximo diario. En el caso de Valencia se produce una coincidencia o discrepancia en una unidad en el 96% de los casos para el año 2000 y del 97% para el año 2001. En cuanto a las estaciones con un porcentaje más elevado de discrepancia en tres o más unidades de Índice UV se encuentran las que tienen un predominio de cielos nubosos, por ejemplo La Coruña y Santander con un 3% y por último Barcelona con un 4%. En cuanto a las estaciones con mayor coincidencia o discrepancia en una unidad, por encima del 95%, están Badajoz, Valencia, Palma de Mallorca y Murcia que coincide con las estaciones de predominio de días despejados.

Las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6 muestran los valores del Índice UV en cada una de las estaciones de medida y su recurrencia para los años 2000, 2001 y ambos a la vez respectivamente.

Tabla 5.4.- Valores del Índice UV máximo (en %). Año 2000.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
La Coruña	4	21	12	11	9	10	7	10	8	8	1	0
Santander	3	24	12	11	10	9	9	9	9	5	0	0
Valladolid	1	16	13	9	11	9	7	7	6	11	11	0
Zaragoza	2	12	15	10	8	11	7	8	11	10	7	0
Barcelona	0	17	19	9	8	8	8	12	13	6	1	0
Madrid	2	13	13	10	10	7	8	7	9	12	8	1
Badajoz	3	6	17	9	10	12	8	6	8	10	9	1
Ciudad Real	0	5	16	11	10	8	6	8	7	12	14	2
Valencia	1	11	16	12	10	12	11	10	13	3	0	0
P. Mallorca	0	6	19	7	12	8	12	15	15	7	0	0
Murcia	1	3	12	15	14	9	6	10	13	15	3	0

Tabla 5.5.- Valores del Índice UV máximo (en %). Año 2001.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
La Coruña	2	15	15	12	9	5	13	11	10	8	1	0
Santander	1	21	13	12	11	7	12	9	10	4	0	0
Valladolid	1	13	11	12	5	9	10	11	9	12	7	0
Zaragoza	0	10	16	10	7	8	10	12	12	11	4	0
Barcelona	0	9	16	11	10	10	13	10	13	8	0	0
Madrid	1	11	13	12	9	7	8	10	9	13	7	1
Badajoz	3	6	17	9	10	12	8	6	8	10	9	1
Ciudad Real	0	8	15	11	6	5	7	11	8	9	15	4
Valencia	0	12	17	9	8	12	16	13	12	0	0	0
P. Mallorca	1	9	17	12	7	7	14	12	17	5	0	0
Murcia	0	4	17	11	7	7	14	12	10	16	2	0

Tabla 5.6.- Valores del Índice UV máximo (en %). Años 2000 y 2001.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
La Coruña	3	18	13	11	9	8	10	10	9	8	1	0
Santander	2	22	13	11	10	8	10	9	10	5	0	0
Valladolid	1	14	12	11	8	9	8	9	7	11	9	0
Zaragoza	1	11	16	10	8	10	8	10	11	11	5	1
Barcelona	0	13	17	10	9	9	11	11	13	7	0	0
Madrid	1	12	13	11	10	7	8	9	9	12	8	1
Badajoz	2	6	17	11	9	10	8	7	8	12	9	1
Ciudad Real	0	7	16	11	8	6	7	9	8	11	14	3
Valencia	1	12	16	11	9	12	13	12	12	2	0	0
P. Mallorca	0	7	18	10	9	8	13	13	16	6	0	0
Murcia	1	3	14	13	11	8	10	11	12	15	2	0

En base a las tablas anteriores se puede concluir que en todas las estaciones se alcanza valores del Índice UV de 9 ó más, considerados valores muy altos por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2003). En segundo lugar, los valores máximos son más dependientes de la ubicación de la estación de medida, costanera o de interior, que de la latitud y de acuerdo con los valores anteriormente expuestos se podrían clasificar las estaciones en dos grupos:

- Litorales: La Coruña, Santander, Barcelona, Valencia y Palma de Mallorca.

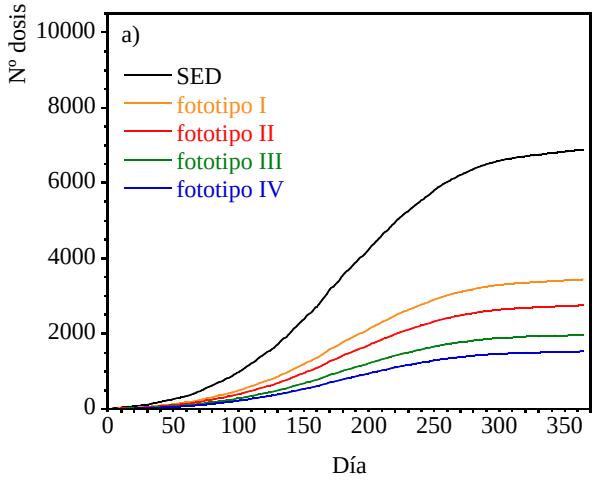
- Interiores (más de 200 km de la costa): Valladolid, Zaragoza, Madrid, Ciudad Real y Badajoz.

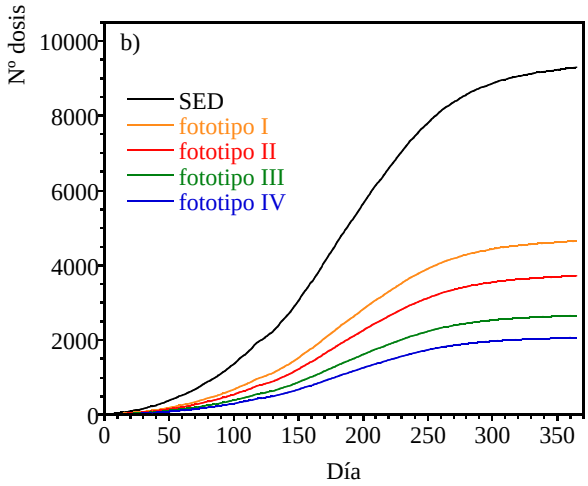
Las estaciones del primer grupo presentan un máximo de 9 (ocasionalmente alcanzan un valor de 10, en concreto cinco veces en La Coruña, en dos ocasiones en Barcelona y una en Santander en el cómputo total de los años 2000 y 2001), mientras que el segundo grupo frecuentemente alcanza valores de 10 en primavera y verano y excepcionalmente el valor de 11 (en diecinueve ocasiones en Ciudad Real, en siete ocasiones en Zaragoza, cuatro en Badajoz y Madrid y una vez en Valladolid). La estación de Murcia es una excepción porque aunque su clima es considerado de tipo continental, la proximidad al mar (50 km) y el relieve que rodea la ciudad que arrastra la brisa procedente del Mediterráneo podría explicar la

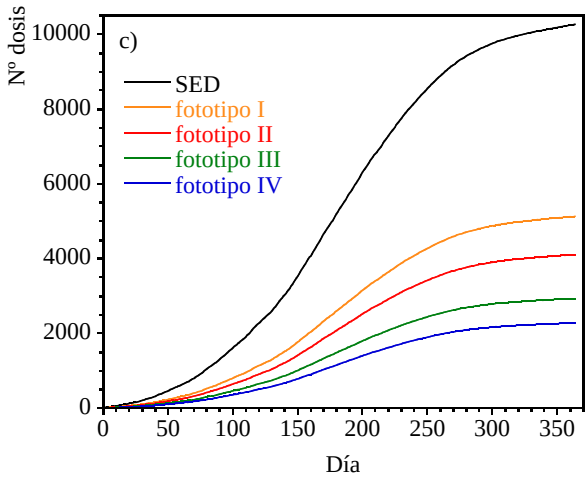
dificultad de ubicar esta estación en alguno de los dos grupos previamente especificados. Además el valor más alto de Índice UV suele ser 9 aunque alcanza el valor 10 en 17 ocasiones.

Aunque las estaciones del interior están situadas a mayor altura que las costeras, ninguna de ellas supera los 750 m. Este hecho podría inducir a considerar como justificación de las diferencias existentes entre estaciones de interior y costeras una cierta dependencia de los aerosoles atmosféricos, relacionados con el predominio de vientos existentes en cada ubicación. En las localidades situadas junto al Mediterráneo existe una típica situación sinóptica de verano en la que hay vientos marítimos fuertes que pueden conducir a altos valores de espesor óptico de aerosoles (Martínez-Lozano *et al.*, 2001).

En la Figura 5.2, se ha representado el número de dosis eritemáticas acumuladas en un año. Se ha considerado los distintos fototipos y también la dosis eritemática estándar, definidos en la Tabla 1.2, en las mismas estaciones que en la Figura 5.1, es decir, Santander, Madrid, Ciudad Real y Valencia, aunque hay otros ejemplos en Martínez-Lozano *et al.*, (2002a). Se ha representado la media aritmética entre los años 2000 y 2001.




b)
Nº dosis
10000
8000
6000
4000
2000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
Día
SED
fototipo I
fototipo II
fototipo III
fototipo IV


c)
Nº dosis
10000
8000
6000
4000
2000
0
0
50
100
150
200
250
300
350
Día
SED
fototipo I
fototipo II
fototipo III
fototipo IV

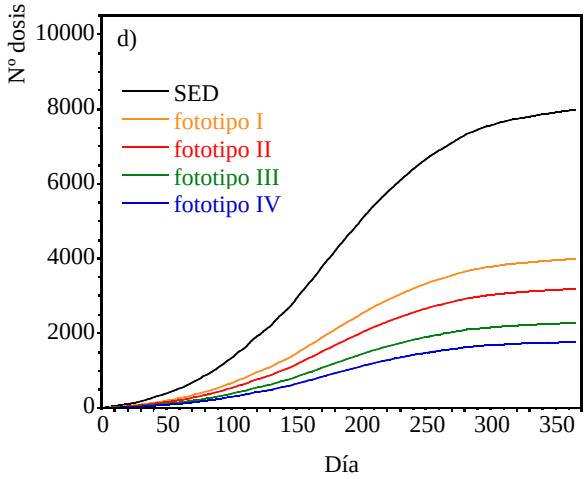


Figura 5.2.- Dosis eritemática acumulada anualmente según el fototipo o dosis eritemática estándar (SED). Promedio años 2000 y 2001.
a) Santander, b) Madrid, c) Ciudad Real y d) Valencia.

En la Figura 5.2 se pone de manifiesto que existe diferencias significativas en la cantidad de energía recibida anualmente en las estaciones. Así mientras que en Valencia se reciben 8000 SED anuales en Ciudad Real se reciben más de 10000, es decir un 25% más. Además un porcentaje muy elevado de la energía total se recibe en verano, en concreto el 38% y el 51% del total anual se recibe en los tres meses de verano en Valencia y en Madrid respectivamente. En las figuras este porcentaje se representa con un cambio de pendiente acusado en esta época del año.

5.2.- Resultados experimentales de la red de la Comunidad Valenciana

a) Calibración

En el Capítulo 2 de la presente memoria ya se indicó la importancia que tiene la calibración de los sensores de medida. En el caso de la red de la Comunidad Valenciana, que se puso en marcha a principios del 2002, los radiómetros han sido calibrados en dos ocasiones por intercomparación con otro UVB-1 que ejerce de patrón y que transfiere su calibrado. A su vez el patrón también debe estar

previamente calibrado. En la primera ocasión se hizo por intercomparación con los sensores análogos de la red del INM, en la campaña de Veleta 2002 (Alados *et al.*, 2003). En la segunda ocasión se realizó una calibración estándar en El Arenosillo, en 2005, tal y como se detalló en el Capítulo 2. En ambos casos se trata de una calibración en UVER ya que, dada la respuesta espectral del instrumento, similar a la del espectro eritemático, es la magnitud para la que están preparados para medir. Sin embargo, de acuerdo con el fabricante, también es capaz de convertir la señal de voltaje que monitoriza en UVB con una adecuada constante de conversión. De hecho en el calibrado de fábrica se proponen dos constantes distintas en función de la magnitud a considerar, UVB o UVER. Suponiendo que la relación entre UVB y UVER se mantuviera constante podríamos deducir las nuevas constantes de conversión de UVB a partir del calibrado realizado para la UVER. Según el fabricante (YES, 2000), el rango UVB (280-315 nm) es 7.75 veces la UVER. A partir de algunas medidas realizadas con el espectrorradiómetro OL-754 y algunas simulaciones con modelos de transferencia radiativa hemos hallado que el rango de UVB está comprendido entre 7.5 y 8 veces la UVER, aunque son resultados preliminares que habría que extender para consolidar este dato y poder trabajar con el rango UVB a partir del calibrado de eritemática. A pesar de haber calculado con este procedimiento las constantes de conversión para el UVB, Tablas 5.7 y 5.8, en este trabajo nos hemos centrado en la UVER y en el Índice UV en todos los resultados.

Tabla 5.7.- Constantes de conversión del patrón de calibrado.

Año	UVER (W/m^2 V)	UVB (W/m^2 V)
2001	0.141	1.093
2002	0.117	0.907
2005	0.128	0.992

El primer calibrado, supone un decremento del 17% con respecto a la constante de conversión original del instrumento. En cuanto al segundo calibrado, realizado en 2005, dio lugar a una matriz dependiente del ángulo cenital y del ozono, cuya representación gráfica está en el Capítulo 2, Figura 2.6, y cuya matriz de datos está en el Anexo B. Sin embargo dadas las condiciones de ozono en Valencia, con un rango de variación reducido, se podría tomar el valor de 0.128 W/m^2 V para la UVER y de 0.992 W/m^2 V para el rango del UVB. Estos valores se deducen de la relación lineal que existe entre los valores de la UVER aplicando una constante de conversión dependiente del ángulo cenital y del ozono, matriz ADACAL, y la señal de radiómetro sin corregir y en voltios, Figura 5.3. Dado el

valor tan alto del coeficiente de correlación se puede afirmar que se trata de una buena aproximación. Considerando estos valores como los resultantes del nuevo calibrado, se produce un incremento del 9% con respecto al calibrado anterior y una disminución del 9% con respecto al calibrado dado por el fabricante.

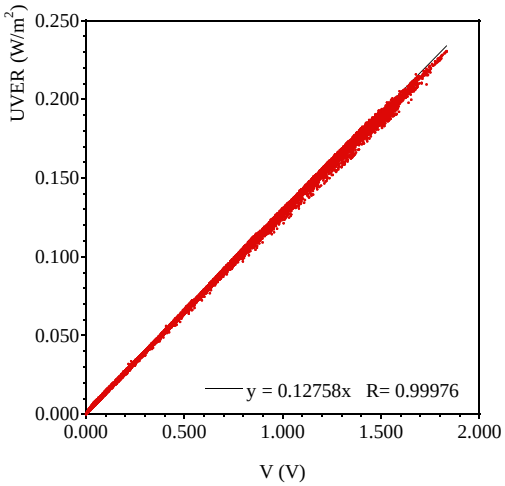


Figura 5.3.- Relación entre la UVER corregida en función del ángulo cenital y el ozono y el voltaje del radiómetro.

Las nuevas constantes de conversión de los sensores de la red se detallan en la Tabla 5.8. El método utilizado para la calibración de estos sensores es el de la intercomparación con un radiómetro patrón. Además se ha medido con un espectrorradiómetro, OL-754 en los dos calibrados efectuados y en el último caso también se midió con un espectrorradiómetro Li-1800. Excepcionalmente, el sensor ubicado en la estación de Aras de los Olmos se recalibró durante el mes de Diciembre de 2004. El resultado para ese radiómetro fue de 0.131 $W/m^2 \cdot V$ para la constante de UVER y de 1.023 $W/m^2 \cdot V$ para la constante de UVB. En el caso del calibrado del 2003 se realizó durante la semana del 22 al 28 de Mayo. En el caso del calibrado del 2005 la intercomparación se realizó entre los días 3 y 14 de Marzo.

Tabla 5.8.- Constantes de conversión de los radiómetros de la red de la Comunidad Valenciana.

Año	2001		2003		2005	
(W/m^2 V)	UVER	UVB	UVER	UVB	UVER	UVB
P. Cabanes	0.141	1.093	0.119	0.926	0.130	1.008
Aras Olmos	0.141	1.093	0.126	0.975	0.145	1.124
Valencia	0.141	1.093	0.120	0.927	0.131	1.015
Denia	0.141	1.093	0.116	0.897	0.123	0.953
Torrevieja	0.141	1.093	0.114	0.887	0.126	0.977

En el caso del último calibrado, en 2005, se ha obtenido por transferencia de calibración, una matriz de constantes de conversión análoga a la del sensor patrón. La matriz correspondiente a cada uno de los sensores se puede consultar en el Anexo B de esta memoria. Sin embargo analizando los datos de la columna de ozono del TOMS para estas latitudes, como se detalla en la Tabla 5.9, se observa como los valores más usuales están en torno a los 310 DU. Se ha realizado un pequeño estudio estadístico de 1140 datos de ozono correspondientes a un periodo comprendido entre los años 2002 y 2005. La media de estos valores está entre 310 y 320 DU y la moda, es decir, el valor más repetido entre 300 y 330 DU. La mediana está comprendida entre 310 y 315 DU para todos los casos. Esto implica que las constantes de conversión que habría que utilizar serían mayoritariamente aquellas cuyo valor de ozono correspondan con estos datos. Por eso es posible calcular un sólo valor como representativo de la constante de calibrado. Las nuevas constantes de conversión se calculan a partir de la relación en voltaje existentes entre los distintos piranómetros y posteriormente haciendo el producto por la constante de conversión del radiómetro patrón.

Los valores de ozono asignados a Aras de los Olmos y Valencia son coincidentes porque corresponden a la misma cuadrícula en la rejilla de coordenadas que ofrece el TOMS de 1.25º de longitud y 1º de latitud. Además los valores de las constantes de conversión resultantes son los que corresponden a la región de los 320 DU en la matriz ADACAL y para ángulos cenitales no extremos, lo que confirma que se trata de una buena aproximación, por estar en el rango de los valores más probables en estas ubicaciones.

Tabla 5.9.- Un análisis estadístico de los valores de la columna de ozono del TOMS.

O_3 (DU)	P. Cabanes	Aras Olmos	Valencia	Denia	Torrevieja
Media	317	314	314	315	312
Moda	327	317	317	303	313
Mínimo	185	186	186	191	187
Máximo	490	478	478	490	461
Mediana	315	312	312	312	310

En la Tabla 5.10, se muestra la evolución de las constantes de conversión obtenidas en los distintos calibrados, con respecto al valor anterior. Así en las constantes de conversión del 2003 se observa que ha disminuido con respecto al 2001 en más de un 15%, excepto en Aras de los Olmos. Sin embargo en la segunda intercomparación los valores aumentan con respecto a la de 2003 en todos los casos. Teniendo en cuenta el valor dado por el fabricante y el último calibrado, los valores aumentan sólo en Aras de los Olmos mientras que disminuyen para el resto de estaciones entre un 7 y un 13%.

Tabla 5.10.- Evolución de las constantes de calibrado, con respecto a las anteriores.

Año	2001-2003	2003-2005	2001-2005
P. Cabanes	-16%	+9%	-8%
Aras Olmos	-11%	+15%	+3%
Valencia	-15%	+9%	-7%
Denia	-18%	+6%	-13%
Torrevieja	-19%	+11%	-11%

b) Bases de datos. Filtrado

La red de medida de UVB y UVER de la Comunidad Valenciana empezó a operar en pruebas a finales del 2001 pero no estuvo completamente operativa hasta Febrero de 2002. Actualmente se registran datos cada segundo y se hace un promedio cada minuto que es el dato que se almacena. Estos datos han de pasar por un filtrado para eliminar aquellos que no tienen sentido físico. Algunos de ellos

vienen invalidados de la estación de medida y están marcados con un *flag* o indicador que especifica el tipo de irregularidad, fundamentalmente fallos en la red eléctrica o datos insuficientes para registrar debidos a la existencia de menos de 54 medidas válidas de las 60 que debería tomar en un minuto.

En cuanto al filtrado efectuado a posteriori se considera que no tienen sentido físico los datos distintos de cero anteriores al orto y posteriores al ocaso, los datos negativos o aquellos que son nulos a horas centrales del día. También se filtran los datos de irradiancia anormalmente elevada. Para ello se calcula el índice de claridad para UVB, ecuación 5.1, (Marín *et al.*, 2001) y se deduce de esta expresión que la irradiancia de UVB no puede ser mayor del producto del índice de claridad por el ángulo cenital y por la irradiancia extraterrestre en ese rango. Si algún valor de irradiancia UVB fuese mayor que esta cantidad, se eliminaría por no ser válido.

$$k_{TUVB} = \frac{I_{UVB}}{I_0 \cdot \cos\theta}. \qquad (5.1)$$

c) Evolución de la UVER

En este apartado vamos a mostrar la evolución de la UVER para los años 2002, 2003 y 2004. La constante de conversión o constante de calibrado que se ha utilizado es el valor de la calibración del 2003 para los años 2002 y 2003 y el valor del calibrado del 2005 para el año 2004. Hemos tomado ese criterio por ser el calibrado más próximo temporalmente a los datos experimentales. También se justifica a partir de la Figura 5.4 en la que se muestra el voltaje medido por el radiómetro UVB-1 para tres años consecutivos desde 2002 a 2004 y se aprecia como en los dos primeros años la señal registrada es del mismo orden de magnitud mientras que en el tercero hay una disminución lo que justifica la utilización de una constante de conversión mayor que la del 2003, como resulta ser la del 2005. Este comportamiento se da en todas las estaciones de medida, aunque sólo se ha representado la de Valencia, a modo de ejemplo. Una excepción es Aras de los Olmos, que se realizó un calibrado adicional a finales del 2004 y es que el que se aplicará para los datos de ese año y esa estación.

Con el criterio de las constantes de calibrado explicado anteriormente se ha representado la evolución anual de la UVER correspondiente a las 12 GMT para los años 2002 a 2004 y para cada estación, Figura 5.5.

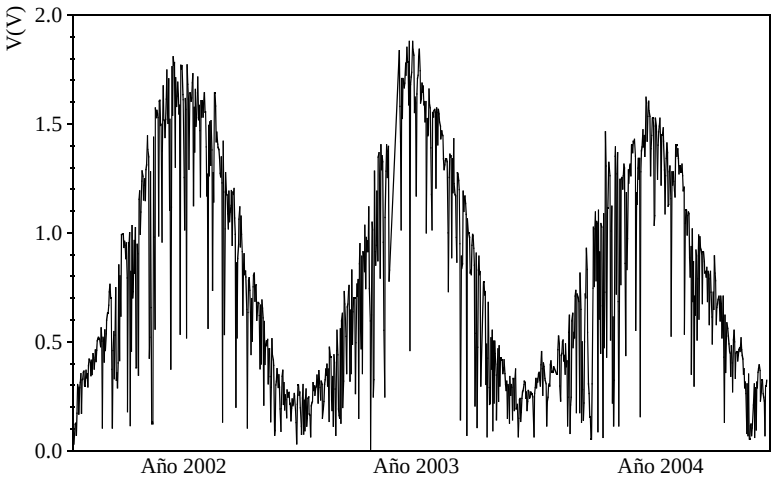
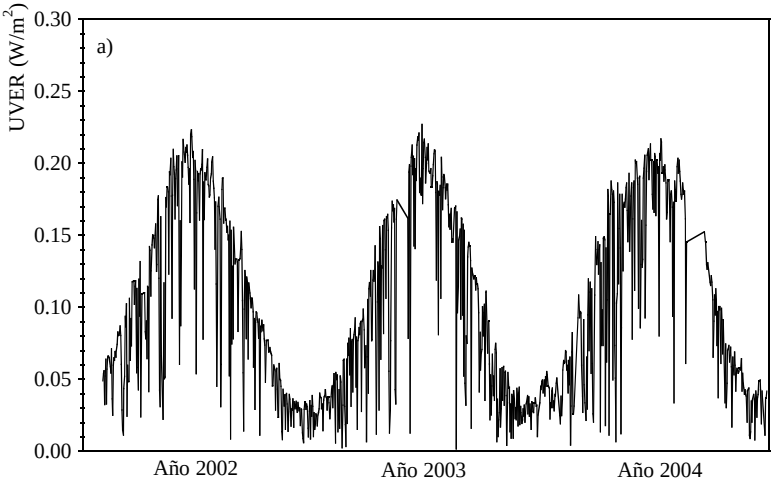
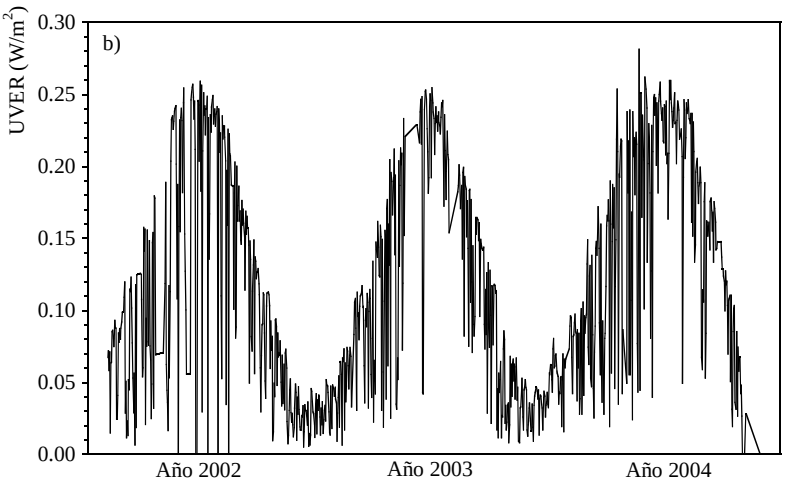
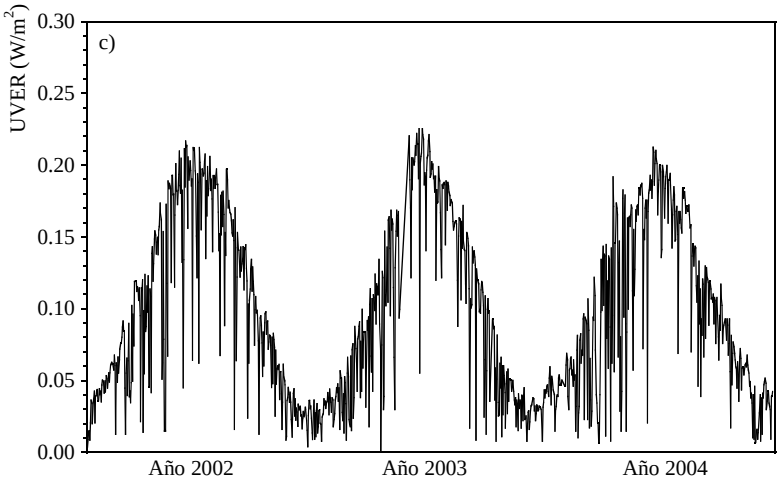
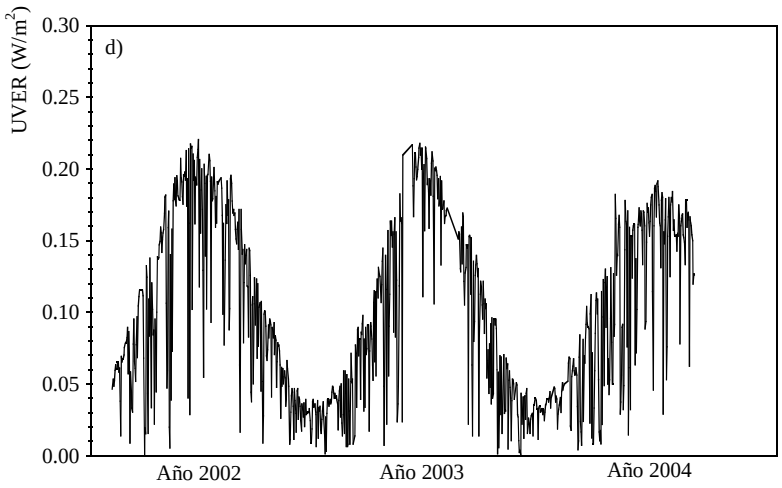


Figura 5.4.- Evolución anual del voltaje medido con el radiómetro de Valencia, desde el 2002 hasta el 2004.




b)
UVER (W/m2)
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
Año 2002
Año 2003
Año 2004


c)
UVER (W/m2)
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
Año 2002
Año 2003
Año 2004



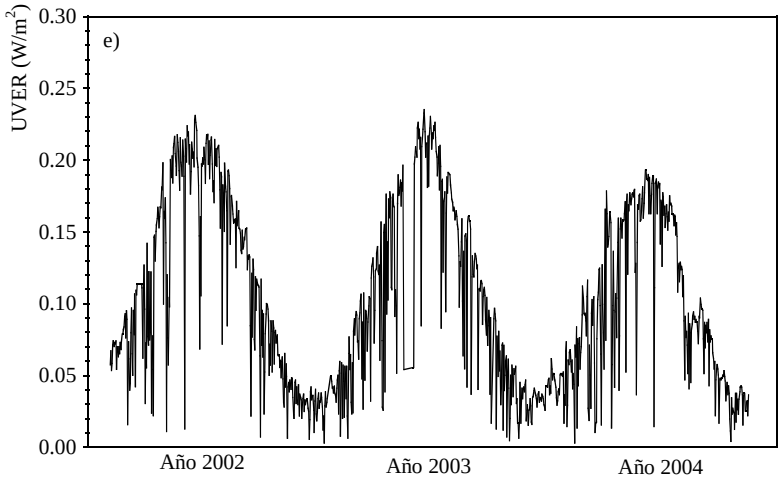


Figura 5.5.- Evolución de la UVER para los años 2002, 2003 y 2004.
a) Prat de Cabanes, b) Aras de los Olmos, c) Valencia, d) Denia y e) Torrevieja.

A partir de la representación gráfica de la evolución de la UVER para tres años consecutivos es posible extraer algunas conclusiones. Cabe destacar que el año 2002 fue un año con predominio de cielos nubosos con respecto a los otros dos años siguientes, como se aprecia en la Figura 5.5 b), correspondiente a Aras de los Olmos. Por otro lado, ésta es la estación en la que se aprecian máximos más acentuados en todo el periodo de estudio. Esto se debe principalmente al efecto de altura, ya que es la única que está situada a una cierta altura con respecto al nivel del mar (aproximadamente 1300 m) pero también contribuye el efecto de estar alejada del mar, como se comentó en el apartado 5.1. Durante el año 2004 disminuyó el valor máximo de la UVER con respecto a los años previos. Esto se aprecia principalmente en las estaciones de Denia y Torrevieja, Figura 5.5 d) y e) respectivamente. En la Tabla 5.11 se muestran los valores de la UVER máximos por año y por estación. En Prat de Cabanes, Valencia y Torrevieja los valores más altos corresponden al año 2003. Sin embargo, en Aras de los Olmos corresponde al 2004 mientras que en Denia corresponde al 2002. En el caso de Valencia es posible comparar estos valores con los análogos del sensor de INM situado en la misma ciudad y que registró un valor máximo del UVER de 0.225 W/m^2 para el año 2000 y de 0.203 W/m^2 para el año 2001.

Tabla 5.11.- Valores máximos anuales de la UVER a las 12 GMT.

UVER (W/m^2)	P.Cabanes	Aras Olmos	Valencia	Denia	Torrevieja
Año 2002	0.223	0.259	0.217	0.221	0.231
Año 2003	0.227	0.255	0.226	0.218	0.235
Año 2004	0.217	0.281	0.216	0.192	0.193

d) Índice UV a las 12 GMT

A partir de los datos de la UVER a las 12 GMT se ha calculado el Índice UV a esa misma hora para los años 2002, 2003, 2004 por separado y también considerando los tres años conjuntamente. Este estudio se ha realizado para cada estación de medida y los resultados se muestran en las Tablas 5.12 a 5.16.

Tabla 5.12.- Recurrencia del Índice UV a las 12 GMT (en %). Prat de Cabanes.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Datos
2002	7	17	16	12	10	8	9	14	7	0	0	330
2003	12	27	10	11	8	7	10	10	5	0	0	344
2004	7	22	17	7	7	8	8	17	7	0	0	314
Todos	9	22	14	10	8	8	9	14	6	0	0	988

Tabla 5.13.- Recurrencia del Índice UV a las 12 GMT (en %). Aras de los Olmos.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Datos
2002	12	14	16	10	10	7	7	4	5	13	2	332
2003	11	25	13	7	9	7	6	7	6	8	1	325
2004	4	11	14	10	7	8	9	7	10	16	3	300
Todos	10	17	14	9	9	7	7	6	7	12	2	957

Tabla 5.14.- Recurrencia del Índice UV a las 12 GMT (en %). Valencia.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Datos
2002	10	21	13	11	9	8	8	15	5	0	0	365
2003	11	26	10	10	11	6	10	9	6	1	0	346
2004	8	18	17	13	9	8	12	13	2	0	0	361
Todos	10	22	14	11	9	8	10	12	4	0	0	1072

Tabla 5.15.- Recurrencia del Índice UV a las 12 GMT (en %). Denia.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Datos
2002	7	18	14	13	10	7	10	15	6	0	0	328
2003	12	27	11	10	9	7	10	8	6	0	0	326
2004	13	17	13	9	5	8	25	10	0	0	0	251
Todos	10	21	13	11	9	7	14	11	4	0	0	905

Tabla 5.16.- Recurrencia del Índice UV a las 12 GMT (en %). Torrevieja.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Datos
2002	5	15	16	12	9	6	10	14	12	1	0	329
2003	8	25	13	11	9	7	9	8	9	1	0	341
2004	7	22	15	17	8	5	16	10	0	0	0	325
Todos	7	20	15	13	9	6	12	10	7	1	0	995

Como ya ocurriera con la UVER, los valores más altos del Índice UV se presentan en la estación de Aras de los Olmos, Tabla 5.13 de esta memoria, donde puede verse como un 2% de los valores es de 10, un valor considerado muy alto según la clasificación de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2003). La segunda estación donde se registran los valores más elevados es Torrevieja, manifestándose aquí el efecto de latitud ya que se trata de la región más meridional. En este caso el 1% de los valores alcanza el valor de 9, Tabla 5.16. Sin embargo en el resto de estaciones no se alcanzan valores de 9 ó 10 en un porcentaje significativo. Cabe resaltar que tampoco se registran valores mayores de 8 para el año 2004 para Denia y Torrevieja, lo que indica la disminución de los valores de la UVER tal y como se comentó anteriormente.

5.3.- Predicción del Índice UV

La predicción del Índice UV normalmente se efectúa mediante modelos de transferencia radiativa que calculan la irradiancia solar UV que atraviesa la atmósfera y llega a la superficie terrestre. La mayoría de estos modelos son capaces de calcular el Índice UV directamente (Koepke *et al.*, 1998), en otro caso se aplica la ecuación 1.2 de esta memoria a la irradiancia espectral. Los datos de entrada necesarios son la época del año, especificando la fecha y hora, el lugar, identificado por la longitud y latitud, la altura del terreno sobre el nivel del mar y el valor de la columna vertical de ozono, básicamente. Algunos modelos permiten incluir otros datos de entrada, como medidas de aerosoles o presencia de nubes.

Para realizar la predicción del Índice UV y antes de optar por un modelo en concreto se analizaron varios de ellos en función de sus diferentes características. Un pequeño resumen del análisis previo, que se realizó con datos de Noviembre de 2002, se incluye en la Tabla 5.17. Analizando la coincidencia o discrepancia en una unidad entre el Índice UV experimental y el simulado con los modelos, los mejores resultados se dan con el UVA_GOA y SBDART según estaciones. El SBDART es el más favorable para Valencia, Denia y Torrevieja mientras que el UVA_GOA lo es para Prat de Cabanes y Aras de los Olmos.

Finalmente se optó por implementar el SBDART por ser un modelo muy completo y que da buenos resultados en todos los casos. Se trata de un modelo de dispersión múltiple de acuerdo con las directrices de la acción COST 713[6] y es también el modelo utilizado en Cataluña para hacer la predicción del Índice UV que ofrece el Servei Meteorològic de Catalunya en su página web[7]. La elección de este modelo ha permitido hacer comparaciones entre las dos redes de medida de UVB, similares y pioneras en el ámbito autonómico en España, ambas con una estación en altura (Marín *et al.*, 2005). Los parámetros de entrada necesarios para hacer la predicción del Índice UV son los que se describieron a modo de ejemplo en la Figura 3.1 con excepción del tratamiento de los aerosoles. Para efectuar la predicción del Índice UV no se dispone del dato de espesor óptico de aerosoles para el día siguiente así que sólo se especifica el tipo de modelo de aerosoles. Tampoco se dispone de información del albedo y no se especifica como parámetro de entrada. Como se trata de albedos no muy elevados la información no es crítica como lo

[6] http://www.who.int/uv/resources/recommendations/COST713.pdf

[7] http://www.meteocat.com/marcs/marcos_previsio/marcs_uvi.htm

sería si estuviéramos considerando planos inclinados o superficies altamente reflectantes como la nieve. El dato de ozono utilizado como parámetro de entrada es el proporcionado por el TOMS para el día anterior, es decir que suponemos la persistencia en el dato del ozono.

Tabla 5.17.- Diferencia entre datos simulados y experimentales del Índice UV (en %).

Unidades de Índice UV		SBDART	STAR	UVA_GOA
Prat de Cabanes	0	33	50	37
	1	60	37	60
	2	7	13	3
Aras de los Olmos	0	37	36	27
	1	50	50	63
	2	13	13	10
Valencia	0	54	57	60
	1	43	36	37
	2	3	6	3
Denia	0	67	63	67
	1	27	30	27
	2	6	7	6
Torrevieja	0	68	69	67
	1	28	24	23
	2	4	7	10

5.4.- Comparación de las medidas con la predicción

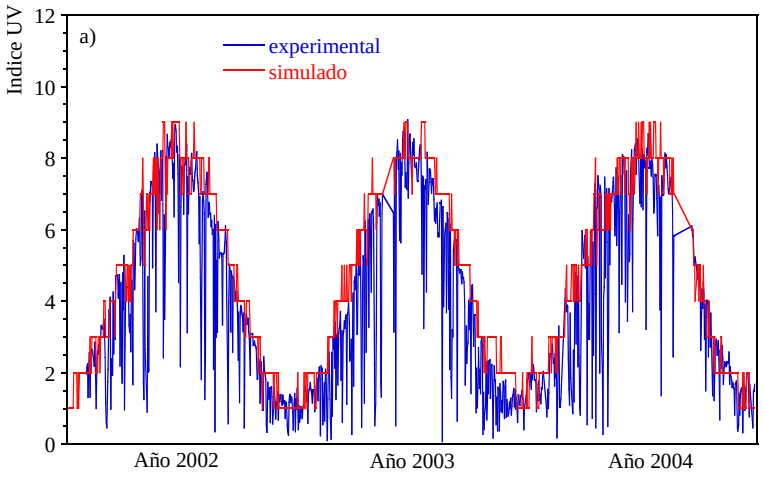
La finalidad de la predicción del Índice UV es dar con algunas horas de antelación el valor previsto del Índice UV. Para evaluar la bondad de esa predicción es necesario validarla con los datos experimentales registrados posteriormente. En la medida en que la predicción ha sido capaz de reproducir lo que registraron después los sensores de medida se considera su mayor o menor fiabilidad. En cualquier caso siempre es muy importante evitar una subestimación del valor del Índice UV porque eso significaría que la población podría no aplicar una medida de fotoprotección conveniente.

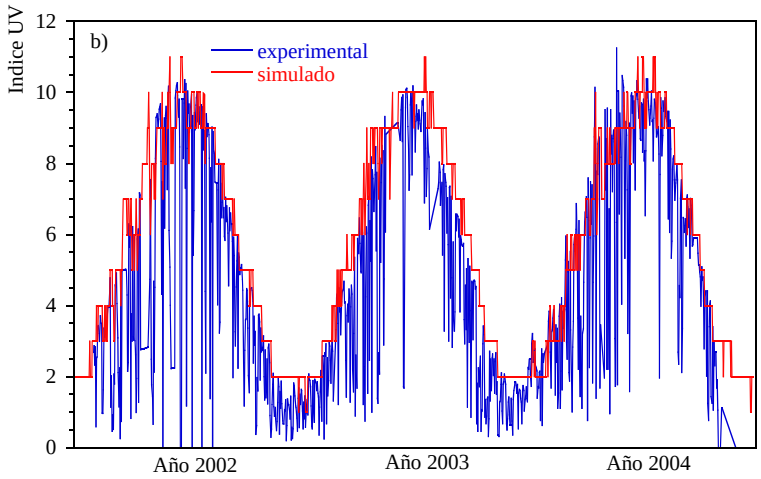
En la Figura 5.6 a) hasta e) se muestra el Índice UV a las 12 GMT experimental, considerando todos los días disponibles en un periodo de tres años desde el 2002 hasta el 2004, y el simulado mediante el modelo SBDART que a su vez hizo el papel de predicción para todas las estaciones de la red. Un análisis previo de los datos del sensor de Valencia se muestra en Marín *et al.*, (2003).

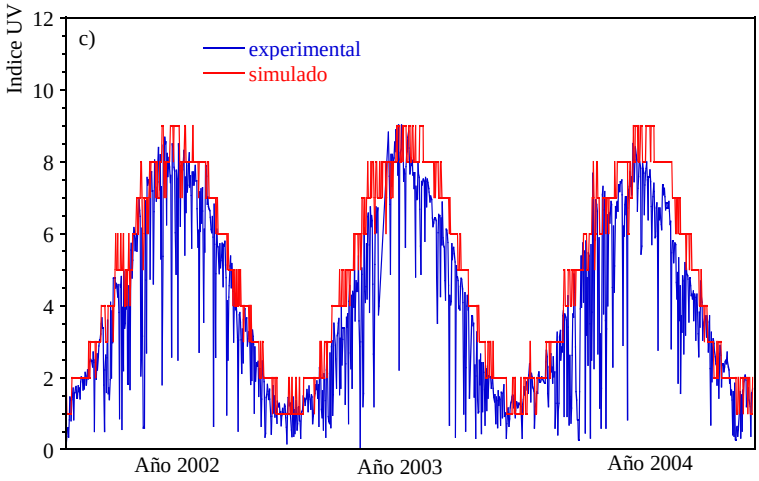
La curva de la predicción del Índice UV dibuja la envolvente de la curva que forma el Índice UV experimental, es decir, reproduce el valor de esta magnitud para días despejados y sobrestima el valor de la misma para días nubosos. Esta circunstancia se tiene en cuenta en la predicción que se publica en la página web, incluyendo el valor del Índice UV en los supuestos de nubosidad alta, media y baja en el caso más desfavorable de cielo totalmente cubierto, permitiendo así tener una estimación más realista en función de las condiciones meteorológicas, como se detalló en el Capítulo 4.

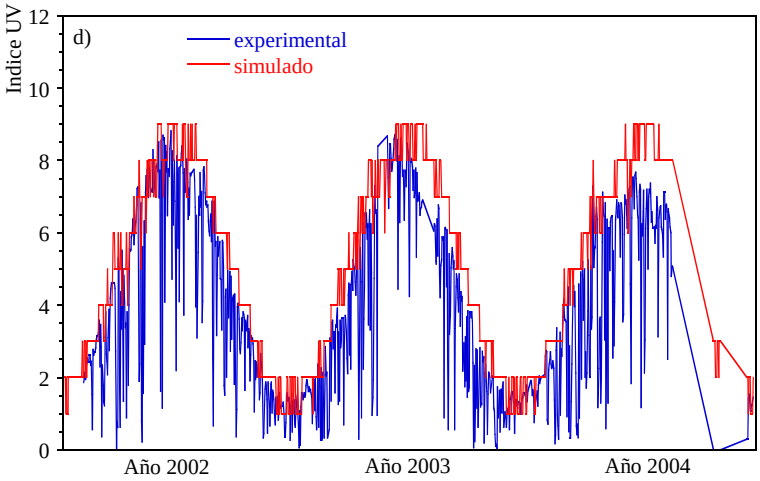
En el año 2004, con valores experimentales anormalmente bajos, se observa como la predicción es mayor que los valores experimentales principalmente en los meses de verano y especialmente en Denia y Torrevieja, Figuras 5.6 d) y e) respectivamente. En el caso de Aras de los Olmos, la estación que registra valores más elevados, la predicción con el modelo de aerosoles urbano que es el utilizado para el resto de estaciones, no reproduce bien los datos experimentales ya que infravalora el Índice UV. Como no disponemos de la información del régimen de aerosoles predominante, se había optado por utilizar en todos los casos el modelo urbano, ya que es válido para la región mediterránea (Utrillas *et al.*, 1998). Sin embargo, dada la ubicación de esta estación, en altura e interior, se ha tenido que tratar de manera especial. Se ha optado por repetir para esta memoria la predicción de los tres años con la última versión del modelo, la 2.4. Con la nueva versión se incrementa en un 5.5%/km el valor del UVER o del Índice UV. Incluso así la

predicción infravalora los valores del Índice UV considerando el modelo de aerosoles urbano por lo que se han simulado con otros modelos de aerosoles.






Indice UV
12
10
8
6
4
2
0
c)
experimental
simulado
Año 2002
Año 2003
Año 2004


Indice UV
12
10
8
6
4
2
0
d)
experimental
simulado
Año 2002
Año 2003
Año 2004

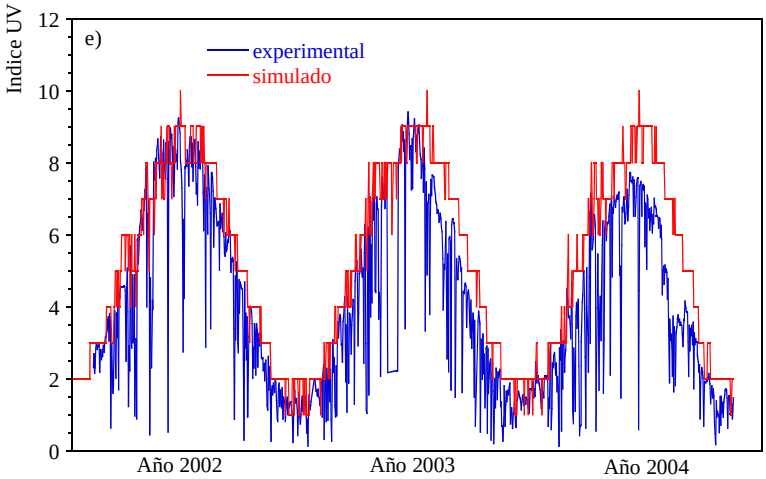


Figura 5.6.- Evolución del Índice UV a las 12 GMT experimental y simulado para los años 2002, 2003 y 2004. a) Prat de Cabanes, b) Aras de los Olmos, c) Valencia, d) Denia y e) Torrevieja.

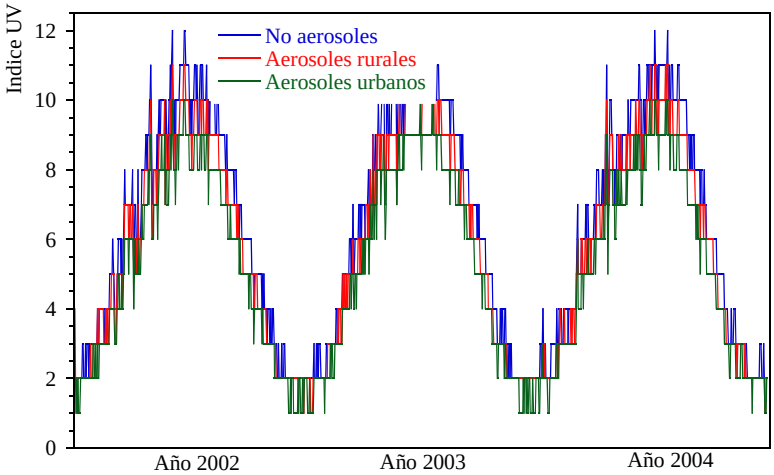


Figura 5.7.- Predicción del Índice UV para Aras de los Olmos, con tres tipos de aerosoles.

En la Figura 5.7 se ha representado la predicción del Índice UV para tres modelos de aerosoles distintos: urbano, rural y ausencia de aerosoles. El valor del Índice UV aumenta si consideramos tipo de aerosoles rural en vez de urbano y el valor más elevado se halla al estimar una atmósfera limpia, es decir en ausencia de aerosoles. Dado que el modelo más realista es el de aerosoles de tipo rural, y teniendo en cuenta que se ajusta mejor a los datos experimentales de un modo global, es el que finalmente se ha implementado y es el que se ha aplicado en la Figura 5.6 b).

Para evaluar cuantitativamente la bondad de la predicción se ha calculado la diferencia entre el Índice UV simulado y el experimental en unidades de Índice UV. Los resultados mostrados en porcentaje se presentan por estaciones y tanto anualmente como en el conjunto de los tres años, Tablas 5.18 a 5.22 y después desglosados mensualmente, Tablas 5.23 a 5.27.

Tabla 5.18.- Diferencia entre el Índice UV simulado y experimental (en %). Prat de Cabanes.

Año	0	1	2	3	>3
2002	47	33	9	4	7
2003	39	35	14	6	6
2004	45	36	10	2	7
Total	44	35	11	4	6

Tabla 5.19.- Diferencia entre el Índice UV simulado y experimental (en %). Aras de Olmos.

Año	0	1	2	3	>3
2002	27	38	12	7	16
2003	32	36	13	8	11
2004	31	40	11	7	11
Total	30	38	12	7	13

Tabla 5.20.- Diferencia entre el Índice UV simulado y experimental (en %). Valencia.

Año	0	1	2	3	>3
2002	43	40	9	2	6
2003	32	41	15	7	5
2004	34	39	13	7	7
Total	36	40	12	6	6

Tabla 5.21.- Diferencia entre el Índice UV simulado y experimental (en %). Denia.

Año	0	1	2	3	>3
2002	38	37	12	3	10
2003	31	38	16	8	7
2004	25	25	22	13	15
Total	32	34	16	8	10

Tabla 5.22.- Diferencia entre el Índice UV simulado y experimental (en %). Torrevieja.

Año	0	1	2	3	>3
2002	37	43	11	4	5
2003	28	46	13	5	8
2004	22	37	23	9	9
Total	29	42	16	6	7

En el conjunto de los tres años y en todas las estaciones se produce una coincidencia o discrepancia en una unidad en más del 65% en porcentajes que oscilan entre el 79% en Cabanes y el 66% en Denia. Cabe destacar aquí el bajo porcentaje que se da en Denia y Torrevieja para el año 2004 de coincidencia o discrepancia en una unidad, entre un 50% y un 59%, ya que se trata de datos experimentales anormalmente bajos.

En las Tablas 5.23 a la 5.28 se aprecia como el número de casos en que la diferencia entre el valor experimental y el simulado es de tres o mayor de tres unidades de Índice UV aumenta en los meses de primavera y verano. Por un lado es un efecto debido al hecho de que en esos meses del año se alcanzan valores superiores de radiación y por tanto la diferencia entre ambos valores puede ser mayor. También indica si se trata de meses más o menos nubosos, ya que en esos casos aumenta el porcentaje de altas discrepancias. En Aras de los Olmos y Torrevieja el mayor porcentaje se da en Abril en ese rango, lo que indica que es el mes más nuboso. En Prat de Cabanes, Valencia o Denia se alcanza en Mayo. En cuanto a la coincidencia o discrepancia en una unidad, se registran los valores más elevados en invierno, principalmente en Enero y en Diciembre con porcentajes mayores del 90%. En cuanto a los valores más pequeños de coincidencia o discrepancia en una unidad de Índice UV se producen en primavera, en Marzo en Cabanes y Valencia y en Abril en Aras de los Olmos. Sin embargo en Denia y Torrevieja se producen en Julio y Agosto lo cual es consistente con los valores anormalmente bajos del verano de 2004.

Tabla 5.23.- Diferencia entre el UVI simulado y experimental (%) por meses. P. Cabanes.

Meses	0	1	2	3	>3
Enero	63	37	0	0	0
Febrero	51	30	18	1	0
Marzo	27	33	20	14	6
Abril	41	30	12	7	10
Mayo	32	29	13	5	21
Junio	43	30	12	3	12
Julio	42	40	12	1	5
Agosto	26	52	5	4	13
Septiembre	48	26	9	8	9
Octubre	47	34	12	6	1
Noviembre	47	40	12	1	0
Diciembre	63	34	3	0	0

Tabla 5.24.- Diferencia entre el UVI simulado y experimental (%) por meses. A. Olmos.

Meses	0	1	2	3	>3
Enero	57	42	1	0	0
Febrero	46	39	10	5	0
Marzo	20	30	16	13	21
Abril	17	27	10	9	37
Mayo	14	34	15	9	28
Junio	38	30	6	5	21
Julio	31	51	7	6	5
Agosto	24	43	15	6	12
Septiembre	29	41	6	10	14
Octubre	31	27	20	15	7
Noviembre	36	37	20	7	0
Diciembre	27	59	14	0	0

Tabla 5.25.- Diferencia entre el UVI simulado y experimental (%) por meses. Valencia.

Meses	0	1	2	3	>3
Enero	64	35	1	0	0
Febrero	49	34	15	2	0
Marzo	26	29	20	13	12
Abril	28	36	13	12	11
Mayo	30	30	9	14	17
Junio	26	53	9	3	9
Julio	35	41	16	4	4
Agosto	10	56	21	4	9
Septiembre	24	47	14	6	9
Octubre	29	49	13	7	2
Noviembre	50	42	8	0	0
Diciembre	65	29	6	0	0

Tabla 5.26.- Diferencia entre el UVI simulado y experimental (%) por meses. Denia.

Meses	0	1	2	3	>3
Enero	66	34	0	0	0
Febrero	42	35	15	8	0
Marzo	30	29	16	9	16
Abril	35	29	9	8	19
Mayo	27	36	11	1	25
Junio	27	38	20	4	11
Julio	17	22	39	11	11
Agosto	16	44	15	13	12
Septiembre	17	39	20	14	10
Octubre	35	25	18	14	8
Noviembre	29	44	18	9	0
Diciembre	53	40	7	0	0

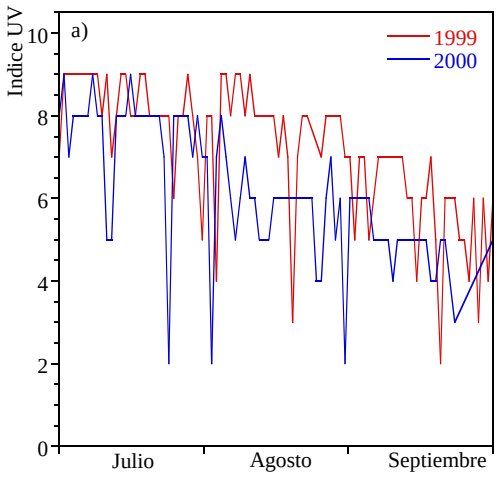
Tabla 5.27.- Diferencia entre el UVI simulado y experimental (%) por meses. Torrevieja.

Meses	0	1	2	3	>3
Enero	59	40	1	0	0
Febrero	52	32	9	7	0
Marzo	30	37	14	11	8
Abril	27	29	14	8	22
Mayo	25	50	7	7	11
Junio	30	41	18	2	9
Julio	27	29	32	7	5
Agosto	10	35	22	17	16
Septiembre	11	52	29	5	3
Octubre	27	48	17	5	3
Noviembre	39	50	10	1	0
Diciembre	29	68	3	0	0

5.5.- Comparación entre las redes de Cataluña y de la Comunidad Valenciana

Como se detalló en el Capítulo 4 las redes de medida de UVB y UVER de Cataluña y la Comunidad Valenciana presentan muchas analogías. Dada su ubicación, ambas regiones están situadas en la costa mediterránea, el estudio de estas redes conjuntamente constituye un análisis más amplio del perfil de dicha costa abarcando un rango de más de cuatro grados de latitud. En cuanto a los resultados presentados en este apartado, en primer lugar se discutirá una primera comparación de los resultados de las estaciones de Valencia y Barcelona de la red del INM (Martínez-Lozano *et al.*, 2002b).

En este trabajo se realizó la comparación del Índice UV de las 12 GMT para los meses de verano en Valencia y Barcelona para los años 1999 y 2000. Los resultados se muestran en la Figura 5.8. En general se observa que ambas curvas son coincidentes en el mes de julio para ambas estaciones aunque en agosto y septiembre se aprecia diferencias de hasta tres unidades de Índice UV. Esto se explica por el hecho que el año 2000 es un año con valores de irradiancia sensiblemente menores que el año 1999.



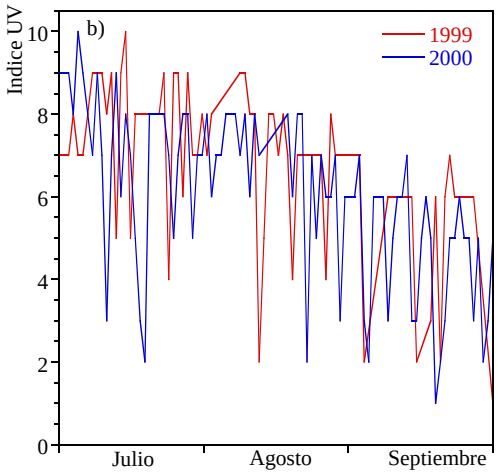


Figura 5.8.- Índice UV a las 12 GMT, meses de Julio, Agosto y Septiembre, años 1999 y 2000. a) Valencia y b) Barcelona.

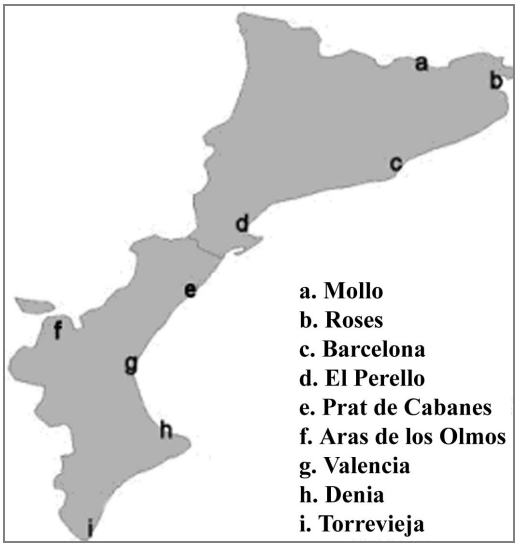
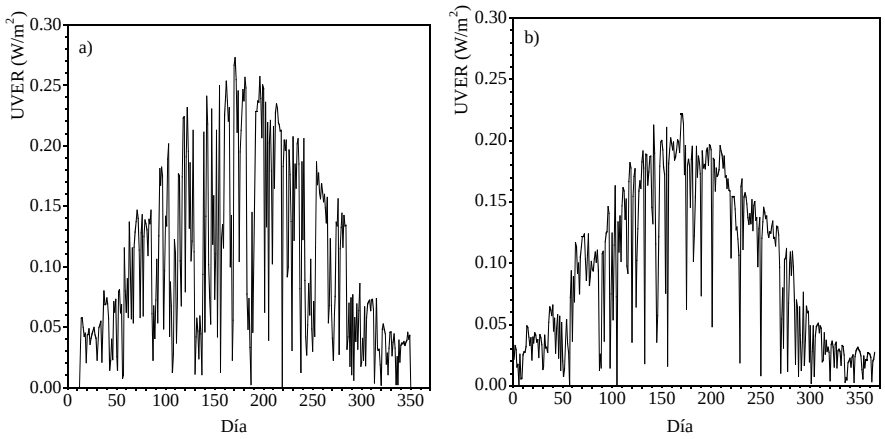


Figura 5.9.- Mapa con la ubicación de todas las estaciones de las redes de Cataluña y de la Comunidad Valenciana.

En un trabajo posterior (Marín *et al.*, 2005) se realiza el análisis de los valores de la UVER e Índice UV para todas las estaciones de las redes de Cataluña y Comunidad Valenciana durante el año 2003. Las coordenadas geográficas de cada estación están descritas en el Capítulo 4, en concreto en las Tablas 4.2 y 4.3 y en la Figura 5.9 se muestra un mapa con la ubicación del conjunto de estaciones de ambas redes.

En primer lugar se ha analizado la evolución anual de la UVER a las 12 GMT, Figura 5.10. En esta Figura se ha representado sólo las cuatro estaciones de la red de Cataluña, ya que la UVER para el año 2003 y las estaciones de la Comunidad Valenciana están previamente representadas en la Figura 5.5. En cuanto a la evolución de la UVER se observa de nuevo que los valores máximos más elevados son los correspondientes a Molló, que, a pesar de ser la estación situada más al Norte, en el Pirineo Catalán, es la que está situada a mayor altura sobre el nivel del mar, en concreto a más de 1400 m.

A continuación se ha analizado el promedio de la UVER mensual al mediodía considerando todos los días o sólo los días despejados, siendo este último caso más representativo del valor mensual. La representación gráfica de la Figura 5.11 muestra el valor de la UVER media mensual para el año 2003 en ambos casos para la estación de Valencia.



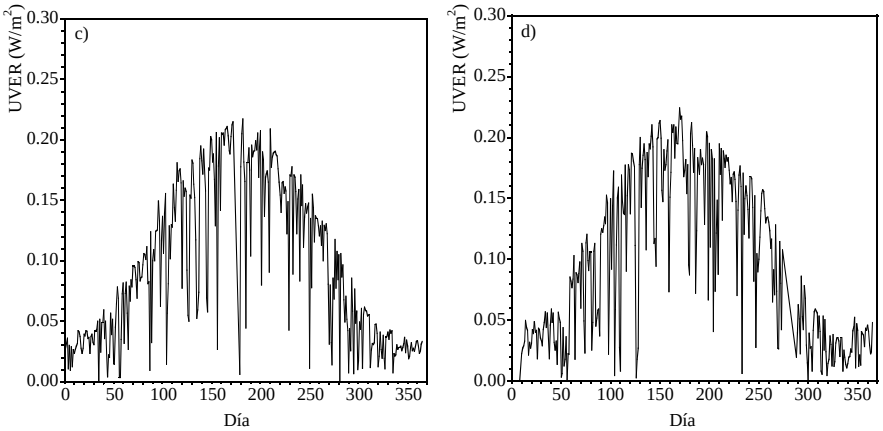


Figura 5.10.- Evolución de la UVER para el año 2003, estaciones de la red de Cataluña. a) Molló, b) Roses, c) Barcelona y d) El Perelló.

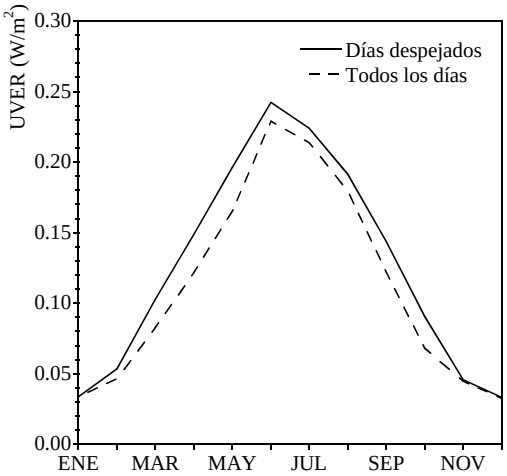


Figura 5.11.- Valores medios mensuales de la UVER para el año 2003 en Valencia.

Se ha calculado el valor medio mensual de la UVER para cada una de las estaciones de ambas redes. En la Tabla 5.28 se detallan los valores correspondientes a todos los días para la red de la Comunidad Valenciana. En las Tablas 5.29 y 5.30

se indican los valores para días despejados únicamente en la red de la Comunidad Valenciana y Cataluña respectivamente.

Tabla 5.28.- Medias mensuales de la UVER considerando todos los días para el 2003 correspondientes a las estaciones de la red de la Comunidad Valenciana.

UVER (W/m^2)	P. Cabanes	Aras Olmos	Valencia	Denia	Torrevieja
Enero	0.035	0.037	0.034	0.039	0.041
Febrero	0.046	0.062	0.046	0.044	0.055
Marzo	0.082	0.098	0.083	0.091	0.108
Abril	0.132	0.138	0.122	0.137	0.147
Mayo	0.146	0.169	0.165	0.159	0.188
Junio	0.210	0.236	0.229	0.237	0.243
Julio	0.220	0.249	0.214	0.218	0.234
Agosto	0.180	0.186	0.180	0.168	0.177
Septiembre	0.123	0.137	0.122	0.120	0.138
Octubre	0.069	0.068	0.068	0.067	0.076
Noviembre	0.043	0.045	0.045	0.042	0.047
Diciembre	0.033	0.037	0.033	0.036	0.038

En el caso de la Comunidad Valenciana se produce un incremento de la media mensual de la UVER correspondiente a cielos despejados con respecto a todos los días que oscila entre un 11% en Torrevieja y un 18% en Aras de los Olmos y Denia como promedio anual. Los mayores incrementos se presentan lógicamente en aquellos meses con predominio de días nubosos o de mayor precipitación. En el mes de Enero se registra un incremento del valor medio casi nulo para todas las estaciones. Los mayores incrementos en todos los casos se observan en el mes de Octubre, mes típicamente lluvioso en esta región. En primavera también se da un incremento importante en los meses de Mayo en Cabanes, Aras de los Olmos y Denia. Sin embargo en Valencia es más significativo el producido en el mes de Marzo y en Torrevieja en el mes de Febrero.

En vista a las tablas de evolución de la UVER con cielos despejados es posible analizar la influencia de la altura y la latitud. En cuanto al efecto latitudinal, se han

estudiado la estaciones de Roses, Prat de Cabanes y La Mata, con una separación latitudinal de dos grados, siendo la más meridional La Mata y Roses la más norteña. Se muestra un decremento medio de un 6% por grado en dirección Norte. El efecto de altitud se ha analizado por comparación entre Molló y Roses (situadas a similares latitudes) y Aras de los Olmos y Valencia (a medio grado de distancia de latitud). El primer par de estaciones muestra un incremento del 16% por km mientras que para el segundo par de estaciones el incremento es del 21% por km. Estos resultados son considerablemente mayores que los estimados por la acción COST-713.

Tabla 5.29.- Medias mensuales de la UVER considerando sólo los días despejados para el 2003 y las estaciones de la red de la Comunidad Valenciana.

UVER (W/m^2)	P. Cabanes	Aras Olmos	Valencia	Denia	Torrevieja
Enero	0.035	0.037	0.034	0.039	0.041
Febrero	0.051	0.066	0.054	0.057	0.067
Marzo	0.096	0.117	0.103	0.107	0.118
Abril	0.156	0.178	0.149	0.162	0.172
Mayo	0.195	0.231	0.196	0.218	0.220
Junio	0.240	0.263	0.242	0.245	0.262
Julio	0.232	0.259	0.224	0.230	0.248
Agosto	0.197	0.203	0.192	0.183	0.197
Septiembre	0.152	0.167	0.144	0.148	0.149
Octubre	0.086	0.098	0.091	0.099	0.095
Noviembre	0.051	0.057	0.046	0.050	0.049
Diciembre	0.033	0.038	0.033	0.037	0.038

Los datos han sido recalculados empleando sólo aquellos valores de UVER correspondientes a un Índice UV igual o mayor que 3, es decir, tomando sólo aquellos valores de la UVER mayores que 0.075 W/m^2. Se ha elegido este criterio por tratarse del umbral de Índice UV moderado, y a partir del cual se necesita utilizar fotoprotección (WHO, 2003). Este nivel fue alcanzado entre los meses de Marzo a Septiembre en Cataluña y entre Marzo y Octubre en la Comunidad Valenciana. En este caso el efecto latitudinal es del 4% por grado y el efecto de

altitud del 10% por km para Molló y Roses y del 11% por km para Aras de los Olmos y Valencia. Esta ligera diferencia podría ser asumida en función del efecto latitudinal que no es despreciable en este caso. Este porcentaje se aproxima más al valor al estimado por la acción COST-713.

Tabla 5.30.- Medias mensuales de la UVER considerando sólo los días despejados para el 2003 y las estaciones de la red de Cataluña.

UVER (W/m^2)	Molló	Roses	Barcelona	El Perelló
Enero	0.042	0.030	0.032	0.035
Febrero	0.057	0.044	0.043	0.041
Marzo	0.113	0.102	0.085	0.089
Abril	0.164	0.133	0.139	0.143
Mayo	0.204	0.173	0.171	0.186
Junio	0.238	0.192	0.196	0.189
Julio	0.228	0.182	0.186	0.185
Agosto	0.201	0.151	0.164	0.162
Septiembre	0.149	0.123	0.125	0.118
Octubre	0.082	0.066	0.069	0.051
Noviembre	0.047	0.032	0.041	0.035
Diciembre	0.034	0.020	0.028	0.030

La acción COST-713 propuso un incremento del Índice UV del 8%/km. Frederik (1993, comunicación personal) encontró un incremento del 6%/km a partir de modelización, coincidiendo con el valor dado en este trabajo para el modelo SBDART 2.4. Blumthaler *et al.*, (1997) encontraron valores entre el 14 y el 18%/km a partir de medidas en una superficie horizontal. El valor encontrado en este estudio, 10%/km, es más próximo al valor sugerido por la acción COST-713.

La variabilidad de los resultados en invierno puede deberse a la posible presencia de nieve en las estaciones de interior, ya que la nieve presenta un alto albedo que no se ha sido considerado al no disponerse de esta información. Tampoco se ha analizado la variación que podría existir entre distintos tipos de aerosoles, sino que se ha simulado la predicción con un modelo de aerosoles

estándar, en nuestro caso aerosoles de tipo urbano excepto en la estación de Aras donde se implementó el modelo rural. En este estudio las diferencias y similitudes en los distintos ubicaciones podrían estar influenciadas por el albedo (nieve o hierba frente al suelo desnudo) o polución (valor elevado del espesor óptico de aerosoles frente a un bajo valor del mismo) y todo esto podría presentar una influencia adicional al efecto de altura.

En la Tabla 5.31 se muestra el valor del Índice UV y su recurrencia para el 2003 y para las estaciones de Cataluña. Un análisis análogo para las estaciones de la Comunidad Valenciana se detalla en las Tablas 5.12 a la 5.16. Se puede observar que el máximo valor del Índice UV alcanzado es de 10 en las estaciones de Molló y Aras de los Olmos dado el efecto de altitud.

Tabla 5.31.- Recurrencia del Índice UV a las 12 GMT (en %). Año 2003. Estaciones de la red de Cataluña.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Datos
Molló	5	16	20	13	7	12	4	6	8	7	2	357
Roses	5	26	11	5	10	12	9	11	9	1	0	365
Barcelona	5	22	16	10	7	9	8	13	10	1	0	355
El Perelló	7	20	17	6	7	8	9	14	10	1	0	348

Se ha calculado las dosis eritemáticas acumuladas durante el año 2003 para los distintos fototipos y la dosis estándar para cada una de las estaciones de las dos redes objeto de estudio. En la Figura 5.12 se ha representado las dos estaciones con los valores extremos, que corresponden con la más distanciadas latitudinalmente: Roses y Torrevieja. Durante el año 2003 se recibieron en Torrevieja aproximadamente un tercio de SED más que en Roses, de las cuales más del 40% corresponde al periodo de verano, lo que se constata con el cambio de pendiente que se aprecia en la Figura 5.12.

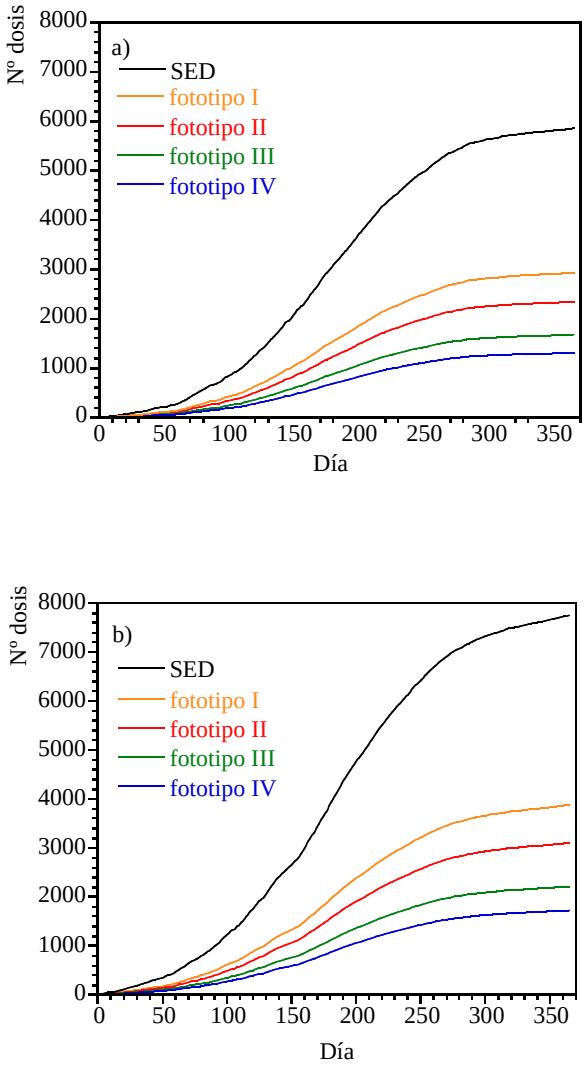


Figura 5.12.- Dosis eritemática acumulada anualmente según el fototipo y según la dosis eritemática estándar (SED). Año 2003. a) Roses y b) Torrevieja.

Una estimación del Índice UV al mediodía ha sido simulada usando el modelo SBDART, tal y como se ha descrito en el Capítulo 3 para las nueve estaciones de las dos redes autonómicas y para cada día durante el año 2003. Como se indicó previamente el modelo ha sido implementado para cielos despejados y ha sido corregido por altura pero no por nubosidad. Los valores simulados han sido comparados con los experimentales de Índice UV. Los valores experimentales del Índice UV junto a los valores simulados para todas las estaciones de la Comunidad Valenciana se mostraron previamente en la Figura 5.6.

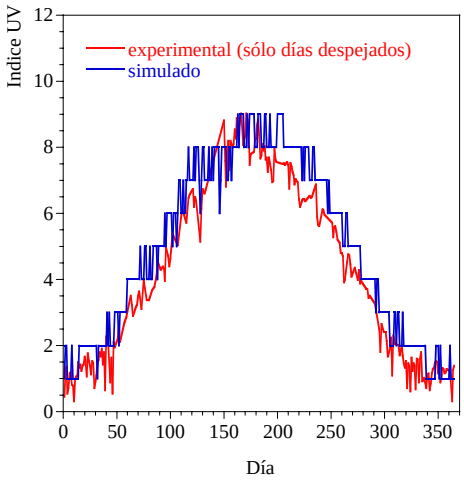


Figura 5.13.- Evolución del Índice UV simulado y experimental para días despejados. Año 2003 y estación de Valencia.

Para todas las estaciones de medida, el Índice UV medido y modelizado coincide o difiere en tan sólo 1 unidad en más del 81% de los casos. Se trata de un resultado aceptable ya que el redondeo del Índice UV hace que difieran en una unidad datos con diferencia de menos de 0.025 W/m^2 de UVER. Considerando que los modelos no tienen en cuenta la nubosidad, el resultado es notablemente bueno. Posteriormente los días despejados han sido discriminados mediante la información sobre nubosidad proporcionada por los boletines meteorológicos del INM y las imágenes del satélite meteosat que publica el Servei Meteorològic de Cataluña[8].

[8] http://www.meteocat.com/marcs/marcos_observacio/marcs_satelits.htm

Con esta selección se han eliminado principalmente los días de nubosidad baja y los de gran cobertura nubosa. Para los días restantes se ha repetido el cálculo resultando que en más de un 90% de los casos coinciden o difieren en tan sólo una unidad para todas las estaciones y en todo el periodo considerado. Estos resultados se resumen en la Tabla 5.32. En la Figura 5.13 se ha representado la evolución del Índice UV simulado y el experimental sólo para días despejados observándose como en este caso el valor predicho se aproxima más al experimental.

Tabla 5.32.- Diferencia entre el Índice UV simulado y experimental (en %), sólo días despejados.

	Diferencia		
Estación	0	1	2
Molló	47.5	45.0	7.4
Roses	61.9	36.8	1.4
Barcelona	57.1	41.0	1.7
El Perelló	54.9	43.9	1.2
Prat de Cabanes	42.8	53.4	3.8
Aras de los Olmos	52.5	47.1	0.4
Valencia	31.8	58.5	9.7
Denia	40.6	54.3	5.1
La Mata	40.9	55.5	3.6

El análisis de las desviaciones muestra que el modelo SBDART sobrestima los valores experimentales en un 10%. Estos resultados coinciden con otros autores para modelos de dispersión múltiple (De Backer *et al.*, 2001; De Cabo *et al.*, 2004). Estas diferencias observadas se acentúan cuando los valores de la radiación incidente es mayor, como se muestra en la Tabla 5.32 en las tres ubicaciones situadas más al Sur, hecho que deberá ser tenido en cuenta para introducir mejoras en el modelo de predicción.

Capítulo 6

Medida de la UVER difusa

El estudio de la componente difusa de la radiación solar es esencial en el rango UVB y en el de la irradiancia eritemática ya que supone más del 50% de la irradiancia total. En este capítulo se describe un dispositivo experimental desarrollado para medir la irradiancia difusa, consistente en una banda de sombra que oculta la irradiancia directa. También oculta una fracción de la irradiancia difusa, que es necesario corregir. Esta corrección se realiza mediante modelos existentes en la literatura adaptados al rango de la UVER. Posteriormente se validan estos resultados por distintos métodos, tanto experimentales, a partir de medidas de un espectrorradiómetro, como procedentes de simulaciones de la radiación, mediante modelos de transferencia radiativa. Por último se hace un análisis de los valores del Índice UV resultantes para la irradiancia eritemática difusa.

6.1.- Dispositivo experimental de la UVER difusa

La caracterización de la componente difusa de la radiación es especialmente relevante en el rango de la UVB y de la UVER dado que puede representar incluso más del 50% de la global debido a los efectos de la dispersión atmosférica que son más intensos a medida que disminuye la longitud de onda. Por otro lado, la irradiancia difusa en el plano horizontal resulta ser de gran importancia ya que se emplea como parámetro de entrada en diversos modelos para el cálculo de la irradiancia en planos inclinados.

El valor de la irradiancia difusa horizontal puede calcularse con precisión a partir de los datos de irradiancia global y de la componente directa, mediante la ecuación 6.1:

$$I_d = I_g - I_b \cdot \cos\theta \qquad (6.1)$$

donde I_d es la irradiancia difusa, I_g la irradiancia global horizontal, I_b la irradiancia directa normal a la dirección de incidencia y θ el ángulo cenital solar.

El mayor problema que plantea su determinación a partir de esta expresión radica en la medida de la radiación directa, debido al elevado coste de los seguidores solares, así como el riguroso mantenimiento necesario para sus continuos ajustes.

Una alternativa empleada frecuentemente es la medida directa de la irradiancia difusa, usando un piranómetro junto con un dispositivo que impida que la componente directa de la radiación incida en el detector del instrumento de medida. Los dispositivos comúnmente empleados para este fin son bandas o anillos de sombra montados sobre un eje paralelo al eje polar (Batlles *et al.*, 1995), que se suelen recubrir con una pintura negra, de baja reflectividad.

En nuestro caso se ha empleado una banda de sombra, inicialmente diseñada para un piranómetro de banda ancha de rango más amplio, que ha tenido que ser debidamente modificada. Los cambios introducidos han permitido reducir los parámetros de ajuste de la banda de sombra a uno sólo. Anteriormente era necesario cambiar la altura del radiómetro respecto de la banda, modificando la base donde descansa, y la distancia horizontal de la banda respecto del radiómetro para ajustarla correctamente a lo largo del año. Esto presentaba varios inconvenientes, principalmente la incapacidad de dicha banda para sombrear totalmente el

instrumento de medida utilizado para la UVER desde principios de Marzo a principios de Septiembre, es decir, durante los meses en los que tanto la irradiancia como la altura solar son mayores. Además no existía un método riguroso de seguimiento a lo largo del año.

Figura 6.1.- Dispositivo experimental para la medida de la radiación UVER difusa.

Con la finalidad de sombrear el radiómetro durante todo el año se diseñó una nueva banda de sombra empleando la estructura soporte de la anterior. Sobre esta base se anclaron los brazos que la sujetan, con una inclinación igual a la latitud. Cuando se coloca perpendicularmente sobre los brazos queda paralela al plano ecuatorial de modo que para los sucesivos ajustes durante el año basta trasladarla a lo largo de un eje paralelo al eje polar (López *et al.*, 2004), lo que permite aplicar posteriormente las expresiones de corrección propuestas por Drummond (1956). En los equinoccios, la superficie de la banda es perpendicular a los rayos solares, mientras que en otras épocas del año se coloca a lo largo de los brazos en el punto donde la distancia recorrida desde la posición del equinoccio subtienda un ángulo con el radiómetro igual a la declinación solar.

Esta banda de sombra ha sido diseñada siguiendo las indicaciones de Horowithz (1969) respetando las dimensiones propuestas en su trabajo. Este dispositivo se puede construir a partir de materiales de bajo coste y es fácilmente reproducible. Con un adecuado dimensionamiento es posible sombrear correctamente un piránometro con una altura mínima de 11 cm, de manera que si

queremos utilizar otro radiómetro habría que acoplar la banda de sombra al nuevo sensor.

El dispositivo diseñado consta de dos elementos principales como puede verse en la Figura 6.1: a) la estructura soporte y b) la banda de sombra propiamente dicha. La banda de sombra consta de una chapa de hierro galvanizado de 122 cm de largo por 7.5 cm de ancho y de dos brazos que la sujetan a partir de un perfil metálico. Todos los elementos están tratados con una imprimación de esmalte negro antirreflexivo. La banda está anclada perpendicularmente a los brazos, siendo la longitud entre las sujeciones de 99.8 cm, quedando 11.1 cm de extensión a cada lado.

Una vez montado el dispositivo, la forma de ajustar la banda de sombra a la altura solar durante el año consiste en desplazarla a lo largo de los brazos que la sujetan utilizando los múltiples orificios del perfil metálico. El filo superior de la banda debe estar algunos centímetros por debajo de la parte superior de cada brazo, en la posición m, (Horowithz, 1969):

$$m = L - \left(3.81 + \frac{h}{\sin \phi} \right) + 31 \cdot \tan \delta \qquad (6.2)$$

siendo L la longitud de los brazos (37.5 cm, medida a lo largo de la línea que une los tornillos de sujeción de la banda), h la altura del radiómetro por encima de la base (12.85 cm según las especificaciones del manual), ϕ la latitud del lugar (39.50º) y δ la declinación solar para el día en el que se están tomando las medidas.

En la Figura 6.2 se puede apreciar la evolución del parámetro m a lo largo del año y su forma senosoidal debido a la variación anual de la declinación. Como se puede observar, m toma valores mayores en invierno que en verano, coincidiendo sus valores máximo y el mínimo con los solsticios de invierno y verano respectivamente. Efectivamente, en verano, cuando la altura solar es mayor, la distancia entre la parte superior de los brazos y la banda debe ser menor, esto es, la banda debe estar más alta. Lo contrario puede decirse para el invierno.

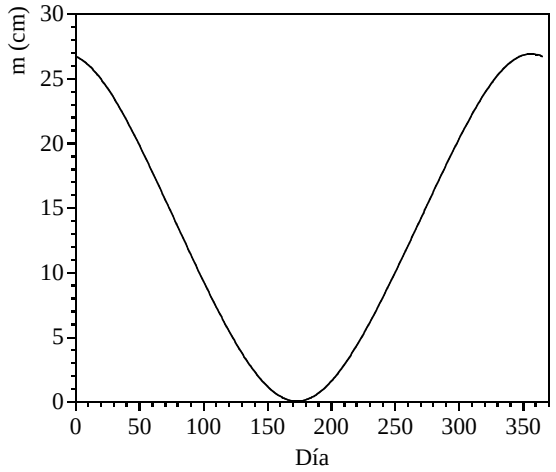


Figura 6.2.- Variación del parámetro m a lo largo del año.

Debido a que las posiciones de la banda sobre los brazos no son continuas sino que pasan de unos orificios a otros, es necesario discretizar el valor del parámetro m. Con esta finalidad se ha elaborado una tabla donde se indican los orificios en los que la banda debe estar en cada período del año. El criterio que se ha seguido para determinar la posición adecuada ha sido el siguiente: dado que la distancia entre orificios es de 2.5 cm y tomando como referencia m = 0, las siguientes posiciones corresponden a m = 2.5, 5.0, 7.5,...cm, esto es m_i = 2.5 (i-1), con i= 1, 2, 3,.... El período válido para un orificio será aquel para el que la m esté comprendida entre el intervalo (m_i -1.25, m_i +1.25) de modo que, redondeando el valor del parámetro m al orificio más cercano, se ha construido la Tabla 6.1 donde se especifican los dos orificios utilizados para afianzar la banda a la estructura soporte en cada periodo. Sin embargo, para la determinación de m se ha considerado solamente el valor del primero de ellos.

Tabla 6.1.- Configuración de la banda de sombra según el periodo del año.

Mes	Orificios	Periodo
Enero	12 y 14	1 Enero - 7 Enero
	11 y 13	8 Enero - 28 Enero
	10 y 12	29 Enero - 11 Febrero
Febrero	9 y 11	12 Febrero - 24 Febrero
	8 y 10	25 Febrero - 8 Marzo
Marzo	7 y 9	9 Marzo - 19 Marzo
	6 y 8	20 Marzo - 31 Marzo
Abril	5 y 7	1 Abril - 12 Abril
	4 y 6	13 Abril - 25 Abril
	3 y 5	26 Abril - 10 Mayo
Mayo	2 y 4	11 Mayo - 29 Mayo
	1 y 3	30 Mayo - 15 Julio
Junio	1 y 3	--
Julio	2 y 4	16 Julio - 4 Agosto
Agosto	3 y 5	5 Agosto - 18 Agosto
	4 y 6	19 Agosto - 31 Agosto
Septiembre	5 y 7	1 Septiembre - 12 Septiembre
	6 y 8	13 Septiembre - 24 Septiembre
	7 y 9	25 Septiembre - 6 Octubre
Octubre	8 y 10	7 Octubre - 18 Octubre
	9 y 11	19 Octubre - 31 Octubre
Noviembre	10 y 12	1 Noviembre - 14 Noviembre
	11 y 13	15 Noviembre - 5 Diciembre
Diciembre	12 y 14	6 Diciembre - 31 Diciembre

6.2.- La corrección de la banda de sombra

Para la medida de la UVER difusa se dispone de una banda de sombra con las características que se han detallado en el apartado anterior acoplada a un radiómetro UVB-1. Sin embargo, esta banda no oculta sólo la irradiancia directa que proviene del Sol, sino que debido a sus dimensiones, mayores que la del puerto de entrada del radiómetro, también oculta la radiancia procedente de otros puntos del cielo, es decir, que parte de la UVER difusa no llega al sensor. Por lo tanto, se debe corregir la medida de irradiancia eritemática difusa registrada dado que la UVER difusa real será mayor que la UVER difusa medida.

En este trabajo se han analizado tres modelos existentes en la literatura para corregir la banda de sombra: a) El modelo isótropo o de Drummond (1956), b) El modelo de Le Baron *et al.* (1990) que considera la anisotropía de la radiación difusa mediante la inclusión de dos parámetros: el índice de claridad para la irradiancia difusa y el cociente entre la radiación difusa más la directa normal y la difusa y c) El modelo de Batlles *et al.* (1995) que tiene en cuenta los mismos parámetros que el de Le Baron pero proponiendo una función analítica en vez de una tabulación. Los resultados mostrados en este apartado y sucesivos están incluidos en un trabajo que se encuentra en revisión editorial (Utrillas *et al.*, 2006).

a) Modelo isótropo o de Drummond

El modelo isótropo o de Drummond (1956) supone que la radiancia está distribuida uniformemente en todas las direcciones de la bóveda celeste. Al considerar tan sólo una dependencia geométrica y no otros parámetros este modelo es independiente del rango espectral y por tanto es válido para el rango objeto de estudio en este trabajo tal y como está formulado y sin tener que efectuar modificaciones. A continuación se deduce la expresión del factor corrector que emplea este modelo a partir de la expresión general de la fracción de irradiancia difusa que oculta una banda de sombra en el caso de que la radiancia de cielo sea isótropa.

La fracción de la irradiancia horizontal difusa, X, que oculta una banda de sombra con el eje paralelo al eje polar, suponiendo que la anchura de la banda es pequeña comparada con su radio, que el tamaño del sensor es despreciable comparado con las otras dimensiones y que no hay reflexiones procedentes del interior de la banda, puede expresarse (Drummond, 1956):

$$X = \frac{b}{r} \cdot \cos^3 \delta \cdot \int_{-t_0}^{t_0} L \cdot (\sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos t) \cdot dt \qquad (6.3)$$

siendo b la anchura de la banda de sombra, r su radio, t el ángulo horario, t_0 el ángulo horario en el ocaso, ϕ la latitud, δ la declinación y L la radiancia de cielo.

Si consideramos que la radiancia está distribuida de forma isótropa, es decir, distribuida de forma homogénea en cualquier dirección, entonces la fracción de la irradiancia difusa, X, con respecto a la recibida en un hemisferio, T, ($T = \pi \cdot L$), se puede escribir:

$$\frac{X}{T} = \frac{2 \cdot b}{\pi \cdot r} \cdot \cos^3 \delta \cdot (t_0 \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin t_0). \qquad (6.4)$$

La UVER difusa se corrige mediante el producto de ésta por el factor de corrección, C_i, dado por (6.5), tal y como se muestra en la ecuación 6.6:

$$C_i = \frac{1}{1 - \frac{X}{T}} \qquad (6.5)$$

$$UVER_{d\ Isotropo} = C_i \cdot UVER_{d\ medida}. \qquad (6.6)$$

Este método se ha aplicado a todos los datos experimentales disponibles de altura solar mayor de 20º (más de 60000, comprendidos entre Mayo del 2004 y Abril de 2006) obteniéndose la fracción de la irradiancia difusa que oculta la banda de sombra y el correspondiente factor de corrección. En la Tabla 6.2 se detallan los resultados donde se aprecia que el factor de corrección está comprendido entre 1.046 y 1.172, lo que indica que sería necesario incrementar los datos de la UVER difusa experimental entre un 5% y un 17%.

Si se aplica el factor de corrección a todos los datos y se hace la representación gráfica de la UVER difusa corregida con el modelo isótropo frente a la medida sin corregir con la banda de sombra, se obtiene la Figura 6.3. A partir de dicha gráfica se observa que existe una correlación lineal elevada entre la UVER difusa corregida con dicho modelo y la experimental. Se puede tomar el valor de la pendiente del ajuste lineal como valor aplicable a todos los datos disponibles sin pérdida de

generalidad y sin necesidad de calcular el factor de corrección individualmente. En tal caso, la corrección de la banda de sombra que se deduce de la aplicación del modelo isótropo supone incrementar en un 16% los valores de la UVER difusa medidos con la banda de sombra.

Tabla 6.2.- Fracción de la UVER difusa que oculta la banda de sombra según el modelo isótropo, X/T, y factor de corrección propuesto, C_i, para el conjunto de datos experimentales.

	$\frac{X}{T}$	C_i
Mínimo	0.044	1.046
Máximo	0.147	1.172
Media	0.121	1.14 (± 0.04)
Mediana	0.142	1.165

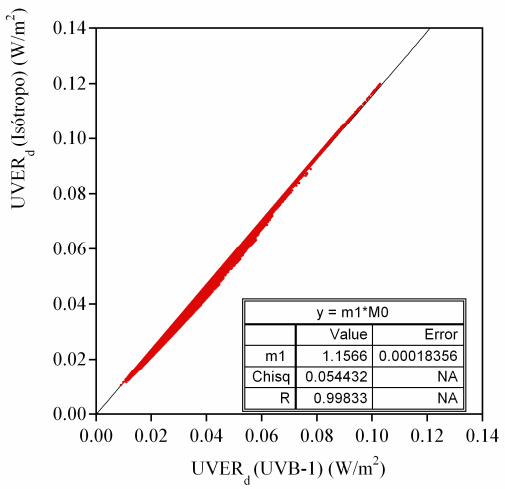


Figura 6.3.- Representación de la UVER difusa corregida con el modelo isótropo frente a la experimental sin corregir.

b) Modelo de Le Baron

Este modelo utiliza cuatro parámetros para describir las contribuciones isótropas y anisótropas de la radiancia del cielo. El primer parámetro, C_i, es el factor de corrección isótropo definido en el modelo de Drummond, y que viene dado por las ecuación 6.4 y 6.5. Los tres parámetros restantes nos dan el factor de corrección anisótropo y dependen de las condiciones de cielo (Le Baron *et al*., 1990). Estos parámetros son: el ángulo cenital solar θ, el cociente entre la radiación difusa más la directa normal y la difusa (parámetro ε), y el índice de luminosidad o índice de claridad para la radiación difusa (parámetro Δ) y vienen definidos por:

$$\varepsilon = \frac{I_d + I_b}{I_d} \tag{6.7}$$

$$\Delta = \frac{I_d}{I_0 \cdot \cos\theta} \tag{6.8}$$

donde I_0 es la irradiancia extraterrestre, I_d la irradiancia difusa horizontal, I_b la irradiancia directa en la dirección normal a la de incidencia y θ el ángulo cenital.

Una vez determinados estos cuatro parámetros, se clasifican en los cuatro intervalos que muestra la Tabla 6.3.

Tabla 6.3.- Intervalos para los cuatro parámetros usados por el modelo de Le Baron para describir las contribuciones isótropas y anisótropas de la radiancia del cielo.

Intervalos	1	2	3	4
θ	0-35	35-50	50-60	60-90
Ci	1.0-1.068	1.068-1.100	1.100-1.132	1.132-
ε	0.0-1.253	1.253-2.134	2.134-5.980	5.980-
Δ	0.0-0.120	0.120-0.200	0.200-0.300	0.300-

Estos parámetros están tabulados para la irradiancia total y para poder aplicarlos en el rango de irradiancia eritemática ha sido necesario recalcular el parámetro Δ dado que el orden de magnitud es mucho menor. Para ello se ha tomado el valor máximo experimental del Δ_{UVER} (0.0130) considerando que es

equivalente al valor más alto dado por el modelo de Le Baron, (Δ = 0.300), obteniendo el resto de valores mediante proporcionalidad directa. Los nuevos intervalos se detallan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4.- Propuesta de nuevos intervalos para el parámetro Δ en el rango de la UVER.

Intervalos	1	2	3	4
Δ	0-0.0052	0.0052-0.0087	0.0087-0.0130	0.0130-

Los intervalos que se describen en la Tablas 6.3 y 6.4 dan lugar a 256 categorías para la descripción de la geometría y condiciones del cielo, de forma que para cada una de ellas hay un factor de corrección de la irradiancia difusa, como se especifica en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5.- Factores de corrección de la irradiancia difusa del modelo de Le Baron: ($i = \theta$, $j = C_i$, $k = \varepsilon$, $l = \Delta$).

i =	j = (,1)	(,2)	(,3)	(,4)	i =	j = (,1)	(,2)	(,3)	(,4)
(i, j, 1, 1)					(i, j, 1, 3)				
(1,)	1.051	1.082	1.117	1.173	(1,)	1.051	1.082	1.117	1.182
(2,)	1.051	1.104	1.115	1.163	(2,)	1.051	1.082	1.128	1.159
(3,)	1.069	1.082	1.119	1.140	(3,)	1.076	1.088	1.131	1.129
(4,)	1.047	1.063	1.074	1.030	(4,)	1.060	1.085	1.103	1.156
(i, j, 2, 1)					(i, j, 2, 3)				
(1,)	1.051	1.082	1.117	1.248	(1,)	1.051	1.082	1.117	1.221
(2,)	1.051	1.082	1.117	1.184	(2,)	1.051	1.171	1.180	1.213
(3,)	1.161	1.161	1.147	1.168	(3,)	1.135	1.148	1.176	1.197
(4,)	1.076	1.078	1.104	1.146	(4,)	1.092	1.119	1.143	1.182
(i, j, 3, 1)					(i, j, 3, 3)				
(1,)	1.051	1.082	1.117	1.156	(1,)	1.051	1.082	1.117	1.238
(2,)	1.051	1.082	1.117	1.156	(2,)	1.051	1.160	1.207	1.230
(3,)	1.051	1.082	1.117	1.156	(3,)	1.169	1.191	1.193	1.210
(4,)	1.187	1.167	1.139	1.191	(4,)	1.150	1.133	1.180	1.156

Tabla 6.5 (cont.).- Factores de corrección de la irradiancia difusa del modelo de Le Baron: ($i = \theta$, $j = C_i$, $k = \varepsilon$, $l = \Delta$).

i =	j = (,1)	(,2)	(,3)	(,4)	i =	j = (,1)	(,2)	(,3)	(,4)
(i, j, 4, 1)					(i, j, 4, 3)				
(1,)	1.051	1.082	1.117	1.181	(1,)	1.051	1.082	1.117	1.156
(2,)	1.051	1.082	0.990	1.104	(2,)	1.051	1.082	1.117	1.156
(3,)	1.015	1.016	0.946	1.027	(3,)	1.051	1.082	1.117	1.156
(4,)	0.925	0.967	0.977	1.150	(4,)	1.089	1.194	1.216	1.064
(i, j, 1, 2)					(i, j, 1, 4)				
(1,)	1.051	1.082	1.117	1.176	(1,)	1.051	1.082	1.117	1.191
(2,)	1.051	1.095	1.130	1.162	(2,)	1.051	1.105	1.143	1.168
(3,)	1.073	1.089	1.115	1.142	(3,)	1.085	1.093	1.117	1.156
(4,)	1.058	1.076	1.117	1.156	(4,)	1.069	1.082	1.117	1.156
(i, j, 2, 2)					(i, j, 2, 4)				
(1,)	1.051	1.082	1.117	1.211	(1,)	1.051	1.082	1.117	1.238
(2,)	1.051	1.082	1.186	1.194	(2,)	1.051	1.148	1.195	1.230
(3,)	1.086	1.130	1.168	1.177	(3,)	1.132	1.160	1.183	1.210
(4,)	1.074	1.102	1.118	1.174	(4,)	1.118	1.116	1.150	1.185
(i, j, 3, 2)					(i, j, 3, 4)				
(1,)	1.051	1.082	1.117	1.237	(1,)	1.051	1.082	1.117	1.232
(2,)	1.051	1.082	1.203	1.212	(2,)	1.051	1.206	1.210	1.238
(3,)	1.080	1.195	1.211	1.185	(3,)	1.144	1.178	1.226	1.216
(4,)	1.140	1.098	1.191	1.181	(4,)	1.117	1.155	1.178	1.167
(i, j, 4, 2)					(i, j, 4, 4)				
(1,)	1.051	1.082	1.117	1.217	(1,)	1.051	1.082	1.117	1.156
(2,)	1.051	1.082	1.120	1.180	(2,)	1.051	1.082	1.117	1.156
(3,)	1.182	1.115	1.081	1.111	(3,)	1.051	1.082	1.117	1.156
(4,)	1.057	1.119	1.133	1.033	(4,)	1.024	1.025	1.162	1.142

A partir de estos factores de corrección se calcula la irradiancia difusa corregida por el modelo de Le Baron mediante:

$$UVER_{d\ LeBaron} = C_L \cdot UVER_{d\ medida}. \tag{6.9}$$

Análogamente al modelo isótropo, es posible calcular la fracción de irradiancia difusa que oculta la banda de sombra según este modelo así como el factor de corrección propuesto, Tabla 6.6. En este caso, tomando la base de datos anteriormente descrita, el factor medio de corrección es ligeramente mayor al del modelo isótropo y también es más amplio el rango entre el valor mínimo y máximo.

Tabla 6.6.- Fracción de la UVER difusa que oculta la banda de sombra según el modelo de Le Baron, X/T, y factor de corrección propuesto, C_L, para el conjunto de datos experimentales.

	$\frac{X}{T}$	C_L
Mínimo	0.029	1.030
Máximo	0.199	1.248
Media	0.138	1.16 (± 0.06)
Mediana	0.150	1.177

En la Figura 6.4 se ha representado la irradiancia eritemática corregida mediante el modelo de Le Baron frente a la experimental sin corregir y se deduce que este modelo propone un incremento del 20% como corrección de la banda de sombra, un valor superior al hallado con el modelo de isótropo.

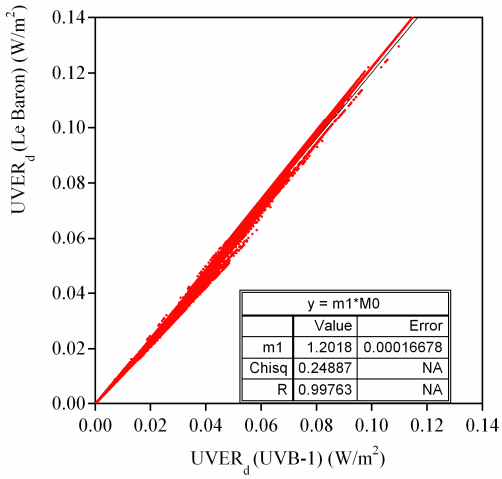


Figura 6.4.- Representación de la UVER difusa corregida con el modelo de Le Baron frente a la experimental sin corregir.

c) Modelo de Batlles

Este modelo utiliza un factor de corrección de la irradiancia difusa que viene dado por una aproximación analítica de los cuatro parámetros del modelo de Le Baron:

$$C_B = 1.245 \cdot C_i + 0.522 \cdot \log \Delta + 0.230 \cdot \log \varepsilon + 0.322 \cdot e^{-1/\cos\theta}. \qquad (6.10)$$

En esta expresión el último término, dependiente del ángulo cenital solar, se considera una aproximación de la masa óptica aplicable principalmente para ángulos cenitales pequeños. La expresión de la UVER difusa se calcula análogamente a los casos anteriores:

$$UVER_{d\ Batlles} = C_B \cdot UVER_{d\ medida}. \qquad (6.11)$$

Utilizando el mismo criterio que en el modelo de Le Baron, es necesario modificar los valores del parámetro Δ por los diferentes órdenes de magnitud de la

irradiancia total y de la UVER lo que implica corregir a su vez el coeficiente del término que depende de él. Con dicha finalidad se ha tomado un valor promedio del parámetro Δ para la UVER, de los obtenidos experimentalmente, considerando que debe cumplirse la igualdad:

$$0.522 \cdot \log \Delta = \mathrm{coef}_{\mathrm{UVER}} \cdot \log \Delta_{\mathrm{UVER}} . \qquad (6.12)$$

A partir de esta expresión se ha calculado el coeficiente de la Δ_{UVER} teniendo en cuenta el valor medio propuesto por Le Baron para el rango total (Δ = 0.150) y el obtenido experimentalmente para la UVER (Δ_{UVER} = 0.0065).

De esta forma, el factor de corrección dado por la ecuación 6.10 queda modificado tal y como se aprecia en la ecuación 6.13. De acuerdo con esta expresión se ha recalculado la fracción de irradiancia difusa que oculta la banda de sombra así como el factor de corrección resultante, Tabla 6.7. Aunque la media aritmética es idéntica a la hallada con el modelo de Le Baron, la diferencia entre los valores mínimo y máximo es mayor en este caso. Se han descartado en este análisis aquellos factores de corrección menores que la unidad por carecer de sentido físico. Estos datos corresponden siempre a ángulos cenitales mayores de 60º.

$$C_B = 1.245 \cdot C_i + 0.197 \cdot \log \Delta + 0.230 \cdot \log \varepsilon + 0.322 \cdot e^{-1/\cos\theta} \qquad (6.13)$$

Tabla 6.7.- Fracción de la UVER difusa que oculta la banda de sombra según el modelo de Batlles, X/T, y factor de corrección propuesto, C_B, para el conjunto de datos experimentales.

	$\frac{X}{T}$	C_B
Mínimo	0.00010	1.0001
Máximo	0.212	1.269
Media	0.138	1.16 (± 0.07)
Mediana	0.153	1.181

En la Figura 6.5 se ha representado la irradiancia eritemática difusa corregida mediante el modelo de Batlles frente a la medida con la banda de sombra sin corregir. La pendiente del ajuste por mínimos cuadrados sugiere un incremento de la UVER del 21% como corrección por este método.

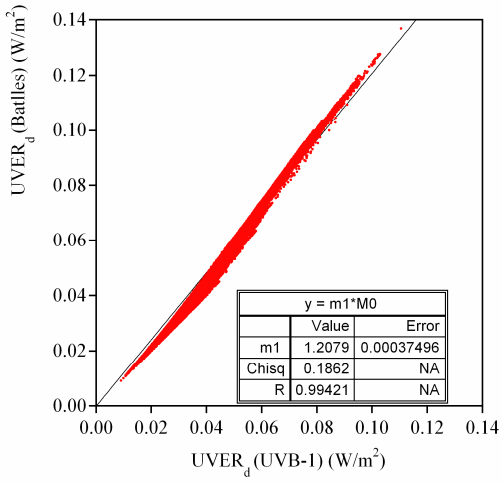


Figura 6.5.- Representación de la UVER difusa corregida con el modelo de Batlles frente a la experimental sin corregir.

Los resultados con este modelo no varían significativamente con respecto a los obtenidos con el de Le Baron. Una propuesta alternativa de modificación sería considerar los dos parámetros que dependen del rango espectral considerado, es decir, no solamente Δ sino también ε. De forma análoga al parámetro Δ, el coeficiente del término que depende de ε quedaría modificado de acuerdo con:

$$0.230 \cdot \log \varepsilon = \mathrm{coef}_{\mathrm{UVER}} \cdot \log \varepsilon_{\mathrm{UVER}}. \tag{6.14}$$

quedando la expresión analítica de la siguiente forma:

$$C_{B2} = 1.245 \cdot C_i + 0.197 \cdot \log \Delta + 0.363 \cdot \log \varepsilon + 0.322 \cdot e^{-1/\cos\theta}. \tag{6.15}$$

En la Tabla 6.8 se resumen los resultados de la fracción de irradiancia difusa que oculta la banda de sombra y el factor de corrección según la última expresión propuesta, Batlles2. De nuevo se han eliminado aquellos datos cuyo factor fuera menor que la unidad. El factor de corrección medio aumenta en este caso con respecto a los modelos anteriores alcanzando el valor de 1.20, así como el valor máximo.

Tabla 6.8.- Fracción de la UVER difusa que oculta la banda de sombra según el modelo de Le Baron2, X/T, y factor de corrección propuesto, C_{B2}, para el conjunto de datos experimentales.

	$\frac{X}{T}$	C_{B2}
Mínimo	0	1
Máximo	0.250	1.334
Media	0.167	1.20 (± 0.09)
Mediana	0.178	1.217

En la Figura 6.6 se ha representado la UVER difusa corregida con este método frente a la experimental sin corregir obteniéndose una constante de proporcionalidad de 1.25.

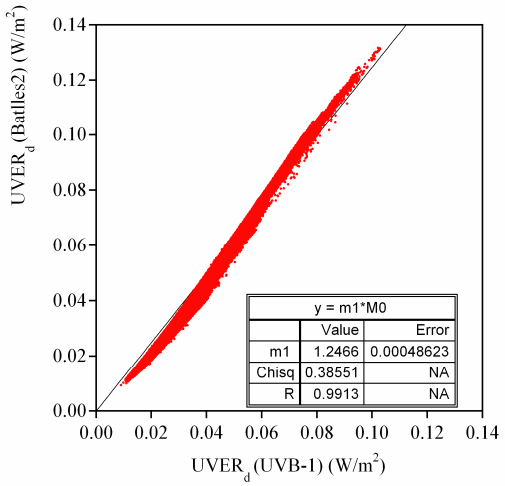


Figura 6.6.- Representación de la UVER difusa corregida con el modelo de Batlles2 frente a la experimental sin corregir.

En la Tabla 6.9 puede verse la desviación existente entre la UVER difusa corregida según los cuatro modelos utilizados y la experimental sin corregir. Cada uno de los modelos utilizados propone una corrección mayor que la del modelo anterior. En el siguiente apartado se analizará la bondad de estos resultados.

Tabla 6.9.- Desviación de la UVER difusa corregida con los modelos frente a la experimental sin corregir.

Modelo	Isótropo	Le Baron	Batlles	Batlles2
$\left(\frac{\mathrm{UVER}_{\mathrm{MODELO}}}{\mathrm{UVER}_{\mathrm{EXPERIMENTAL}}}-1\right)\cdot 100$	15.7%	20.2%	20.8%	24.7%

6.3.- Validación de los modelos de corrección de la banda

Con la finalidad de validar los modelos de corrección de la banda de sombra propuestos en el apartado anterior se van a comparar los resultados con los datos experimentales medidos con un espectrorradiómetro en primer lugar y con los datos simulados por dos modelos de transferencia radiativa posteriormente.

a) Intercomparación con un espectrorradiómetro

Considerando que un espectrorradiómetro es un instrumento más sensible que uno de banda ancha, tal y como se comentó en el Capítulo 2, no es conveniente que permanezca a la intemperie durante largos periodos de tiempo[9]. Por esa razón no se ha instalado con una banda de sombra junto al UVB-1 de YES y se ha optado por medir en la configuración de irradiancia directa y determinar la difusa mediante sustracción de la global menos la componente directa.

Para la validación mediante la intercomparación con un espectrorradiómetro se ha utilizado otro radiómetro UVB-1 de YES, que mide irradiancia eritemática global horizontal, y un espectrorradiómetro, OL754-O-PMT de OPTRONIC, que mide irradiancia directa.

[9] Con otras configuraciones como por ejemplo con la implementación de una fibra óptica sí sería posible.

Las medidas se realizaron con dichos instrumentos en la terraza de la Facultad de Física de la Universidad de Valencia trabajando simultáneamente. Se seleccionaron 6 días comprendidos entre Enero y Agosto de 2005 por sus condiciones óptimas de cielo despejado. A partir de estas medidas se calcula la UVER difusa mediante la ecuación 6.1, pero aplicada al rango de la irradiancia eritemática:

$$\mathrm{UVER_d} = \mathrm{UVER_g} - \mathrm{UVER_b} \cdot \cos\theta \qquad (6.16)$$

donde $\mathrm{UVER_d}$ es la UVER difusa horizontal que queremos calcular, $\mathrm{UVER_g}$ es la UVER global horizontal medida con el radiómetro YES-UVB-1, $\mathrm{UVER_b}$ es la UVER directa normal medida con el espectrorradiómetro OPTRONIC OL754-O-PMT y θ es el ángulo cenital solar. Sin embargo para que la expresión 6.16 sea consistente se tiene que referir todo al mismo instrumento por lo que es necesario corregir las medidas de la UVER global del YES-UVB-1 con respecto a la obtenida con el espectrorradiómetro. La relación entre ambas se deduce de la Figura 6.7 y su correspondiente ajuste por mínimos cuadrados. El cálculo de la UVER medida con el OL-754 se realiza integrando en el rango entre 280 y 400 nm el producto de la irradiancia por el espectro de acción eritemático.

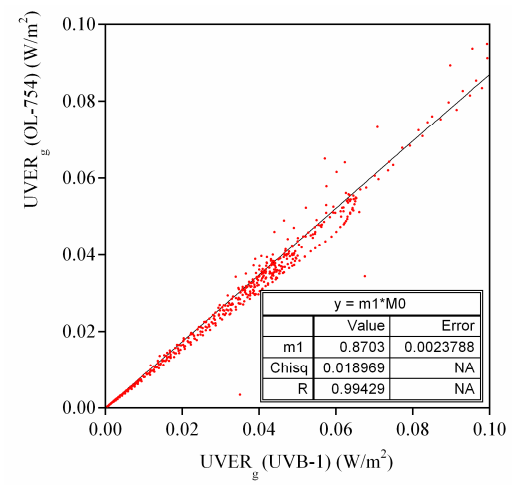


Figura 6.7.- Representación de la UVER global horizontal medida con el espectrorradiómetro OL-754 frente a la medida con el UVB-1.

En la Figura 6.8 se ha representado el ajuste lineal de la UVER difusa calculada mediante la ecuación 6.16 frente a la UVER difusa medida con la banda de sombra sin corregir. En las sucesivas Figuras 6.9 - 6.12 se muestran las correlaciones con la UVER corregida con los distintos modelos.

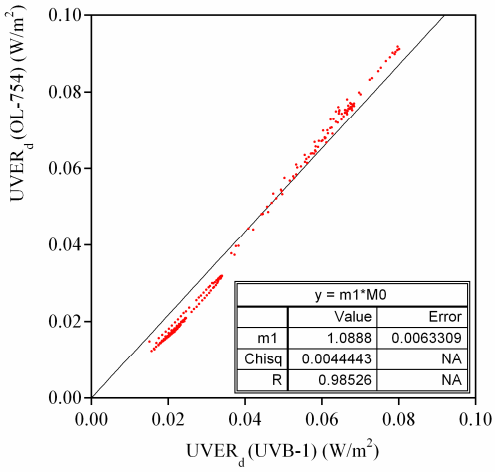


Figura 6.8.- Representación de la UVER difusa calculada a partir de las medidas del OL-754 frente a la medida con la banda de sombra sin corregir.

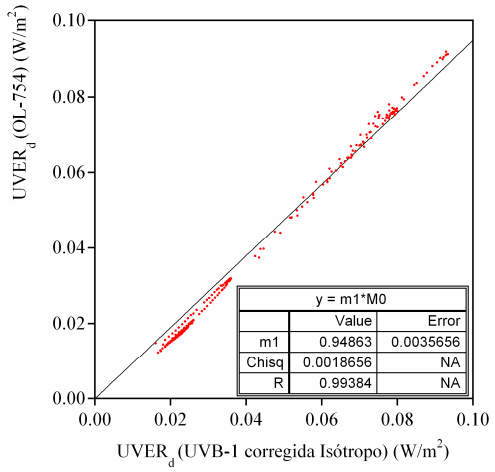


Figura 6.9.- Representación de la UVER difusa calculada a partir de las medidas del OL-754 frente a la medida con la banda de sombra corregida con el modelo isótropo.

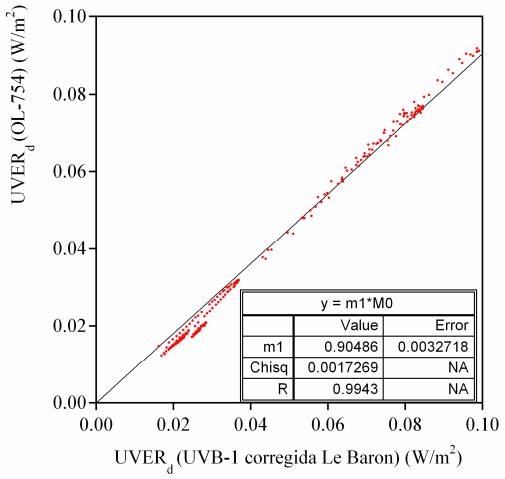


Figura 6.10.- Representación de la UVER difusa calculada a partir de las medidas del OL-754 frente a la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Le Baron.

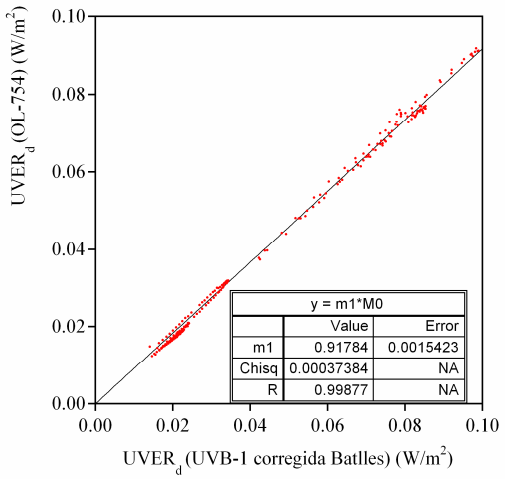


Figura 6.11.- Representación de la UVER difusa calculada a partir de las medidas del OL-754 frente a la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Batlles.

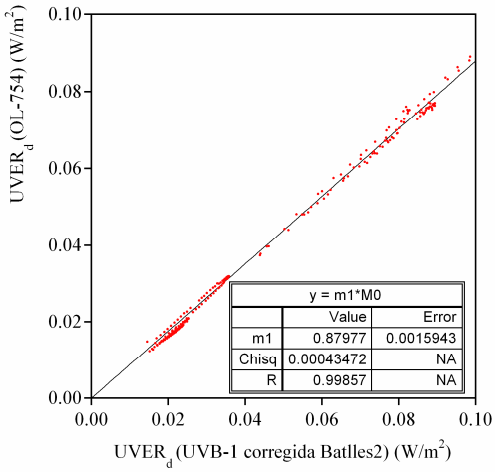


Figura 6.12.- Representación de la UVER difusa calculada a partir de las medidas del OL-754 frente a la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Batlles2.

Tabla 6.10.- Desviación de la UVER difusa corregida con los modelos frente a la medida con el OL-754. a) Sin corregir con respecto a la componente horizontal, b) Corregida.

Modelo	Sin corregir	Isótropo	Le Baron	Batlles	Batlles2
a)	1.089 ± 0.006	0.949 ± 0.004	0.905 ± 0.003	0.918 ± 0.002	0.880 ± 0.002
b)	1.25 ± 0.01	1.090 ± 0.007	1.040 ± 0.007	1.054 ± 0.005	1.011 ± 0.004

Un resumen de los resultados se halla en la Tabla 6.10. En ella se exponen los ajustes obtenidos directamente (a) y tras hacer la corrección con respecto a la desviación obtenida en la componente global (b), es decir dividiendo todas las pendientes entre 0.87. Como se puede apreciar la corrección mejora sustancialmente los resultados. En cuanto a los diferente métodos de corrección, el que más se aproxima a los datos medidos con el OL-754 es el de Batlles2, que se desvía en un 1.1%. El valor que peor ajusta, con una desviación del 10%, se obtiene con el modelo isótropo siendo este resultado el esperado ya que la condición de isotropía no se ajusta a aquellos días de cielo despejado que son mayoría en nuestras latitudes, tal y como se analizará posteriormente mediante el índice de

claridad. En este caso se ha calculado que la desviación entre la difusa del OL-754 y los datos de la banda de sombra sin corregir alcanza el 25%.

b) Simulación con dos modelos de transferencia radiativa

Para la validación mediante la simulación de la UVER difusa con modelos de transferencia radiativa, se han utilizado los modelos SMARTS2.9 y SBDART2.4. El primero de ellos es un modelo de dispersión simple mientras que el segundo es un modelo de dispersión múltiple como se explicó anteriormente y con más detalle en el Capítulo 3 de esta memoria. En ambos casos se han tomado como parámetros de entrada más significativos el contenido total de ozono estrastosférico proporcionado por el satélite TOMS, de manera análoga a la predicción del Índice UV, y el espesor óptico de aerosoles (para 500 nm en el caso del SMARTS y para 550 nm en el del SBDART). En el caso de este último parámetro se han utilizado todas las medidas obtenidas para ese periodo mediante un fotómetro CIMEL CE - 318, que está ubicado en la terraza de la Facultat de Física. Se han utilizado datos simulados correspondientes al periodo comprendido entre Junio de 2004 y Abril de 2006 (25000 valores en total). De todos ellos se han considerado sólo aquellas medidas para las que se disponía de datos de espesor óptico de aerosoles y ángulo cenitales menores de 70º. También se han eliminado las medidas correspondientes a días de cielo cubierto.

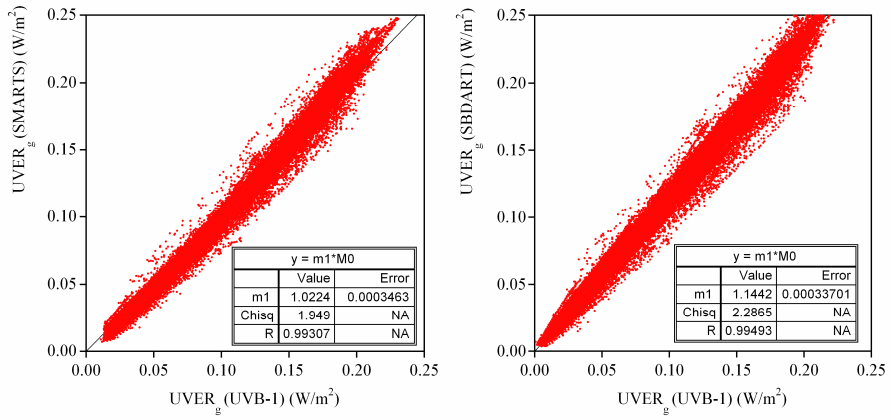


Figura 6.13.- Representación de la UVER global horizontal simulada con los modelos SMARTS y SBDART frente a la medida con el UVB-1.

Una vez realizada la simulación de la UVER con los modelos, éstos se han validado mediante la comparación de la UVER global horizontal obtenida por ambos y la obtenida mediante el radiómetro UVB-1 (Figura 6.13).

A partir de la representación gráfica se deduce que el modelo SMARTS reproduce mejor los resultados experimentales de UVER ya que sobrestima las medidas solamente en un 2%, mientras que el SBDART proporciona valores un 14% superiores a los registrados con el radiómetro. Estos resultados influirán sin duda en la comparación con la UVER difusa. Tal y como se vio en el Capítulo 5, el SBDART sobrestima en un porcentaje significativo los valores experimentales de la UVER como ya ha sido señalado por otros autores (De Backer *et al.*, 2001; De Cabo *et al.*, 2004).

En la Figura 6.14 se ha representado la UVER difusa simulada con los modelos frente a la medida con la banda de sombra sin corregir. Como puede verse en este caso la corrección supone un incremento del 24% según modelo SMARTS y del 45% según el SBDART. Sin embargo habría que tener en cuenta los resultados obtenidos anteriormente en la medida de la UVER global horizontal para poder extraer conclusiones de la componente difusa. Con esta consideración la corrección según el SMARTS sería de un 21% y de un 26% el incremento según el SBDART.

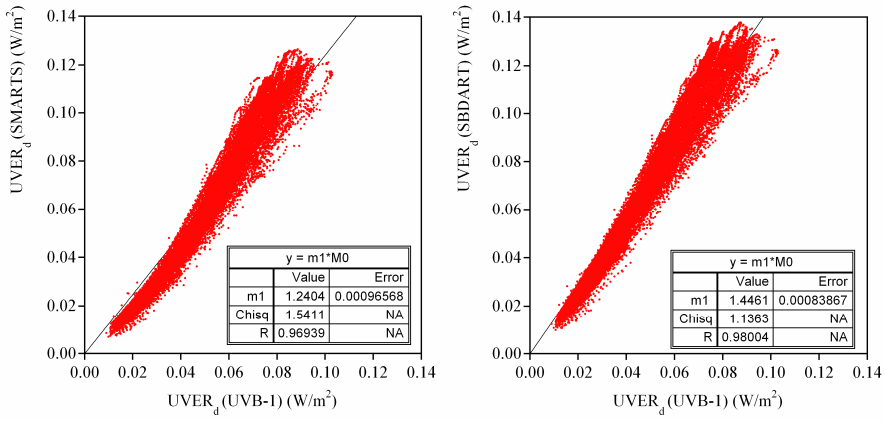


Figura 6.14.- Representación de la UVER difusa simulada con los modelos SMARTS y SBDART frente a la medida con la banda de sombra sin corregir.

A continuación, Figuras 6.15 – 6.19 se muestran las comparaciones de la UVER corregida con los distintos modelos propuestos frente a la irradiancia simulada con el SMARTS y el SBDART.

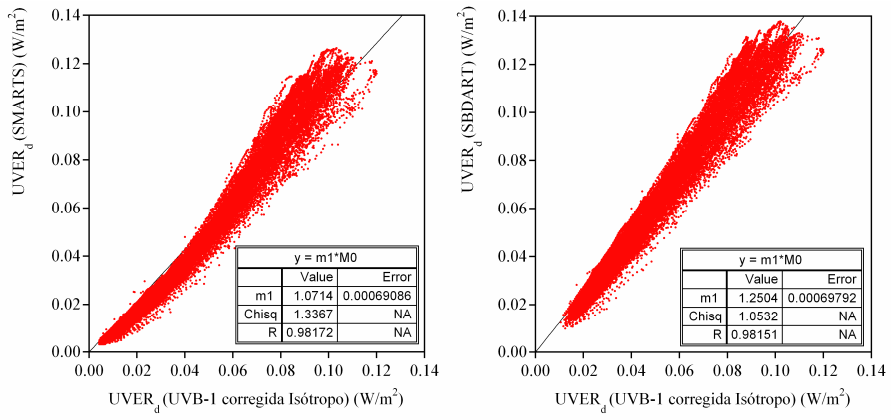


Figura 6.15.- Representación de la UVER difusa simulada con los modelos SMARTS y SBDART frente a la medida con la banda de sombra corregida con el modelo isótropo.

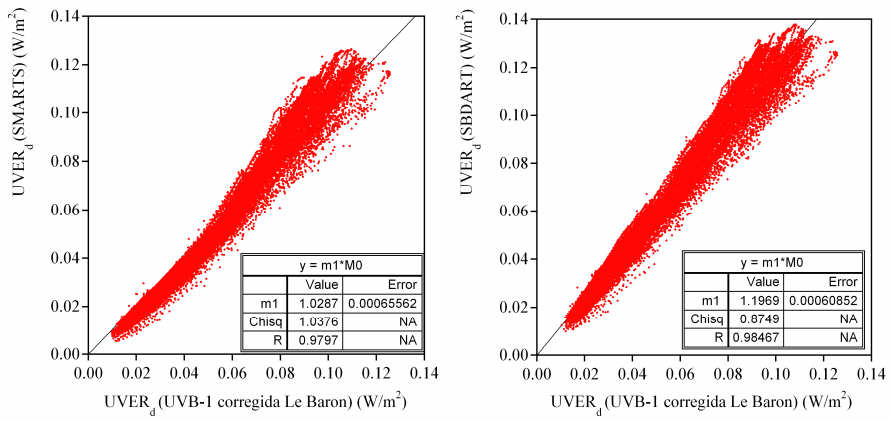


Figura 6.16.- Representación de la UVER difusa simulada con los modelos SMARTS y SBDART frente a la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Le Baron.

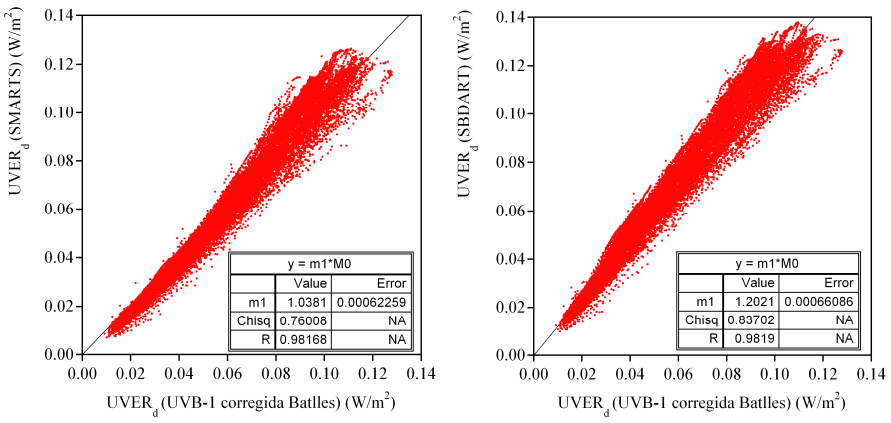


Figura 6.17.- Comparación de la UVER difusa simulada con los modelos SMARTS y SBDART y la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Batlles.

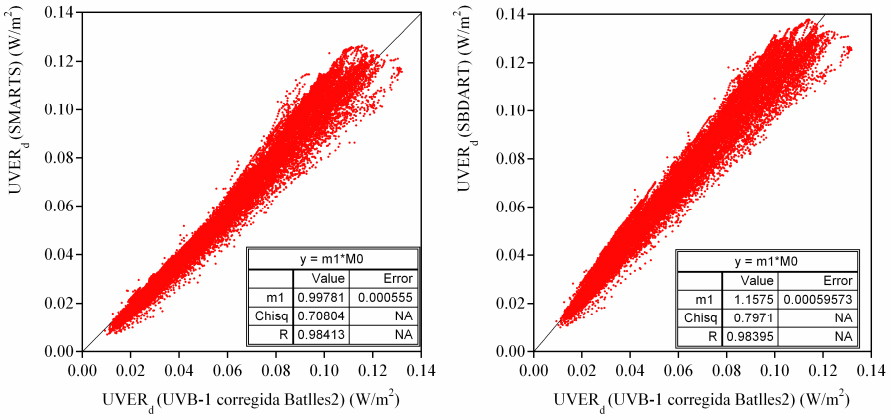


Figura 6.18.- Comparación de la UVER difusa simulada con los modelos SMARTS y SBDART y la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Batlles2.

En todos los casos se alcanzan un elevado valor del coeficiente de correlación, superior siempre al 0.98. El modelo de Batlles2 da los mejores resultados con un coeficiente ligeramente mayor y minimiza el parámetro chi-cuadrado, lo que muestra la bondad de este modelo. En las Tablas 6.11 y 6.12 se muestran los resultados de las correlaciones anteriores para el SMARTS y SBDART

respectivamente. Para que sean comparables se han corregido estos valores dividiéndolos por el valor de la pendiente en irradiancia horizontal.

Tabla 6.11.- Desviación de la UVER difusa corregida con los modelos frente a la simulada con el SMARTS. a) Sin corregir con respecto a la componente horizontal, b) Corregida.

Modelo	Sin corregir	Isótropo	Le Baron	Batlles	Batlles2
a)	1.240±0.001	1.0714±0.0007	1.0287±0.0007	1.0381±0.0006	0.99781±0.006
b)	1.213±0.001	1.048±0.001	1.006±0.001	1.0154±0.0009	0.9759±0.0009

Tabla 6.12.- Desviación de la UVER difusa corregida con los modelos frente a la simulada con el SBDART. a) Sin corregir con respecto a la componente horizontal, b) Corregida.

Modelo	Sin corregir	Isótropo	Le Baron	Batlles	Batlles2
a)	1.4461±0.0008	1.2504±0.0007	1.1969±0.0006	1.2021±0.0007	1.1575±0.0006
b)	1.264±0.001	1.0928±0.0008	1.0461±0.0008	1.0506±0.0009	1.0116±0.0008

Como conclusión de este análisis se puede afirmar que, en general los modelos propuestos corrigen adecuadamente los valores de difusa medidos con la banda de sombra. El método que consideramos menos válido para nuestra estación sería el isótropo, que presenta una desviación del 10% con respecto al SBDART y del 5% con respecto al SMARTS. El modelo más apropiado según esta validación sería el de Le Baron para el SMARTS y el de Batlles2 para el SBDART, con desviaciones en ambos casos del orden al 1%.

Los resultados obtenidos mediante la validación con el espectrorradiómetro OL-754 y el modelo SBDART son similares, sin embargo hay una ligera diferencia con los del SMARTS. Esto puede deberse a la estimación de la UVER difusa que genera el modelo. Según el OL-754 la UVER difusa sin corregir está subestimada en un 25% y según el SBDART en un 26%. Sin embargo el SMARTS rebaja esta cantidad al 21%. Esta diferencia inicial es arrastrada en los métodos de corrección propuestos. Este porcentaje es del mismo orden que el 24% de valor máximo mensual obtenido mediante medidas de banda ancha en un rango espectral más amplio (Muneer y Zhang, 2002).

Se ha realizado un análisis más detallado de la validación anterior ya que se dispone de una amplia base de datos de dos años. Por tanto se ha representado en

las Figuras 6.19 – 6.22 los ajustes lineales para cada modelo de corrección y para el SMARTS y SBDART pero separando el año natural en las cuatro estaciones.

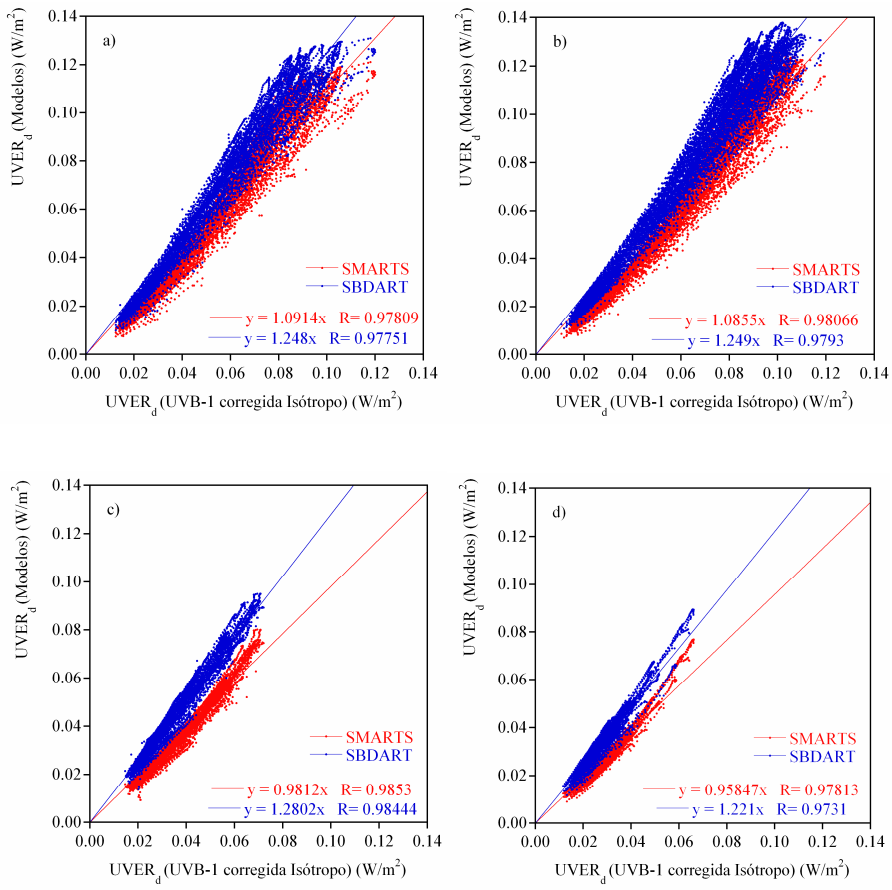


Figura 6.19.- Representación de la UVER difusa simulada con los modelos SMARTS y SBDART y la medida con la banda de sombra corregida con el modelo isótropo en a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno.

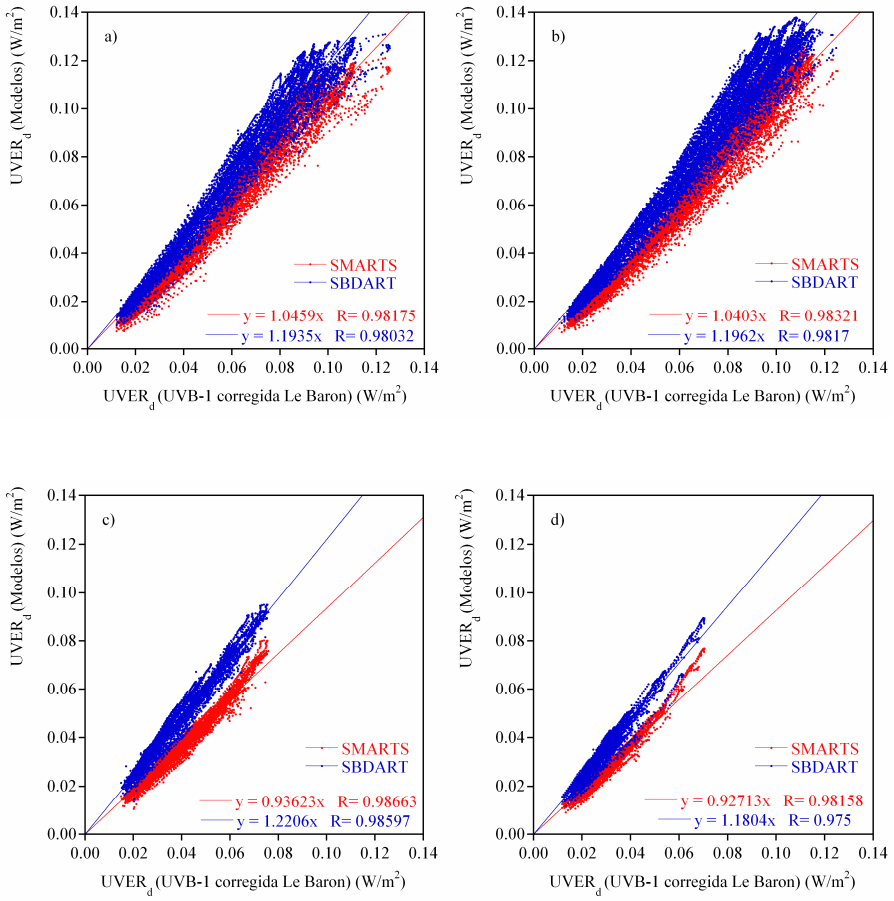


Figura 6.20.- Representación de la UVER difusa simulada con los modelos SMARTS y SBDART y la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Le Baron en a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno.

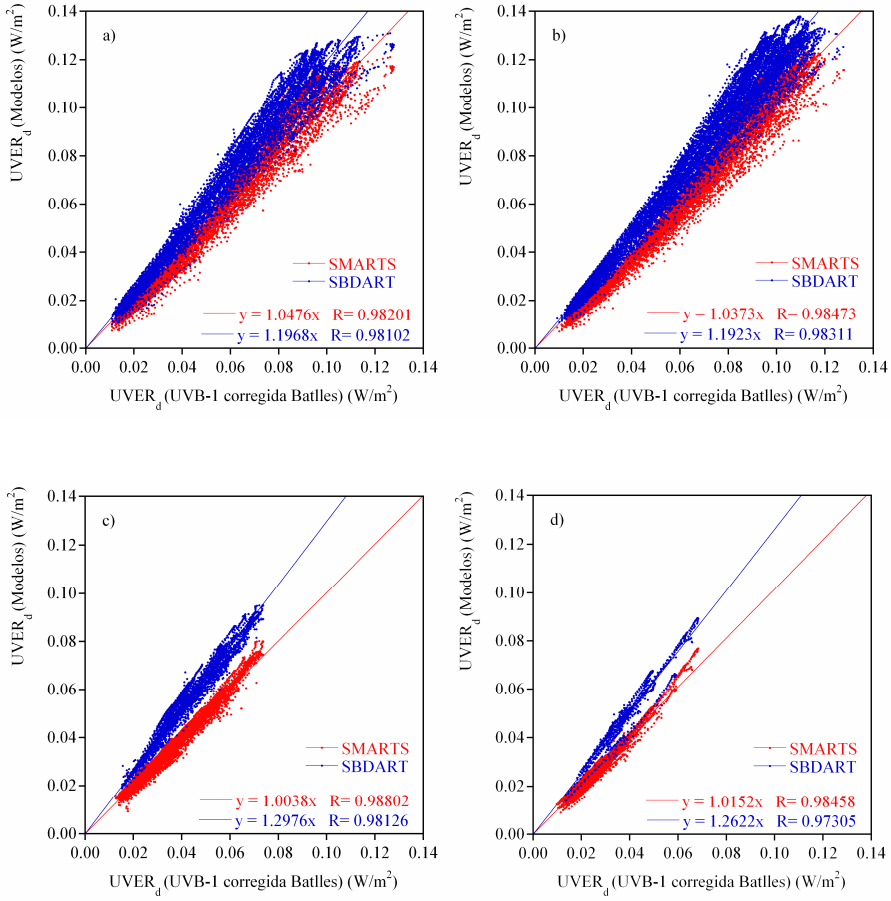


Figura 6.21.- Representación de la UVER difusa simulada con los modelos SMARTS y SBDART y la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Batlles en a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno.

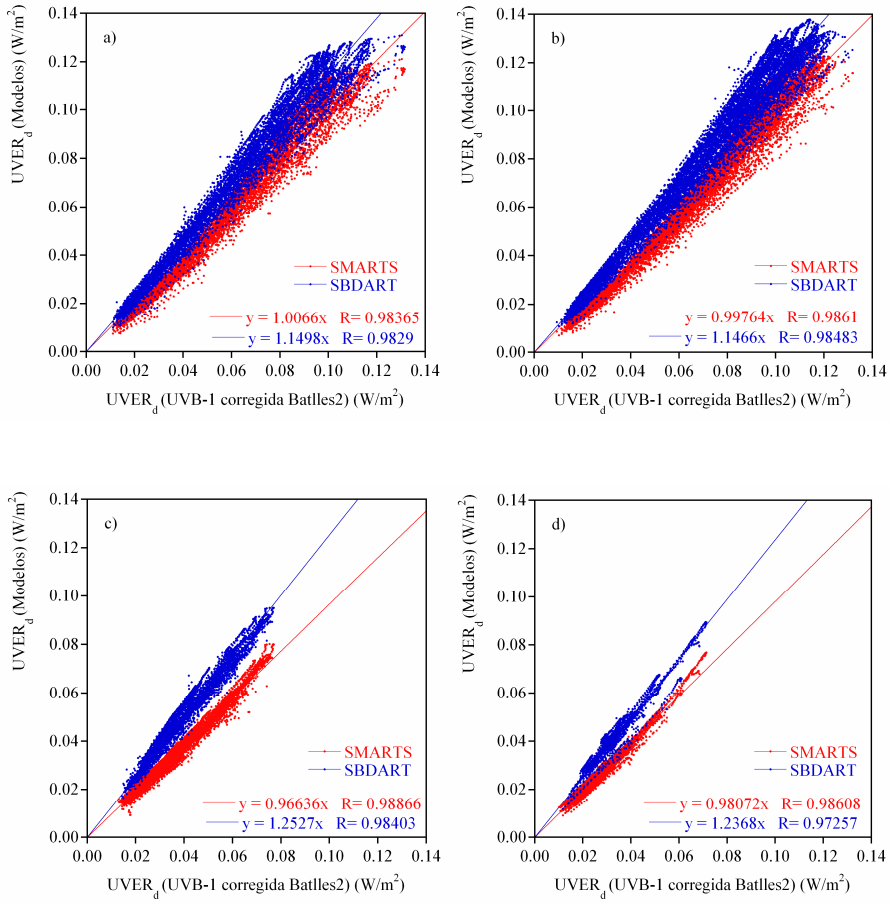


Figura 6.22.- Representación de la UVER difusa simulada con los modelos SMARTS y SBDART y la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Batlles2 en a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno.

De las gráficas anteriores se deduce que se pueden agrupar las pendientes de los ajustes en dos grupos: primavera-verano, otoño-invierno dadas sus órdenes de magnitud que son similares y para ambos modelos, SMART y SBDART. Así los valores obtenidos en primavera y verano se ajustan más a los simulados que en

otoño e invierno. En este sentido los modelos isótropo, de Le Baron y Batlles infravaloran la simulada con el SMARTS en primavera y verano mientras que la sobrestiman en otoño e invierno. Esta situación no se da con los datos del SBDART que siempre son más elevados que los proporcionados por los modelos de corrección de la banda de sombra. Asimismo cabe destacar que los coeficientes de correlación de los ajustes son bastante altos incluso en invierno, con valores siempre superiores a 0.97. A continuación en las Tablas 6.13 y 6.14 se han desglosado estos resultados mensualmente corrigiéndolos con respecto a la irradiancia horizontal.

Tabla 6.13.- Análisis mensual de la desviación de la UVER corregida mediante modelos con respecto al SMARTS corregido con respecto a la componente horizontal.

SMARTS	Isótropo	Le Baron	Batlles	Batlles2
Enero	0.899±0.002	0.880±0.002	0.961±0.005	0.955±0.002
Febrero	0.932±0.003	0.894±0.002	0.986±0.002	0.948±0.002
Marzo	1.031±0.003	0.982±0.002	1.013±0.002	0.970±0.002
Abril	1.080±0.003	1.048±0.003	1.046±0.003	1.002±0.003
Mayo	1.106±0.003	1.058±0.002	1.057±0.002	1.012±0.002
Junio	1.057±0.002	1.010±0.002	1.010±0.002	0.973±0.001
Julio	1.059±0.002	1.014±0.002	1.009±0.002	0.972±0.001
Agosto	1.074±0.002	1.033±0.002	1.028±0.002	0.988±0.001
Septiembre	1.002±0.002	0.958±0.002	0.976±0.002	0.939±0.002
Octubre	0.960±0.002	0.909±0.001	0.971±0.002	0.933±0.001
Noviembre	0.941±0.002	0.912±0.002	1.010±0.002	0.965±0.002
Diciembre	0.934±0.002	0.912±0.001	---	0.990±0.003

En este estudio se han eliminado aquellos datos con ángulo cenitales mayores de 70º y aquellos cuyo factor de corrección resultante fuera menor que la unidad por carecer de sentido físico. Por esta razón no se disponen de datos para el mes de Diciembre con el modelo de Batlles.

Tabla 6.14.- Análisis mensual de la desviación de la UVER corregida mediante modelos con respecto al SBDART corregido con respecto a la componente horizontal.

SBDART	Isótropo	Le Baron	Batlles	Batlles2
Enero	1.055±0.002	1.032±0.002	1.131±0.006	1.123±0.003
Febrero	1.060±0.003	1.017±0.003	1.120±0.003	1.078±0.003
Marzo	1.120±0.003	1.066±0.003	1.100±0.003	1.054±0.002
Abril	1.288±0.003	1.235±0.003	1.245±0.003	1.042±0.002
Mayo	1.126±0.002	1.079±0.002	1.088±0.002	1.185±0.002
Junio	1.133±0.002	1.084±0.001	1.082±0.001	1.036±0.001
Julio	1.064±0.002	1.016±0.001	1.016±0.001	0.978±0.001
Agosto	1.070±0.002	1.023±0.002	1.017±0.001	0.980±0.001
Septiembre	1.127±0.002	1.081±0.002	1.077±0.002	1.034±0.002
Octubre	1.085±0.002	1.037±0.001	1.057±0.001	1.016±0.001
Noviembre	1.110±0.003	1.050±0.002	1.120±0.002	1.077±0.002
Diciembre	1.121±0.002	1.093±0.002	---	1.196±0.003

Del análisis mensual anteriormente realizado se deduce que el mes que más se ajusta a lo simulado es el de Junio para el SMARTS y las correcciones isótropa, de Le Baron y de Batlles, mientras que para la corrección de Batlles2 es el mes de Abril. Se observa una tendencia a disminuir la discrepancia entre los valores simulados y las correcciones en los valores de las pendientes mensuales existiendo un punto de inflexión en el valor mínimo que se da precisamente en el mes de mayor irradiancia, Junio. En el caso del SBDART, Tabla 6.14, no hay una tendencia a lo largo del año dado que, al contrario de lo que sucede con el SMARTS, todos los modelos propuestos infravaloran en mayor o menor medida al modelo de transferencia radiativa. El valor más próximo se da en los meses de Julio con las correcciones de Le Baron y Batlles mientras que para las otras correcciones se da en meses de otoño o incluso invierno.

Finalmente el modelo elegido para corregir la banda de sombra es el de Batlles2 por los buenos resultados hallados especialmente en la validación con el espectrorradiómetro OL-754 y con el SBDART. En las Figuras 6.23 y 6.24 se muestran los datos experimentales corregidos frente a los modelos SMARTS y SBDART respectivamente. Este análisis se ha realiza para cada estación del año y considerando la corrección de los modelos por la componente horizontal.

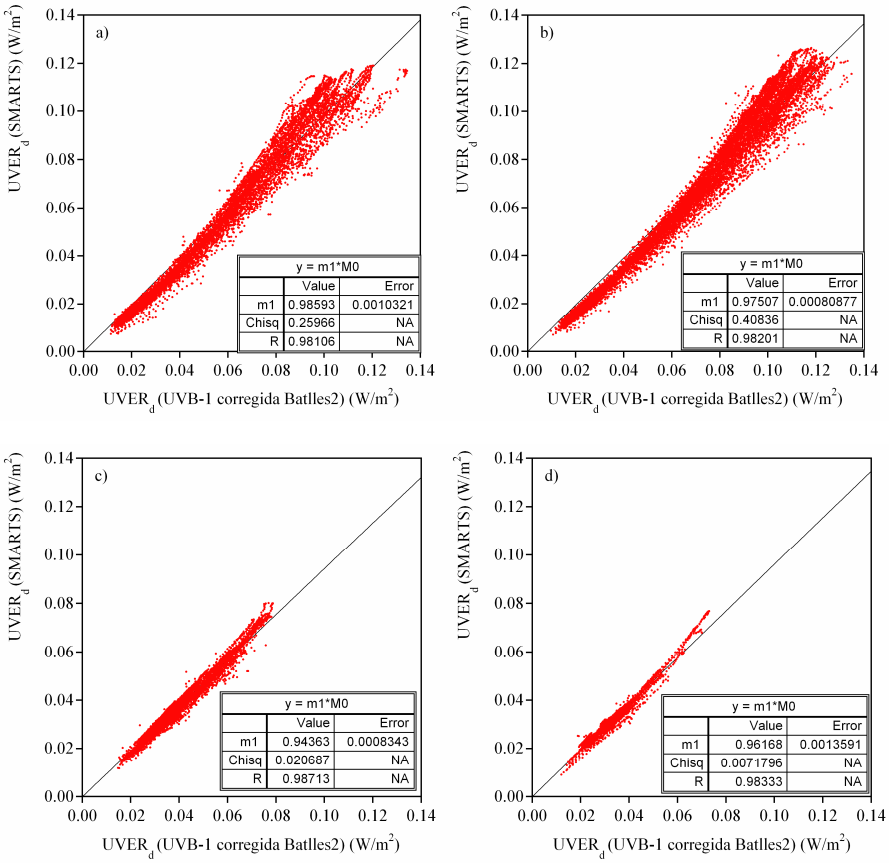


Figura 6.23.- Representación de la UVER difusa simulada con el modelo SMARTS corregida con respecto a la componente horizontal y la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Batlles2 en a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno.

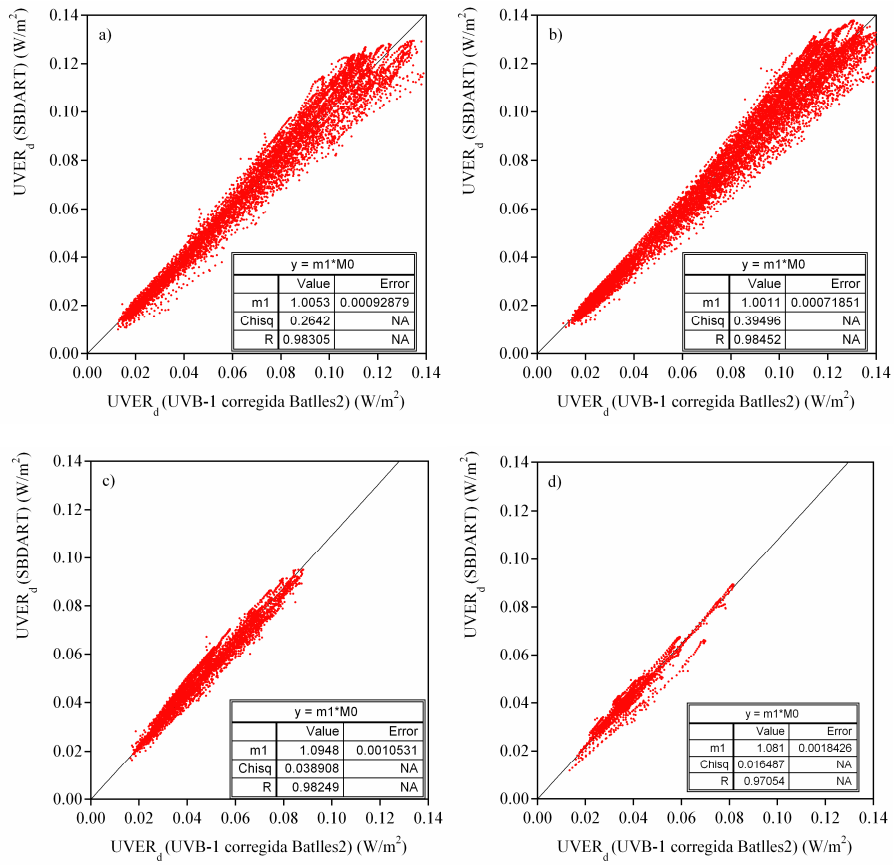


Figura 6.24.- Representación de la UVER difusa simulada con el modelo SBDART corregida con respecto a la componente horizontal y la medida con la banda de sombra corregida con el modelo de Batlles2 en a) Primavera, b) Verano, c) Otoño e d) Invierno.

El modelo de Batlles2 reproduce de forma fidedigna los datos simulados especialmente en primavera y verano, apreciándose una discrepancia mayor en otoño e invierno. La diferencia entre las estaciones puede llegar al 9%. En general el análisis por estaciones muestra que el modelo de Batlles2 sobrevalora los datos del SMARTS e infravalora lo del SBDART. Los datos de UVER analizados en los siguientes apartados están corregidos según el modelo Batlles2.

6.4.- Valores medios de la irradiancia eritemática difusa

Es un hecho conocido que un porcentaje muy alto de la irradiancia en los rangos de UVB y UVER se da en forma de radiación difusa. Una manera de determinar su cuantía es mediante la utilización de los parámetros correspondientes al índice de claridad y a la fracción de difusa.

El índice de claridad, k_t, permite establecer si un día es despejado. Este parámetro proporciona la disminución de la radiación global incidente, a causa de su paso a través de la atmósfera y, por lo tanto, indica el grado de disponibilidad de la irradiancia solar a nivel de la superficie terrestre y se define (Liu y Jordan, 1960) como:

$$k_t = \frac{I_g}{I_0} \tag{6.17}$$

donde I_g es la irradiancia global e I_0 la irradiancia extraterrestre, ambas en un plano horizontal. En la Figura 6.25 puede observarse la recurrencia de k_t para el caso de Valencia obtenido con valores de casi dos años de medidas. A partir de esa figura se puede concluir que hay predominio de cielos despejados ya que los porcentajes más elevados se dan en los intervalos comprendidos entre 0.6 y 0.8. Se está preparando un trabajo donde se realiza un análisis más detallado de estos valores en Valencia, junto a los índices de claridad del rango UV y UVER (Tena *et al.*, 2006).

La fracción de difusa, k, (Liu y Jordan, 1960), también denominada índice de nubosidad, da cuenta del cociente entre la componente difusa respecto a la global de la radiación. En este estudio se ha hallado la fracción de difusa para el rango de UVER:

$$k_{UVER} = \frac{I_{dUVER}}{I_{gUVER}} \tag{6.18}$$

siendo I_{dUVER} y I_{gUVER} la radiación difusa y global respectivamente correspondientes a dicho rango espectral.

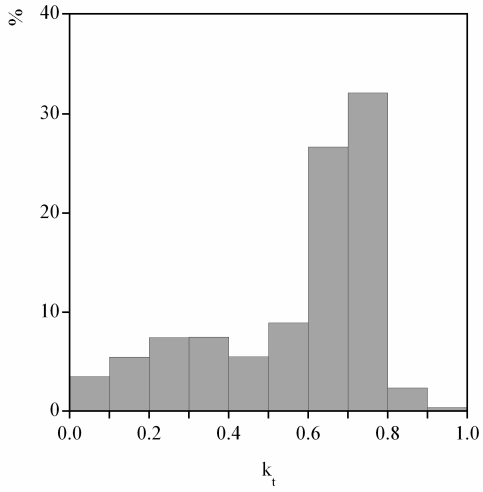


Figura 6.25.- Recurrencia del índice de claridad para Burjassot (Valencia).

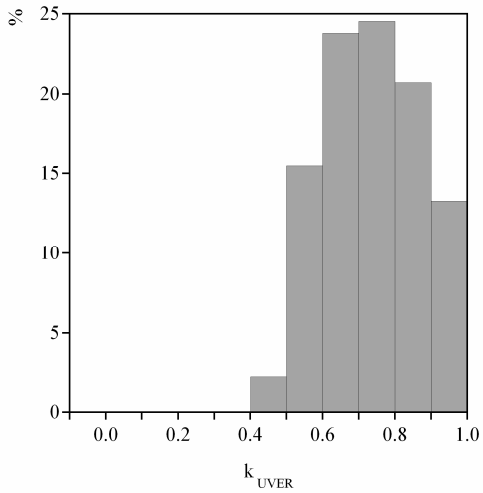


Figura 6.26.- Recurrencia de la fracción de la UVER difusa para Burjassot (Valencia).

En la Figura 6.26 se ha representado un histograma con los valores correspondientes a la fracción de la UVER difusa y donde se aprecia que todos los valores están por encima del 40% alcanzándose en más de la mitad de los casos valores comprendidos entre el 60 y el 80%. Considerando los valores de k_{UVER} correspondientes a ángulos cenitales menores de 70 grados y analizando los datos en función del índice de claridad, se obtienen los valores que vienen reflejados en la Tabla 6.15. Por lo tanto es posible afirmar que aún en condiciones de cielo muy claro, (k_t próximo a 0.8), tenemos un valor medio de la componente difusa en el rango de interés del 62%, siendo este porcentaje aún mayor para el resto de condiciones atmosféricas.

Tabla 6.15.- Valores de k_{UVER} en cada intervalo de kt para dos años en Burjassot (Valencia).

Intervalos	k_{UVER}		
	Nº datos (en %)	Media	Mediana
$0.1 < k_t < 0.2$	2.7	0.91	0.91
$0.2 < k_t < 0.3$	5.9	0.93	0.93
$0.3 < k_t < 0.4$	6.8	0.92	0.92
$0.4 < k_t < 0.5$	5.7	0.88	0.88
$0.5 < k_t < 0.6$	9.8	0.82	0.83
$0.6 < k_t < 0.7$	28.6	0.73	0.73
$0.7 < k_t < 0.8$	37.2	0.62	0.62

6.5.- El Índice UV para radiación difusa

Los valores máximos alcanzados para la UVER difusa son significativamente menores que los obtenidos para la UVER global. Sin embargo, la forma de la evolución horaria es la misma con un máximo a las 12 GMT. En la Figura 6.27 se muestran a modo de ejemplo la evolución horaria de la UVER difusa para dos días despejados, el 2 de Julio de 2004 y el 2 de Diciembre de 2004 representando los valores extremos alcanzados a lo largo del año.

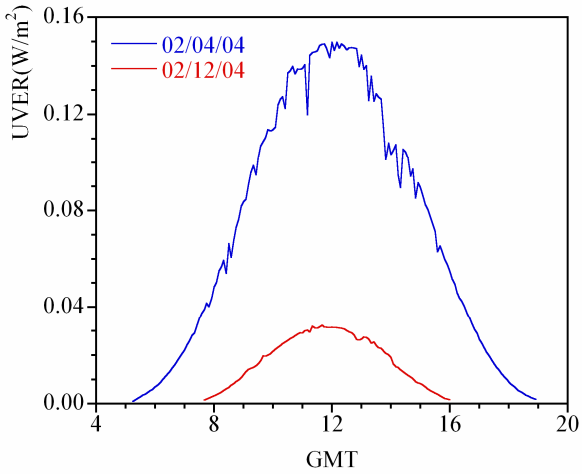


Figura 6.27.- Evolución horaria de la UVER difusa.

Los valores extremos de la UVER implican un valor del Índice UV máximo diario comprendido entre uno y seis. Un estudio más detallado del Índice UV para la UVER difusa se expone en las Tablas 6.16 y 6.17. En ambas tablas se especifican los datos correspondientes al análisis estadístico del Índice UV pero en el primer caso se consideran todos los valores horarios del UVI mientras que en el segundo sólo se tienen en cuenta los de las 12 GMT. Se trata de un estudio efectuado por meses en todo el periodo comprendido entre Mayo de 2004 y Abril de 2006.

A partir de estos resultados se deduce que en el 80% de los casos, el valor máximo y el valor para las 12:00 GMT del Índice UV son iguales a pesar del diferente número de datos considerados en cada caso. Si se considera la coincidencia o discrepancia en una unidad este porcentaje aumenta hasta un 97%.

El valor máximo mensual se produce en Julio y corresponde a un Índice UV de 6, lo que indica un UVI alto según la clasificación de la WHO (2003) pero en cualquier caso muy por debajo de los valores típicos de Índice UV global horizontal registrados para esta época del año.

Tabla 6.16.- Valores del Índice UV para la UVER difusa medida con la banda de sombra desde Mayo de 2004 hasta Abril de 2006.

Mes	Nº datos	Índice UV		
		Máximo	Medio	Mediana
Enero	862	2	1	1
Febrero	1121	2	1	1
Marzo	3070	4	2	2
Abril	7610	5	2	2
Mayo	6244	6	2	2
Junio	9325	6	2	2
Julio	9503	6	2	2
Agosto	9163	5	2	2
Septiembre	5163	5	2	2
Octubre	3422	3	2	2
Noviembre	1740	3	2	1
Diciembre	238	1	1	1

Los valores medios y la mediana calculada en ambos casos no siempre son coincidentes como cabía esperar. No son comparables porque en la Tabla 6.16 estamos considerando todo el día, con valores bajos cercanos al orto y ocaso,

mientras que en al Tabla 6.17 sólo estamos tomando los datos del mediodía y por tanto más elevados.

Tabla 6.17.- Valores de Índice UV a las 12:00 GMT para la UVER difusa medida con la banda de sombra desde Mayo de 2004 hasta Abril de 2006.

Mes	Nº datos	Índice UV		
		Máximo	Medio	Mediana
Enero	30	2	1	1
Febrero	21	2	2	2
Marzo	29	4	3	3
Abril	59	4	3	3
Mayo	42	5	4	4
Junio	59	5	4	4
Julio	61	6	5	5
Agosto	62	5	4	4
Septiembre	40	4	3	3
Octubre	44	3	2	2
Noviembre	36	2	2	2
Diciembre	13	1	1	1

Una vez analizado el Índice UV difuso, sería interesante evaluarlo junto al obtenido para la irradiancia global. Una forma de comparar el Índice UV de la componente difusa con el de global es realizando una representación de uno frente al otro para todo el periodo de tiempo considerado, Figura 6.28. A pesar de que la definición estricta del Índice UV es un número entero, para realizar los cálculos en

este caso se tomando el valor resultante del producto de UVER por 40, y por tanto la constante de proporcionalidad obtenida será válida para ambas magnitudes. La pendiente del correspondiente ajuste por mínimos cuadrados es de 1.671, es decir, que para el valor más elevado del Índice UV difuso, 6, le correspondería según esta relación un Índice UV global de 10.

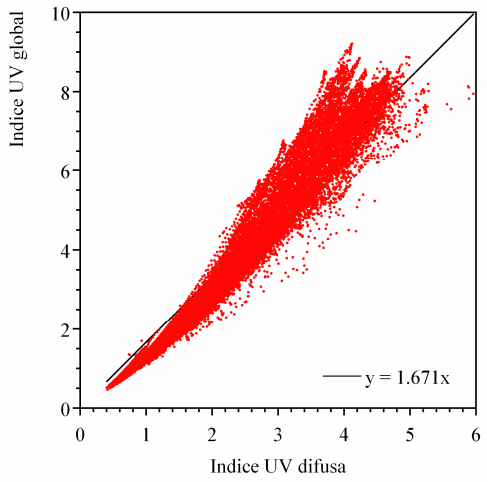


Figura 6.28.- Índice UV de la irradiancia global frente al de la componente difusa, teniendo en cuenta todos los datos disponibles.

Considerando sólo los datos de las 12:00 GMT, como representativos del Índice UV máximo, se obtiene la Figura 6.29. En este caso la constante de proporcionalidad es algo mayor, dando un valor del Índice UV global de 11 a partir de un Índice UV para la componente difusa de 6. Estos ajustes permiten estimar el Índice UV para la componente difusa si no se disponen de medidas experimentales adecuadas, por ejemplo en el caso de estaciones pertenecientes a las redes de medida, donde sólo está instalado un radiómetro midiendo de forma automática en global. En la Tabla 6.18 se ha calculado el Índice UV para difusa a partir de las pendientes de los ajustes anteriores.

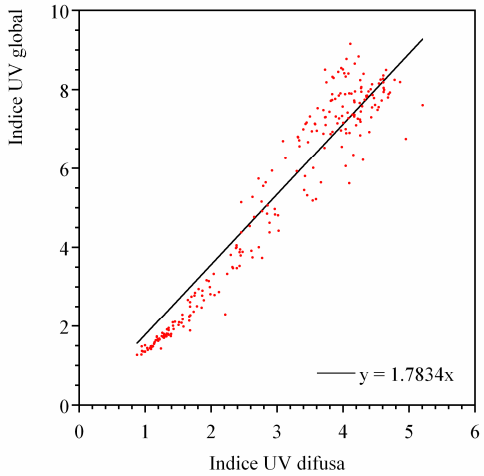


Figura 6.29.- Índice UV de la irradiancia global frente al de la componente difusa correspondientes a las 12:00h GMT.

Tabla 6.18.- Índice UV difusa calculados a partir del valor del Índice UV global.

Índice UV global	Índice UV difusa (ajuste 1)	Índice UV difusa (ajuste 2)
1	1	1
2	1	1
3	2	2
4	2	2
5	3	3
6	4	3
7	4	4
8	5	4
9	5	5
10	6	6

Capítulo 7

UVER en planos inclinados

Un estudio realista de la radiación UV que afecta a los seres vivos implica su análisis sobre planos de incidencia distintos al horizontal. En este capítulo se describe el dispositivo experimental desarrollado para el estudio de la UVER y el Índice UV en planos situados en las cuatro orientaciones: Norte, Sur, Este y Oeste, inclinados 40º. Asimismo se analizan las discrepancias de las dosis eritemáticas acumuladas en un año según el fototipo y la dirección de incidencia.

7.1.- Dispositivo experimental de la UVER en planos inclinados

La medida de la irradiancia eritemática incidente sobre superficies horizontales no siempre es el método más adecuado para poder estimar la dosis real recibida por los seres humanos dada su verticalidad. Por este motivo el conocimiento de la radiación incidente sobre superficies inclinadas resulta relevante para estudios dosimétricos. En la actualidad se dispone de los primeros estudios sobre la radiación UV en planos inclinados. En concreto, un análisis de medidas espectrales de UV en planos verticales y para varios ángulos azimutales fue llevado a cabo por Webb *et al.* (1999) y sirvieron para validar recientemente la UVER experimental con la simulada con el modelo de transferencia radiativa STAR (Mech y Koepke, 2004). Por otro lado Parisi y Kimlin (1999) muestran que la UVER global en un plano perpendicular al Sol llega a ser un 27% mayor que la incidente sobre uno horizontal. La influencia de la topografía y la reflectividad del suelo han sido estudiadas por Weihs (2002), deduciendo que la UVER en planos inclinados aumenta considerablemente con la altitud.

Para estudiar los efectos de la irradiancia sobre planos distintos al horizontal, el Grupo de Radiación Solar de Valencia ha diseñado y puesto en funcionamiento recientemente una estación de medida de UVB. La estación de medida está ubicada en la azotea del edificio C de la Facultat de Física, en Burjassot y cuenta con cuatro radiómetros de banda ancha YES-UVB-1. Uno de ellos mide irradiancia global en el plano horizontal. Un segundo tiene acoplada una banda de sombra que impide que la radiación directa del Sol incida sobre el detector del aparato, por lo que realiza medidas de irradiancia difusa en el plano horizontal y cuyos resultados fueron analizados en el Capítulo 6 de esta memoria. Los otros dos instrumentos toman medidas de irradiancia global sobre planos inclinados 40º, alternando las orientaciones Norte-Sur y Este-Oeste.

El dispositivo se construyó en base a dos premisas: por un lado, realizar medidas de UVB y UVER sobre planos inclinados; por otro se deseaba que los radiómetros tomaran medidas encarados hacia cuatro ángulos azimutales, correspondientes a las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste. Para no tener que utilizar tantos instrumentos diferentes se diseñó el dispositivo de las Figura 7.1, consistente en una plataforma capaz de girar 90º sobre su propio eje, de tal forma que, si se disponen dos piranómetros en orientaciones opuestas, éstos son capaces de medir en una posición hacia el Norte y el Sur y, en la otra, hacia el Este y el Oeste. Los radiómetros están inclinados un ángulo próximo a la latitud de Burjassot (Valencia) (39.5º), que según distintos estudios es el ángulo optimo para captar la

máxima radiación en planos inclinados (Hartley *et al.*, 1999). A través de un sistema temporizador se consigue que la plataforma gire cada 5 minutos, alternando ambas posiciones. Las medidas son tomadas en la mitad de este periodo, con el fin de asegurar que los datos se correspondan al momento en que el dispositivo se encuentra estable en la posición deseada, bien Norte-Sur, bien Este-Oeste, y no en una posición intermedia. En consecuencia, los datos experimentales consisten en valores registrados cada cinco minutos en hora GMT para los instrumentos en posición horizontal y cada diez minutos para los inclinados, pues han de pasar diez minutos para retomar la misma posición.

Figura 7.1.- Dispositivo experimental para la medida de la UVER sobre planos inclinados.

7.2.- Resultados experimentales en planos inclinados

a) Calibrado

En el Capítulo 5 se detallaron los calibrados a los que fueron sometidos los radiómetros pertenecientes a la red de Conselleria así como el sensor de referencia. Análogamente se calibraron los piranómetros UVB-1 perteneciente a la estación de medida de UVER difusa y en planos inclinados, tanto en el 2003 como en el 2005. Se han generado, por transferencia de calibración, las matrices de las constantes de conversión dependientes del ángulo cenital y del contenido total de ozono, ADACAL, (Anexo B). No obstante el valor de la constante de conversión promedio correspondiente a los valores más comunes de la columna total de ozono y calculada por el mismo procedimiento detallado en el Capítulo 5 se muestra en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1.- Evolución de las constantes de conversión de los radiómetros utilizados.

Año	2002		2003		2005	
(W/m^2 V)	UVER	UVB	UVER	UVB	UVER	UVB
Sensor 1, difusa	0.141	1.093	0.117	0.903	0.147	1.139
Sensor 2, NE	0.141	1.093	0.114	0.883	0.126	0.973
Sensor 3, SO	0.141	1.093	0.114	0.884	0.137	1.064

En el primer calibrado efectuado en el 2003 el sensor que mide UVER difusa disminuyó su constante de conversión en un 17% con respecto a la del fabricante y los dos radiómetros restantes en un 19%. Esta disminución es similar a la hallada con el resto de instrumentos analizados incluido el utilizado como patrón. En cuanto a las constantes de conversión del 2005, aumenta respecto a la original en un 4% para el primer sensor mientras que disminuye en un 11% para el segundo y en un 3% para el tercero. El sensor 1 presenta para el 2005 el valor más alto de la constante de conversión para la medida de la UVER de todos los radiómetros analizados.

b) Adquisición de datos

Todos los piranómetros de radiación UVER están conectados a un sistema de adquisición de datos que permite recoger las medidas cada cinco minutos, junto con otros datos meteorológicos como velocidad y dirección de viento, temperatura, humedad, radiación solar global y directa, etc. En la figura 7.2 se observa la pantalla del ordenador del sistema de adquisición de datos que se comanda mediante un programa en Visual Basic que está diseñado para conectarse periódicamente a un servidor de hora (en este caso de la Universitat de València) para que en cada momento el sistema esté ajustado temporalmente. Además es posible comprobar si el dispositivo está almacenando correctamente los datos mediante un indicador que da cuenta en cada momento de la posición azimutal del dispositivo, en movimiento o en la posición Norte-Sur (N-S) o Este-Oeste (E-O). El sistema se reinicia automáticamente cada nueve días para evitar problemas de mal funcionamiento o problemas en el corte de suministro eléctrico.

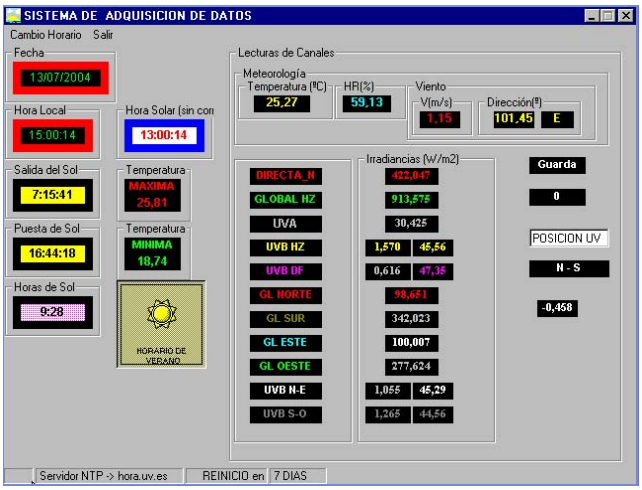


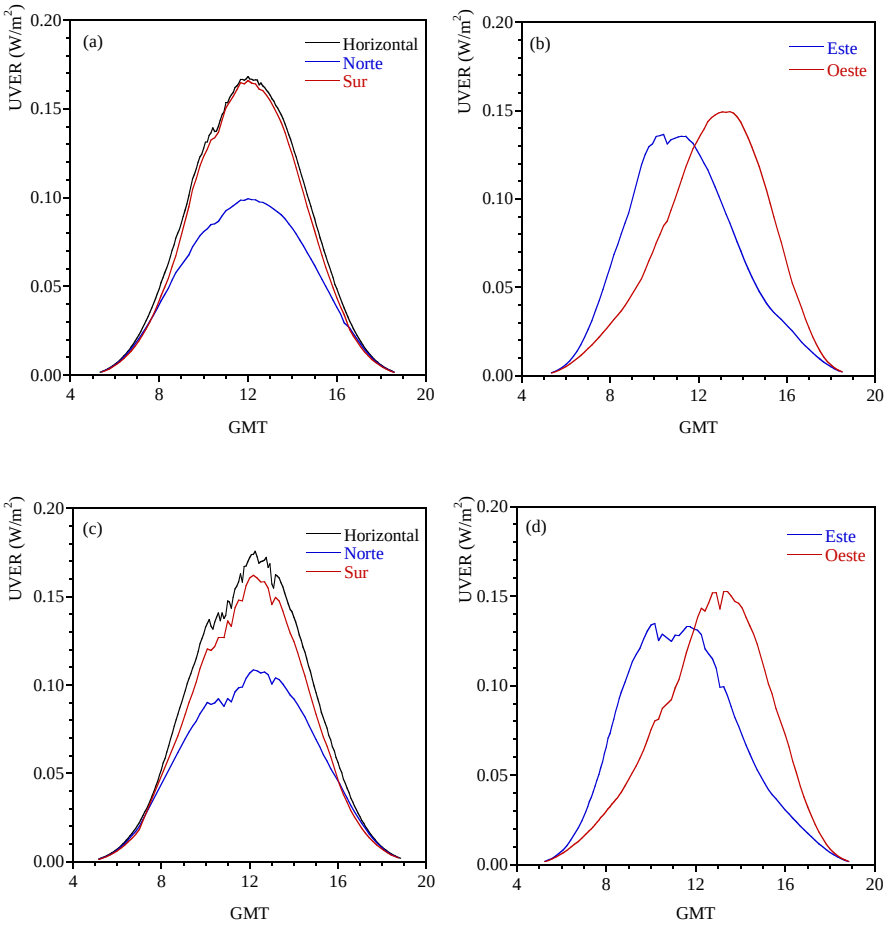
Figura 7.2.- Pantalla del ordenador conectada al sistema de adquisición de datos. Plataforma en la posición Norte-Sur.

c) UVER e Índice UV en distintas orientaciones

El dispositivo descrito anteriormente nos ha permitido obtener datos de radiación solar UVB y eritemática para diferentes orientaciones. Presentamos aquí un análisis de las medidas de UVER registradas desde el 16 de Febrero de 2004 hasta el 31 de Agosto de 2005, lo que supone un volumen de datos de más de un año.

En la Figura 7.3 se muestra la evolución horaria del UVER para las diferentes orientaciones en un par de días despejados con diferente espesor óptico de aerosoles (AOD), (15 Mayo de 2004, $AOD_{\lambda = 500nm}$ = 0.226 y 10 Junio de 2004, $AOD_{\lambda = 500nm}$ = 0.468), también en un día parcialmente nuboso (9 Mayo 2004) y en un día cubierto (16 Abril 2004). Esta Figura muestra como en el caso de días despejados o parcialmente nubosos el UVER presenta un máximo muy próximo a las 12:00 GMT en las posiciones Norte y Sur, mientras que el máximo para las orientaciones Este y Oeste está localizado siempre antes y después del mediodía respectivamente. La hora a la que se produce el máximo para estas orientaciones es a las 11:00 y a las 13:00 GMT aproximadamente, para Este y Oeste respectivamente. Según esta Figura el máximo valor del UVER para la orientación Sur es casi el doble que para la orientación Norte, por lo que la dosis eritemática recibida en un plano orientado

al Sur será mucho mayor que sobre un plano orientado al Norte. Sin embargo para días completamente cubiertos, Figura 7.3 (g) y (h), no se distingue ninguna diferencia entre los máximos en las distintas orientaciones, superponiéndose las curvas para todos los planos considerados. Análogamente sucede con la irradiancia en el rango de UVB y con el Índice UV (Marín *et al.*, 2004). Otra forma de analizar la distinta evolución horaria en función de la orientación está representada en la Figura 7.4 apreciándose cómo el valor máximo de irradiancia de las cuatro orientaciones se da en el plano Este por la mañana, en el Sur al mediodía mientras que por la tarde el máximo valor de UVER se registra en el plano Oeste.



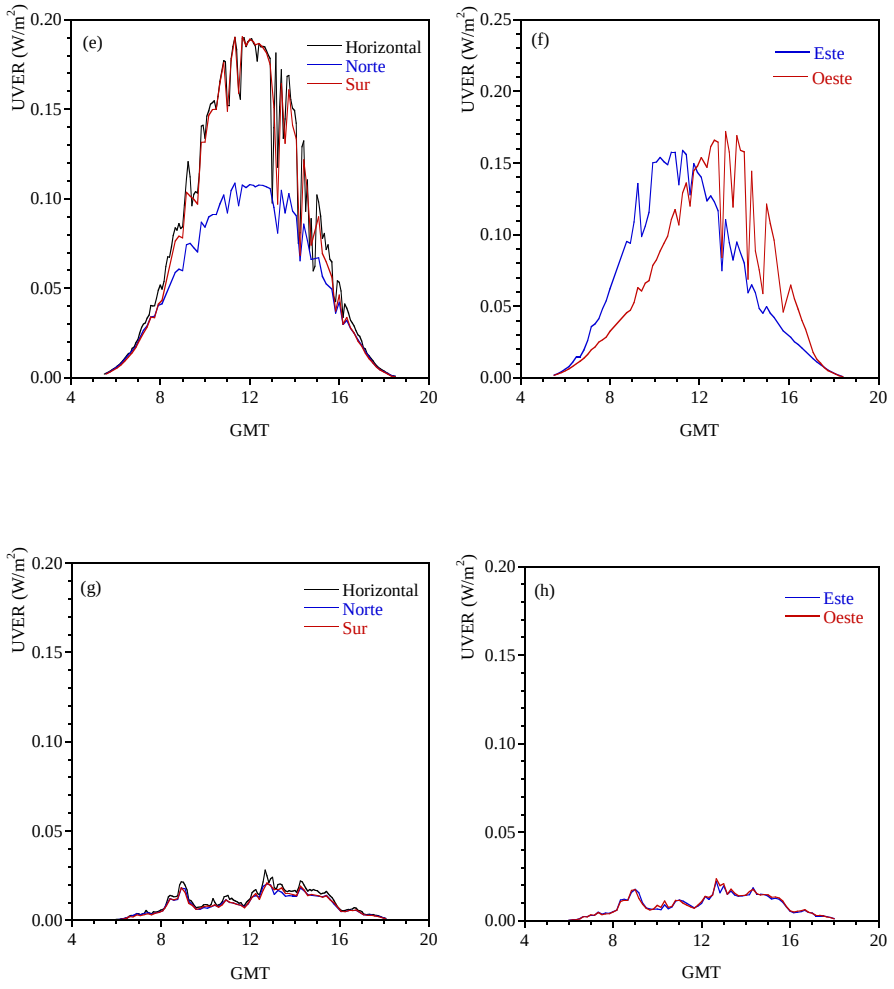


Figura 7.3.- Evolución horaria de la UVER en diferentes orientaciones: horizontal, Norte, Sur, Este y Oeste en un día despejado con $AOD_{\lambda = 500\ nm}$ = 0.226 (a) (b), con $AOD_{\lambda = 500\ nm}$ = 0.468 (c) (d), en un día parcialmente nuboso (e) (f) y en un día cubierto (g) y (h).

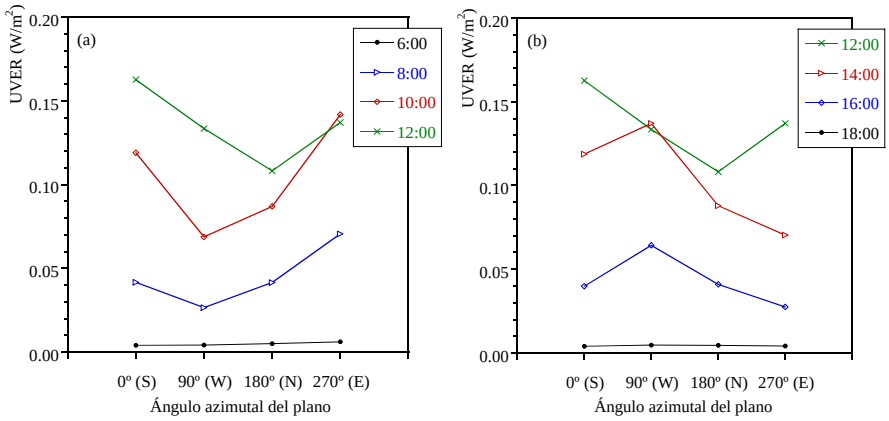


Figura 7.4.- Evolución de la irradiancia UVER en función del ángulo azimutal de incidencia y para distintas horas. (a) Mañana, (b) Tarde.

Es posible analizar la influencia que tienen los aerosoles en los valores máximos diarios de la UVER a partir de la Figura 7.3. En concreto para el día 10 de Junio de 2004 (c) y (d) se obtiene un valor máximo de la UVER menor que para el día 15 de Mayo de 2004 (a) y (b), y esto se debe a la diferencia en el parámetro del espesor óptico de aerosoles. De hecho, la turbiedad es bastante mayor en el primer caso, como puede distinguirse en la Figura 7.5 donde se presenta el espesor óptico de aerosoles en Burjassot (Valencia) obtenido para ambas fechas con un fotómetro Cimel CE-318. Este comportamiento se presenta incluso en días con un similar contenido total de ozono, como en el ejemplo dado en un trabajo recientemente publicado (Esteve *et al.*, 2006).

Como una primera aproximación de simulación de la UVER en planos inclinados se ha implementado el modelo SMARTS2.9, descrito anteriormente en el Capítulo 3, que proporciona el valor de la irradiancia en planos en distintas orientaciones e inclinaciones directamente. Se ha tomado a modo de ejemplo dos días claros y representativos de un día típico de verano y otro de invierno, próximos a ambos solsticios (27 de Junio de 2004 y 20 de Diciembre de 2004). Estos días presenta un AOD medio diario bajo (0.136 para el 27 de Junio y 0.022 para el 20 de Diciembre). En la simulación se ha considerado un albedo constante del 20% y tipos de aerosoles urbanos. Una vez obtenida la UVER simulada para cada caso ha sido comparada con los valores experimentales, Figura 7.6.

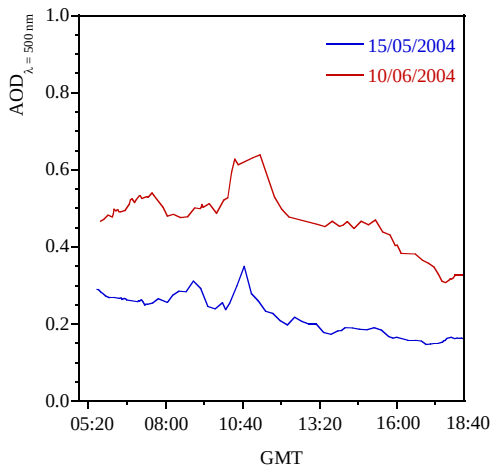
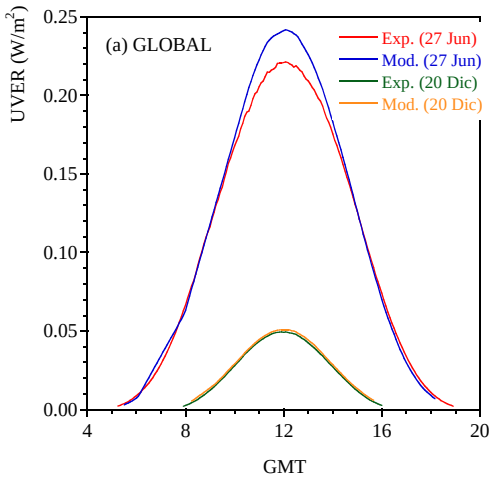


Figura 7.5.- Evolución horario del espesor óptico de aerosoles a 500 nm para dos días con ausencia de nubosidad.



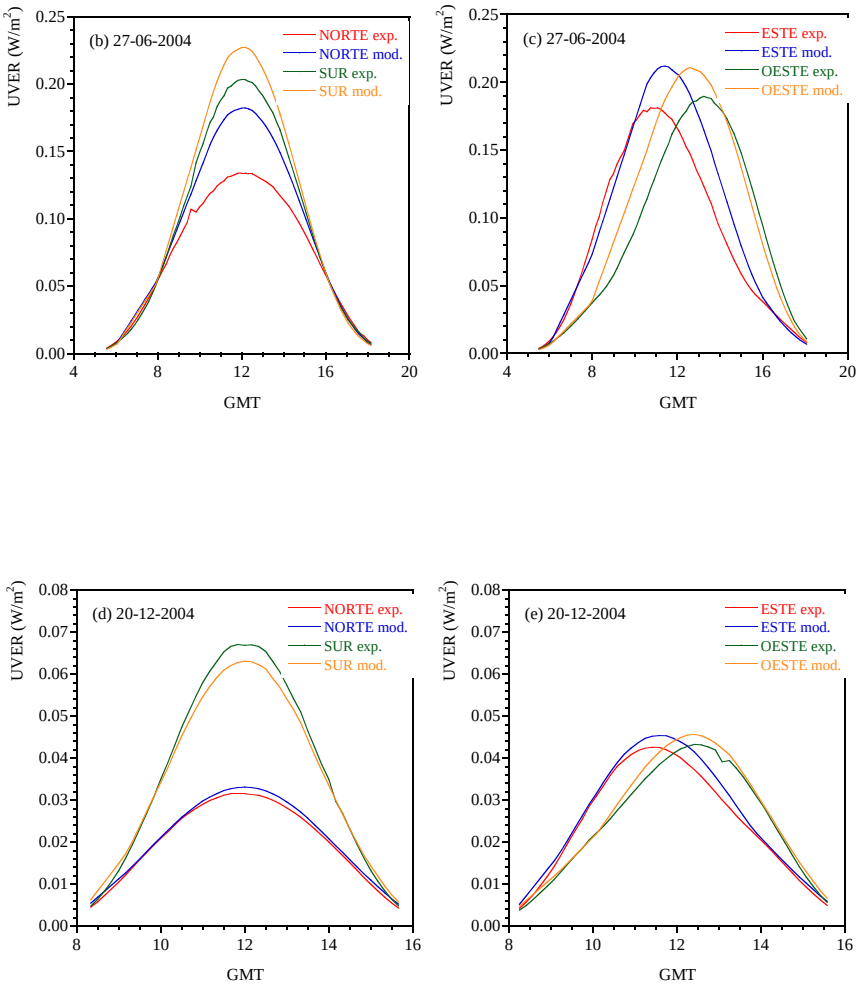


Figura 7.6.- UVER experimental y simulada con el SMARTS2.9. (b) Día 27/06/2004 orientaciones Norte y Sur, (c) Día 27/06/2004 orientaciones Este y Oeste, (d) Día 20/12/2004 orientaciones Norte y Sur, (e) Día 20/12/2004 orientaciones Este y Oeste y (a) Global horizontal para ambos días.

En general el modelo SMARTS2.9 sobrestima los resultados experimentales para todas las orientaciones. Así para el día 27 de Junio de 2004, el valor cuadrático medio (RMS)[10] diario alcanza el valor del 19% para el Este, Oeste y Norte mientras que es del 12% en la orientación Sur. El día 10 de Diciembre presenta una discrepancia del 10% en el Este y Sur y del 8% en el Oeste y Norte. Teniendo en cuenta que el RMS para la componente horizontal alcanza el 9% para el día de invierno y el 10% para el verano, los resultados son aceptables. Esta diferencia se traduce en un máximo de dos unidades de Índice UV en verano en las orientaciones Norte, Este y Oeste y en una en la Sur. En invierno la diferencia es menor de una unidad de Índice UV. Sin embargo es necesario una simulación más extensa para poder obtener determinar una tendencia de tipo climático.

Dado el interés que tiene el Índice UV como indicador de la UVER a nivel de suelo y como parámetro para su difusión pública, se ha llevado a cabo un estudio mensual del valor máximo así como del valor a las 12:00 GMT. La Tabla 7.2 muestra los datos del análisis del Índice UV máximo y a las 12:00 GMT para las diferentes orientaciones durante el año 2004 y los meses de Enero a Agosto de 2005. En esta Tabla también se indica el número de datos disponibles en cada caso y se observa que normalmente hay el mismo número de datos aproximadamente para las orientaciones Norte-Sur y Este–Oeste. Las diferencias que se observan en algunos meses son debidas fundamentalmente a fallos mecánicos en el funcionamiento del sistema y a los periodos de calibración de los instrumentos.

El Índice UV máximo es siempre mayor en la orientación Sur que en la Norte, mientras que es aproximadamente igual para las orientaciones Este y Oeste y este comportamiento se registra durante todos los meses del año. Sin embargo esto no se cumple en relación a los planos Sur y horizontal. Así mientras que en la orientación Sur el Índice UV es mayor que en el plano horizontal en los meses de Enero a Abril y de Septiembre a Diciembre; es menor en los meses de Junio y Julio; coincidiendo su valor para los meses de Mayo y Agosto. Si se analizan con cierto detalle las expresiones que dan cuenta de la irradiancia total en un plano horizontal y en un plano inclinado orientado al Sur se observa que ambas presentan una dependencia temporal debida al ángulo cenital y por tanto a la posición del Sol. Sin embargo, en un plano con cierta inclinación y orientado al Sur se da también una variabilidad temporal correspondiente a la declinación del Sol. Esta discrepancia provoca que en

[10] RMS es un parámetro estadístico que se calcula como: $RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} X_i^2}$

determinados periodos del año, la irradiancia incidente en el plano Sur sea superior a la del plano horizontal en días con ausencia de nubosidad.

Tabla 7.2.- Valor mensual máximo del Índice UV y a las 12 GMT en las distintas orientaciones y meses del año.

Mes	Posición	Nº UVI	Nº $UVI_{12:00}$	$UVI_{máx}$	$UVI_{12:00}$
Enero	Horizontal	2424	24	2	2
	Norte	1438	20	2	1
	Sur	1235	18	3	3
	Este	1406	9	2	2
	Oeste	327	4	2	2
Febrero	Horizontal	4573	39	4	4
	Norte	582	5	2	2
	Sur	734	7	5	4
	Este	753	6	3	3
	Oeste	777	6	4	4
Marzo	Horizontal	6118	46	6	6
	Norte	2519	20	3	3
	Sur	2515	20	7	6
	Este	3140	24	5	5
	Oeste	3143	24	6	5
Abril	Horizontal	8441	58	8	8
	Norte	3565	18	4	4
	Sur	3565	18	9	8
	Este	3530	29	7	6
	Oeste	3481	29	7	7
Mayo	Horizontal	9733	61	8	8
	Norte	3787	28	5	5
	Sur	3785	28	8	8
	Este	5250	33	7	6
	Oeste	5247	33	7	7
Junio	Horizontal	9786	60	9	9
	Norte	4380	34	6	6
	Sur	4380	34	8	8
	Este	5114	24	8	7
	Oeste	5114	24	8	7

Tabla 7.2 (cont.).- Valor mensual máximo del Índice UV y a las 12 GMT en las distintas orientaciones y meses del año.

Mes	Posición	Nº UVI	Nº $UVI_{12:00}$	$UVI_{máx}$	$UVI_{12:00}$
Julio	Horizontal	9832	61	9	9
	Norte	3250	20	6	6
	Sur	3250	20	8	8
	Este	6367	39	8	7
	Oeste	6367	39	8	7
Agosto	Horizontal	9346	62	9	9
	Norte	1992	18	5	5
	Sur	1991	18	9	8
	Este	7196	44	8	7
	Oeste	7196	44	8	7
Septiembre	Horizontal	3859	29	7	6
	Norte	1044	10	4	3
	Sur	1044	10	8	6
	Este	1702	12	6	5
	Oeste	1702	12	6	5
Octubre	Horizontal	3550	29	5	5
	Norte	1696	11	2	2
	Sur	1696	11	6	6
	Este	1695	17	4	4
	Oeste	1690	17	5	4
Noviembre	Horizontal	3084	29	3	3
	Norte	1532	13	2	2
	Sur	1532	13	5	4
	Este	1518	17	3	2
	Oeste	770	9	3	2
Diciembre	Horizontal	3063	31	2	2
	Norte	1453	16	1	1
	Sur	1452	16	5	3
	Este	1452	14	2	2
	Oeste	684	2	2	1

Un análisis más detallado de la Tabla 7.2 permite afirmar que el valor anual más elevado del Índice UV depende de la orientación. En el caso del plano horizontal el valor máximo se registra durante los meses de Junio a Agosto; en la orientación Norte en los meses de Junio y Julio; en la orientación Sur durante los meses de Abril y Agosto; y por último, en las orientaciones Este y Oeste, el máximo se registra durante los meses de Junio a Agosto.

Estos resultados son igualmente válidos para los valores del Índice UV a las 12:00 GMT ya que en el 97% de los casos, el valor máximo y el valor al mediodía solar del Índice UV son iguales o difieren tan sólo en una unidad, a pesar de la diferencia de datos considerados en cada caso (miles en el caso del Índice UV máximo y decenas en el caso del UVI a las 12), como se detalla en la Tabla 7.2.

En la Tabla 7.3 se detalla la recurrencia (en %) de los valores diarios del Índice UV a las 12:00 GMT medidos para cada orientación durante el periodo de tiempo considerado. Se observa como los valores más altos de Índice UV sólo se alcanzan en el plano horizontal y en la orientación Sur mientras que los valores más bajos se obtienen para la orientación Norte. El porcentaje en las orientaciones Este y Oeste es similar, por lo que se deduce que la energía anual recibida en ambas orientaciones es del mismo orden a pesar de presentar una evolución horaria distinta como se apreció en la Figura 7.3 en el caso de días despejados (b) y (d).

Tabla 7.3.- Recurrencia del Índice UV (en %) en función de la orientación.

	Índice UV									
Orientación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Horizontal	37	17	11	9	7	6	6	5	1	1
Norte	45	22	14	10	8	1	--	--	--	--
Sur	39	16	12	8	7	7	6	4	1	--
Este	39	20	12	9	8	7	4	1	--	--
Oeste	39	19	12	9	8	8	6	1	1	--

Finalmente se han obtenido la dosis eritemáticas acumuladas durante un año completo, en concreto entre el 16 de Febrero de 2004 y el 15 de Febrero de 2005 en función del fototipo y de la orientación. Estos resultados se detallan en la Tabla 7.4 donde se aprecia que la dosis eritemática acumulada disminuye en un 38% en la orientación Norte con respecto al plano horizontal, mientras que en la posición Sur sólo es un 6% menor. Considerando las posiciones Este y Oeste, la disminución es de un 21% y un 16% respectivamente.

Tabla 7.4.- Dosis eritemáticas acumuladas en un año en función del fototipo (ver Tabla 1.2 de esta memoria) y orientación.

MEDs	Horizontal	Norte	Sur	Este	Oeste
Fototipo I	4019	2481	3782	3157	3381
Fototipo II	3215	1985	3026	2525	2702
Fototipo III	2296	1418	2161	1804	1930
Fototipo IV	1786	1102	1681	1403	1501
SED	8039	4963	7565	6314	6757

La evolución anual de la dosis eritemática acumulada a lo largo del periodo de tiempo comprendido en un año, desde el 16 de Febrero de 2004 hasta el 15 de Febrero de 2005, y para cada orientación permite comprobar que se acumula una mayor cantidad de dosis eritemática durante los meses de verano que durante el resto del año. En concreto el 36% de la dosis eritemática total se recibe en los cuatro meses de verano, desde Junio a Septiembre, en el plano Horizontal mientras que en el Sur es de 33%, del 38% en el Norte y del 40% y del 39% en el Este y Oeste respectivamente.

En la Figura 7.7 se ha representado la SED para cada orientación ilustrando que la dosis eritemática acumulada en un plano orientado hacia el Sur es mucho mayor que en un plano orientado hacia el Norte y mayor que las dosis acumuladas en planos orientados hacia el Este o el Oeste, que son similares entre sí coincidiendo con lo detallado anteriormente en la Tabla 7.4. Estos resultados están detallados en un trabajo reciente (Esteve *et al.*, 2006).

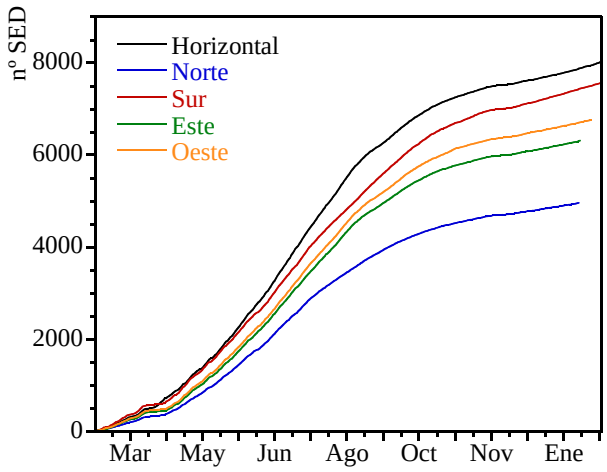


Figura 7.7.- Evolución anual de la SED acumulada en diferentes orientaciones.

Conclusiones

Se ha diseñado y puesto en marcha una red de medida de la UVB y UVER en la Comunidad Valenciana con cinco sensores UVB-1 (YES) distribuidos cuatro de ellos en la costa, Prat de Cabanes (Castellón), Valencia, Denia (Alicante) y Torrevieja (Alicante), y uno en el interior, Aras de los Olmos (Valencia), este último para evaluar el efecto de alejamiento de la costa y de altura. Esta red ha sido posible gracias a un convenio de colaboración entre la Conselleria de Territori i Habitatge de la Comunidad Valenciana y el Grupo de Radiación Solar de Valencia y empezó a estar operativa en el año 2002.

El mantenimiento de esta red de medida incluye sucesivos calibrados que se han llevado a cabo mediante intercomparación simultánea con un radiómetro patrón y con un espectrorradiómetro de precisión.

A su vez el radiómetro patrón fue calibrado en el año 2002 con el itinerante del INM y, posteriormente, en el 2005 mediante una calibración estándar y certificada que incluye la medida de la respuesta espectral del instrumento en laboratorio así como mediciones de campo en días despejados con un espectrorradiómetro Brewer. El resultado de esta última calibración es una matriz dependiente del ángulo cenital y del ozono.

En el primer calibrado de los radiómetros de la red se observa una disminución apreciable de la constante de conversión con respecto a la que ofrece el fabricante comprendida entre un 11 y un 19% según el sensor considerado. Sin embargo, en la segunda intercomparación se produce un incremento con respecto a la primera resultando el valor final menor que el propuesto por el fabricante excepto en el caso de Aras de los Olmos. Así la disminución de las constantes del segundo calibrado con respecto a la original se sitúa entre el 7 y el 13% mientras que para el sensor de Aras aumenta en un 3%.

Previamente al estudio en la Comunidad Valenciana, se han analizado los datos de la red de medida de UVB y UVER del INM durante los años 2000 y 2001 considerando 11 estaciones. Cabe destacar de este trabajo el elevado porcentaje (al menos un 90%) de coincidencia o discrepancia en una unidad entre el Índice UV máximo diario y el de las 12 GMT teniendo en cuenta que se han considerado todos los días incluso los nubosos, aumentando este valor si el estudio se hace bajo

predominio de cielos despejados. A partir de este resultado se deduce que es una buena aproximación tomar como valor máximo diario el Índice UV a las 12 GMT y ese es el criterio que se ha seguido con los datos de la red de la Comunidad Valenciana. Por otro lado, analizando los valores máximos alcanzados del Índice UV, se puede establecer dos categorías de estaciones, las litorales que tienen máximos moderados y las interiores con valores extremos. Esto puede deberse al régimen de brisas que atenúan la radiación UV y por tanto el Índice UV. Estas diferencias también se aprecian en la dosis eritemática acumulada en un año para las distintas estaciones.

En cuanto a la red de medida de la Comunidad Valenciana se han analizado los datos experimentales del trienio comprendido entre los años 2002 y 2004. Se ha aplicado el calibrado del 2003 para los datos correspondientes a los años 2002 y 2003 y el del 2005 para los datos del 2004, por proximidad temporal. A partir de la evolución de la UVER se observa que existe predominio de cielos nubosos en el 2002, valores anormalmente bajos en el 2004 y que los valores más elevados de todas las estaciones se alcanzan en Aras de los Olmos dada su ubicación, alejada de la costa, y su altitud sobre el nivel del mar.

Además se ha realizado la predicción del Índice UV mediante un modelo de transferencia radiativa de dispersión múltiple, SBDART, para todo el periodo considerado anteriormente. Los principales parámetros de entrada utilizados en esta simulación son el ozono total en columna (del satélite TOMS), la localización geográfica (latitud, longitud y altura), la localización temporal (día y hora) así como el modelo de aerosoles. Se ha tomado el tipo urbano en todos los casos excepto en la estación de Aras de los Olmos donde sus características justifica utilizar un modelo de aerosoles de tipo rural.

Comparando la predicción del Índice UV con el hallado experimentalmente para todas las estaciones y para los tres años considerados se produce una coincidencia o discrepancia en una unidad en más del 65% de los casos llegando al 79% en Prat de Cabanes. Este porcentaje es muy elevado teniendo en cuenta que el simulado considera siempre cielos despejados y el experimental se calcula para todos los días del periodo de medidas, incluso nubosos. Por tanto, cuando se produce una diferencia significativa en más de 3 unidades de Índice UV corresponde a los meses con mayor nubosidad que son Abril y Mayo.

Los resultados de la red de medida de UVB y UVER de la Comunidad Valenciana han sido comparados con la red de Cataluña para el año 2003 considerando exclusivamente los días despejados. Se parte de los valores medios mensuales de la UVER que proporcionan un valor de 3 para el Índice UV (umbral

de valor moderado). Esto ocurre en los meses de Marzo a Septiembre en Cataluña y de Marzo a Octubre en la Comunidad Valenciana. Se concluye que el incremento de la UVER debido a la latitud es de 4% por grado en dirección Sur y el efecto de altitud de 10%/km entre Molló y Roses y de 11%/km entre Aras de los Olmos y Valencia. Esta ligera diferencia podría ser asumida por el efecto latitudinal adicional que no es despreciable en este último caso ya que ambas estaciones distan medio grado de latitud.

Los valores experimentales más elevados de Índice UV a las 12 GMT en Cataluña se dan en la estación de Molló, en el pirineo catalán, por el efecto de altura y continentalidad tal y como ocurría en el caso de Aras de los Olmos en la red de medida de la Comunidad Valenciana.

Por último, comparando el Índice UV simulado y el experimental para las nueve estaciones de ambas redes y considerando sólo días despejados, se obtiene que en más del 90% de los casos coinciden o difieren en tan sólo una unidad. Además se observa que el SBDART sobrestima los valores experimentales en más del10%.

Con la finalidad de estudiar la UVER difusa y en planos distintos del horizontal se ha puesto en marcha una estación de medida que consta de un radiómetro al que se le ha acoplado una banda de sombra y dos sensores más situados en una plataforma giratoria que permite medir en las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste y con un inclinación constante de 40º. Análogamente a los piranómetros de la red de medida éstos son también del tipo UVB-1 de YES y fueron calibrados de la misma manera que los anteriores experimentándose un comportamiento similar en la evolución de las constantes de conversión.

Con anterioridad al análisis de la UVER difusa experimental es necesario evaluar la proporción de la componente difusa que oculta la banda de sombra y corregir posteriormente la medida. Con tal finalidad se emplearon tres métodos existentes en la literatura: el modelo isótropo o de Drummond, el de Le Baron y el de Batlles. Los dos últimos consideran la anisotropía de la radiancia mediante la inclusión de dos parámetros que dependen del rango espectral y por tanto ha sido necesario adaptarlos al rango de la UVER dado su pequeño orden de magnitud. En el caso del modelo de Le Baron los intervalos de la tabulación propuesta han sido modificados mientras que en el caso de el de Batlles se han adaptado los coeficientes de la expresión analítica. La corrección de la banda de sombra propuesta por los modelos es de un incremento de los valores de la UVER difusa. Estos porcentajes son del orden del 16% según el isótropo, del 20% según el de Le

Baron, 21% según Batlles y del 25% según otra versión modificada del anterior, Batlles2.

Se ha validado la corrección de la banda de sombra mediante la comparación con los datos experimentales medidos con un espectrorradiómetro en primer lugar y con los datos simulados por dos modelos de transferencia radiativa posteriormente. La UVER difusa experimental del espectrorradiómetro OL-754 se calcula a partir de las medidas de irradiancia directa del OL-754 y las de global obtenidas mediante un radiómetro YES-UVB-1. La validación presenta una desviación comprendida entre el 9% con el modelo isótropo, caso más desfavorable, y un 1% con el de Batlles2, siendo éste el más favorable. Una segunda validación se ha realizado con un modelo de transferencia radiativa de dispersión simple, SMARTS y uno de dispersión múltiple, SBDART. La UVER difusa simulada se ha calculado a partir de los días despejados en los que se disponía de datos de turbiedad. Los resultados menos favorables se dan para el modelo isótropo en ambos casos, ya que éste no es adecuado para nuestras latitudes (con predominio de cielos despejados). El modelo que menos desviación presenta es el de Le Baron para el SMARTS y el de Batlles2 para el SBDART. La discrepancia obtenida con ambos modelos podría deberse a la diferente estimación que hacen de la UVER difusa. En el caso del SMARTS difiere de las medidas sin corregir un 21% mientras que el SBDART dista un 26%, siendo más próximo este valor al considerado por el espectrorradiómetro (un 25%). Como conclusión de estas validaciones se propone una corrección de la banda de sombra mediante el método de Batlles2.

Una vez corregidas las medidas con la segunda propuesta del modelo de Batlles se han calculado los valores medios de la UVER difusa en función del índice de claridad total, parámetro que da cuenta de la nubosidad. Los resultados muestran que como mínimo un 62% de la UVER total se da en forma de irradiancia difusa para datos con un índice de claridad comprendido entre 0.7 y 0.8, es decir, días claros. Para el resto de condiciones meteorológicas este porcentaje es aún mayor.

En cuanto al Índice UV de la irradiancia eritemática difusa se produce en el 97% de los casos una coincidencia o discrepancia en una unidad entre el valor máximo diario y el de las 12 GMT. Los valores máximos mensuales del Índice UV oscilan entre uno para el invierno y seis para el verano. A partir de la relación existente entre el Índice UV para la componente global y difusa es posible determinar uno de ellos conociendo el otro.

En el último capítulo se analiza la UVER en planos inclinados en un periodo comprendido entre Febrero de 2004 y Agosto de 2005. El máximo en las

orientaciones Norte y Sur así como en la posición horizontal se da al mediodía, mientras que en el plano Este se produce a las 11 GMT y el Oeste a las 13 GMT aproximadamente. La influencia del parámetro del espesor óptico de aerosoles se ha constatado para dos días despejados en el que se aprecia cómo disminuye el valor de la UVER para el día en que la turbiedad es mayor. Estas diferencias son apreciables en días despejados dado que en días cubiertos la evolución horaria es similar para todas las orientaciones. Como una primera aproximación se ha obtenido que el SMARTS2.9 sobrestima la UVER en planos inclinados en todas las orientaciones, en un porcentaje variable pero próximo al 10%.

Analizando el Índice UV máximo para los distintos planos inclinados se observa que es siempre mayor en la orientación Sur que en la Norte, mientras que es aproximadamente igual para las orientaciones Este y Oeste. El valor anual más elevado del Índice UV se produce en un mes u otro dependiendo de la orientación. Así en el plano horizontal es de Junio a Agosto, en la orientación Norte en los meses de Junio y Julio, en la orientación Sur durante los meses comprendidos entre Abril y Agosto y por último en las orientaciones Este y Oeste el máximo se registra durante los meses de Junio a Agosto. En el caso de planos inclinados también se muestra que el Índice UV máximo diario y el de las 12 GMT coinciden o discrepan en una unidad en un gran número de casos (97%). Considerando la dosis eritemática anual se muestra que es mayor en la posición horizontal siendo el valor más pequeño el correspondiente a la dirección Norte (un 38% menor). En la orientación Sur esta disminución es sólo del 6%.

Como perspectivas futuras sería imprescindible mantener operativa la red de medida de la UVB y la UVER en la Comunidad Valenciana permitiendo establecer una climatología de la irradiancia eritemáticamente efectiva a medio plazo. Por otro lado se podría mejorar la predicción del Índice UV incluyendo algunos parámetros de entrada adicionales como los aerosoles y la nubosidad de manera efectiva, es decir, implementándolos automáticamente a partir de datos experimentales o bien con datos procedentes de satélites.

En este sentido ya se está trabajando en la caracterización de días representativos de situaciones climáticas determinadas como por ejemplo un día estable de invierno o un día con intrusión de polvo sahariano. Este estudio se realiza mediante una comparativa exhaustiva de los datos experimentales con la simulación realizada por los modelos de transferencia radiativa más utilizados.

Asimismo para establecer una climatología del Índice UV para la componente difusa y también en planos distintos del horizontal es necesario analizar datos experimentales en un periodo dilatado de tiempo. Con la finalidad de instituir la

predicción del Índice UV tanto para la UVER difusa como en planos inclinados habría que implementar algún modelo adecuado. En este sentido existen dos opciones posibles: la primera de ellas sería mediante un modelo de transferencia radiativa, análogamente al SBDART para la componente global. Por otro lado en la literatura existen modelos que permiten calcular la irradiancia difusa o en planos inclinados a partir de otros parámetros. Sin embargo, este paso no es inmediato ya que, tal y como ocurrió con los modelos de corrección de la banda de sombra, probablemente haya que adaptarlo al rango de la UVER dada sus especiales características y su pequeño orden de magnitud.

En cuanto al análisis de la UVER en planos inclinados nos encontramos con varias dificultades. En ese sentido el dispositivo experimental actual es limitado ya que dispone solamente de una inclinación fija y cuatro orientaciones. Las medidas experimentales resultantes en planos con distintas inclinaciones y con otros ángulos azimutales serían muy interesantes a la hora de validar modelos y extraer conclusiones. Por otro lado, aunque algunos modelos de transferencia radiativa ofrecen directamente el resultado de la UVER en planos inclinados no ocurre igual en la mayoría de los casos lo que limita mucho la implementación de los mismos con estos fines. Otra opción posible es estimar la irradiancia de forma indirecta mediante la integración de la radiancia de cielo en todos los ángulos de incidencia para esos planos. Actualmente se está trabajando con el modelo UVSPEC de esta manera. También es posible considerar modelos que, a partir de otras componentes, estiman la irradiancia en planos inclinados. Sin embargo estos modelos se caracterizan por requerir como parámetro de entrada la componente difusa horizontal, por lo que el trabajo anterior, así como una correcta corrección de la banda de sombra resulta imprescindible para poder aplicarlos satisfactoriamente.

Anexo A

Hacia el Índice UV

En este primer anexo se explica la evolución en la determinación experimental del espectro de acción eritemático hasta la actual estandarización. A continuación se enumeran algunas páginas web donde se realiza la predicción del Índice UV en todo el mundo.

A.1.- Antecedentes históricos del espectro de acción eritemático

Hasta el espectro de acción eritemático actualmente establecido se propusieron otras opciones directamente relacionadas con el dispositivo experimental de la época. Brevemente se describen algunos antecedentes históricos que desembocaron en el estándar de la CIE (ICNIRP, 2004).

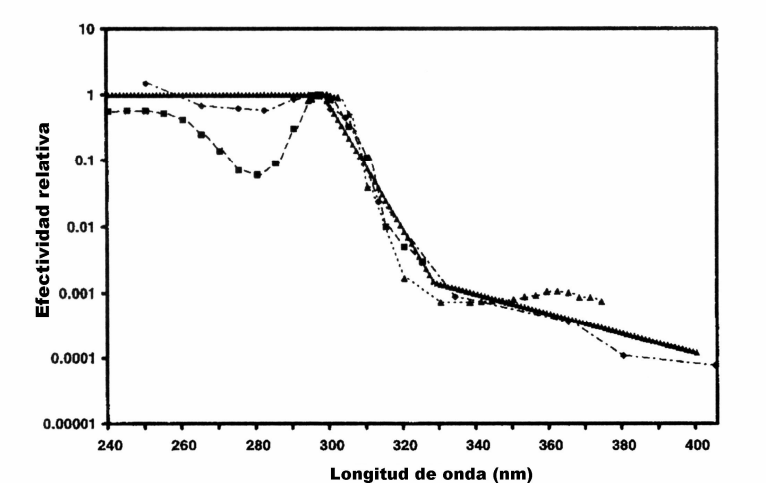


Figura A.1.- Espectro de acción eritemático. La referencia de la CIE (1998) y el espectro determinado usando láseres (Anders *et al*., 1995) (línea continua). El propuesto por la CIE (1935) (cuadrados), y por Parrish *et al*., (1982) (diamantes).

A finales de los años 20 se determinó cuantitativamente el eritema como dependiente de la longitud de onda. En 1935 la CIE recomendó una estandarización del espectro de acción eritemático basándose en unos estudios que utilizaban un número limitado de líneas de emisión monocromáticas de la lámpara de mercurio. Con el desarrollo de lámparas de arco de xenón y su uso con monocromadores, varios grupos de investigación en los años 60 encaminaron sus estudios para completar la información espectral que faltaba, a pesar de que los resultados diferían algo de los clásicos de los años 30, especialmente para longitudes de onda por debajo de los 300 nm. El uso de una lámpara de arco de xenón de alta presión y de otra de xenón-mercurio con monocromadores completó las regiones espectrales que faltaban, pero también introdujo un nuevo problema por su baja resolución

espectral. Más tarde, estudios con láseres monocromáticos permitieron definir con detalle el rango del espectro entre 300 y 320 nm donde cambia rápidamente (Anders *et al.*, 1995). A pesar de la pendiente tan pronunciada encontrada entre 300 y 315 nm, Diffey concluyó (a partir de un análisis matemático del mismo obtenido con monocromadores y láseres) que el espectro de acción de referencia de la CIE predice adecuadamente la efectividad eritemática para diferentes longitudes de onda de la radiación ultravioleta siendo el que está actualmente en vigor (Diffey, 1998). En la Figura A-1 se detalla el espectro estándar junto a otras propuestas anteriores.

A.2.- Enlaces de interés del Índice UV[11]

A nivel nacional

En la Comunidad Valenciana se realiza la predicción para el día vigente y para el siguiente proporcionando además información divulgativa sobre el Índice UV como se detalló en el Capítulo 4. En el INM se presentan dos links diferentes: el primero de ellos corresponde a la predicción del día en vigor y el siguiente en cada una de las capitales de provincia y el otro se trata de un manual de información al usuario. En Cataluña también se realiza la predicción del Índice UV incluyendo además en sus valores la nubosidad prevista y la información de la altura sobre el nivel del mar. En Extremadura se ofrece la predicción para el día en vigor y el siguiente en cuatro puntos junto a las medidas experimentales actualizadas en tres de esas ubicaciones. Asimismo en Galicia la Conselleria de Medio Ambiente realiza la predicción del Índice UV en 14 localidades gallegas y hasta 72 horas. Por último el servicio meteorológico vasco ofrece la predicción del Índice UV en 8 localidades y haciendo un pronóstico para cada 2 horas. En la Tabla A-1 se detallan las páginas web dónde se puede consultar esta información.

[11] Estos links están disponibles el 26-10-06.

Tabla A.1.- Links nacionales sobre el Índice UV

Ámbito	Institución	Link
C. Valenciana	Conselleria de Territori i Habitatge	www.cth.gva.es/cidam/emedio/uv
España	Instituto Nacional de Meteorología	www.inm.es/web/infmet/predi/ulvip_hoy.html www.inm.es/uvi
Cataluña	Servei de Meteorologia de Catalunya.	www.gencat.es/servmet/uvi/uvi.htm
Extremadura	Universidad de Extremadura	http://aire.unex.es/uvi
Galicia	Conselleria Medio Ambiente	http://www.siam-cma.org/meteoroloxia/prediccionuv.asp
País Vasco	Euskal Meteorologia Agentzia	http://www.euskalmet.euskadi.net/s07-5853x/es/meteorologia/meteodat/uvi.apl?e=5

A nivel europeo

En la Tabla A.2 se detallan otros enlaces de países europeos. La gran mayoría están en inglés u ofrecen una versión en dicha lengua aunque hay excepciones como las de Alemania, Bélgica o Francia. Todas presentan la predicción del Índice UV excepto la de Italia dónde está disponible la información de la acción COST-713 "UV-B forecasting". En Austria se presenta la predicción a nivel mundial a partir de un modelo empírico como ya se detalló en el Capítulo 3. Algunos países, como Finlandia, ofrecen también los datos para un ámbito continental en vez de restringir la información a su propio territorio. Otros presentan la predicción para más de 48 horas, como Grecia que toma 3 días o Reino Unido 5 días. Por último Luxemburgo y Noruega detallan la evolución horaria y esa información se va actualizando en tiempo real a partir de los datos hallados experimentalmente.

Tabla A.2.- Links europeos sobre el Índice UV.

País	Institución	Link
Alemania	Servicio federal para la protección radiológica	http://www.bfs.de/uv/uv2/uvi
Alemania	Servicio meteorológico	http://www.dwd.de/de/WundK/W_aktuell/UV-Index.htm
Austria	Universidad de Viena	http://i115srv.vu-wien.ac.at/uv/uv_online.htm
Austria	Universidad de Innsbruck	www.uibk.ac.at/projects/uv-index
Bélgica	Instituto real meteorológico	http://www.meteo.be/ozon/uv/uv-index.php
Dinamarca	Instituto meteorológico	http://www.dmi.dk/dmi/index/verden/uv_idag.htm
Finlandia	Instituto meteorológico	www.fmi.fi/uvi
Francia	Fundación seguridad solar	http://www.soleil.info/previsions.php
Grecia	Laboratorio de física atmosférica	http://lap.physics.auth.gr/uvindex/
Holanda	ESA	http://www.temis.nl/uvradiation/UVindex.html
Italia	Instituto de meteorología y modelos ambientales	www.lamma.rete.toscana.it/previ/eng/ruva.html
Luxemburgo	Estación meteo del liceo clásico de Diekirch	http://meteo.lcd.lu/

Tabla A.2(cont.).- Links europeos sobre el Índice UV.

País	Institución	Link
Noruega	Servicio de protección radiológica	http://uvnett.nrpa.no
Polonia	Instituto meteorológico	http://www.imgw.pl/wl/internet/uv/uv.html
Portugal	Instituto meteorológico	www.meteo.pt/en/observacao/uv/uv.html
Reino Unido	Instituto meteorológico	http://www.met-office.gov.uk/weather/uv/uv_uk.html
República Checa	Instituto hidrometeoro-lógico	http://www.chmi.cz/meteo/ozon/o3uvb-e.html
Suecia	Instituto hidrológico y meteorológico	http://www.smhi.se/en/index.htm
Suiza	Oficina federal de salud pública	www.uv-index.ch

Resto del mundo

En la Tabla A.3 se especifican otros enlaces de páginas web del resto de continentes. De este listado cabe destacar la página de Canadá y la del centro de predicción del clima de Estados Unidos por disponer de amplia información. Por ejemplo el servicio meteorológico canadiense presenta varias actividades divulgativas preparadas para escolares. Las dos páginas que aquí se presentan de Australia son complementarias dado que la primera presenta la predicción del Índice UV mientras que en el sitio web de la Universidad de Tasmania se ofrecen los datos reales medidos con un piránometro UVB-1 de YES. En Nueva Zelanda, otro de los países pioneros en este campo, se muestra la predicción junto a las medidas experimentales en tiempo real en una representación gráfica. En el resto de países se suele representar la predicción para el día siguiente registrándose además las medidas experimentales. Sin embargo en la página web de Brasil se hace la predicción para cinco días y en las páginas de Israel y Sudáfrica se afirma que se están registrando medidas de UVB o Índice UV aunque esa información no es de libre acceso.

Tabla A.3.- Links de otros continentes sobre el Índice UV.

País	Institución	Link
Argentina	Servicio meteorológico	http://www.meteonet.com.ar/?mod=ozono&id=2
Australia	Servicio meteorológico	http://www.bom.gov.au/info/about_uv.shtml
Australia	Universidad de Tasmania	http://www.geol.utas.edu.au/uvb/
Brasil	Meteorología aplicada a sistemas de tiempo regionales	http://www.master.iag.usp.br/ind.php?prod=indiceuv
Canadá	Servicio meteorológico	www.msc-smc.ec.gc.ca/uvindex/
Chile	Dirección meteorologica	http://www.meteochile.cl/radiacion_uv.html

Tabla A.3(cont.).- Links de otros continentes sobre el Índice UV.

País	Institución	Link
China	Oficina geofísica y meteorológica	http://www.smg.gov.mo/ccaa/uv/fe_uvmain.htm
Estados Unidos	Centro de predicción del clima	http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/uv_index/
Estados Unidos	El canal del tiempo	http://www.weather.com/maps/activity/health/skin/index_large.html
Hong Kong	Observatorio	http://www.hko.gov.hk/wxinfo/uvindex/english/euvtoday.htm
Israel	Servicio meteorológico	www.ims.gov.il/en2.htm
Japón	Cosméticos Shiseido	http://www.shiseido.co.jp/uv-info/html/index.htm
Nueva Zelanda	Instituto nacional de investigación atmosférica y agua	www.niwa.cri.nz/services/uvozone/
Sudáfrica	Servicio meteorológico	http://www.weathersa.co.za/References/UVBNetwInstrInfo.jsp

Anexo B

Matrices de conversión

En este anexo se presentan las matrices de conversión correspondientes al calibrado efectuado en el 2005 para todos los sensores UVB-1 de YES utilizados en esta memoria.

Tabla B.1.- UVB-1 de Yes #010908. Sensor de referencia.

O_3 (DU) / θ (º)	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
90	0.186	0.193	0.200	0.208	0.217	0.226	0.235	0.245	0.255	0.266	0.276	0.287	0.298	0.310	0.322	0.333
85	0.164	0.169	0.174	0.181	0.187	0.194	0.202	0.209	0.217	0.225	0.233	0.242	0.251	0.260	0.269	0.278
80	0.147	0.149	0.153	0.156	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.186	0.191	0.197	0.203	0.209	0.216	0.222
75	0.139	0.140	0.142	0.143	0.146	0.149	0.152	0.155	0.158	0.162	0.166	0.170	0.174	0.178	0.183	0.187
70	0.137	0.136	0.136	0.137	0.138	0.140	0.141	0.143	0.145	0.148	0.150	0.153	0.156	0.159	0.162	0.165
65	0.137	0.135	0.134	0.134	0.134	0.135	0.135	0.136	0.138	0.139	0.141	0.142	0.144	0.146	0.149	0.151
60	0.138	0.136	0.134	0.133	0.132	0.132	0.132	0.132	0.133	0.133	0.134	0.135	0.137	0.138	0.140	0.141
55	0.140	0.137	0.135	0.133	0.131	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.131	0.131	0.132	0.133	0.134
50	0.142	0.138	0.135	0.133	0.131	0.130	0.129	0.128	0.128	0.127	0.127	0.128	0.128	0.128	0.129	0.130
45	0.144	0.140	0.136	0.133	0.131	0.129	0.128	0.127	0.126	0.126	0.125	0.125	0.125	0.125	0.126	0.126
40	0.145	0.141	0.137	0.134	0.131	0.129	0.128	0.126	0.125	0.124	0.124	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123
35	0.147	0.142	0.137	0.134	0.131	0.129	0.127	0.126	0.124	0.123	0.122	0.122	0.121	0.121	0.121	0.121
30	0.147	0.142	0.138	0.134	0.131	0.129	0.126	0.125	0.123	0.122	0.121	0.120	0.120	0.119	0.119	0.119
25	0.147	0.142	0.137	0.134	0.131	0.128	0.126	0.124	0.122	0.121	0.120	0.119	0.118	0.118	0.117	0.117
20	0.147	0.141	0.137	0.133	0.130	0.127	0.125	0.123	0.121	0.120	0.118	0.118	0.117	0.116	0.116	0.115
15	0.146	0.140	0.136	0.132	0.129	0.126	0.123	0.121	0.120	0.118	0.117	0.116	0.115	0.114	0.114	0.113
10	0.144	0.139	0.134	0.130	0.127	0.124	0.122	0.120	0.118	0.117	0.115	0.114	0.113	0.113	0.112	0.111
5	0.142	0.137	0.132	0.129	0.125	0.122	0.120	0.118	0.116	0.115	0.113	0.112	0.111	0.111	0.110	0.110
0	0.140	0.135	0.130	0.126	0.123	0.120	0.118	0.116	0.114	0.113	0.111	0.110	0.109	0.109	0.108	0.108

Tabla B.2.- UVB-1 de Yes #010903. Ubicación habitual: Aras de los Olmos (Valencia).

O_3 (DU) / θ (º)	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
90	0.210	0.218	0.227	0.236	0.246	0.256	0.266	0.277	0.289	0.301	0.313	0.325	0.338	0.351	0.364	0.377
85	0.185	0.191	0.197	0.205	0.212	0.220	0.228	0.237	0.246	0.255	0.264	0.274	0.284	0.294	0.304	0.314
80	0.166	0.169	0.173	0.177	0.182	0.187	0.192	0.198	0.204	0.210	0.217	0.223	0.230	0.237	0.244	0.251
75	0.158	0.159	0.160	0.162	0.165	0.168	0.171	0.175	0.179	0.183	0.188	0.192	0.197	0.202	0.207	0.212
70	0.155	0.154	0.155	0.155	0.156	0.158	0.160	0.162	0.165	0.167	0.170	0.173	0.176	0.180	0.183	0.187
65	0.155	0.153	0.152	0.152	0.152	0.152	0.153	0.154	0.156	0.157	0.159	0.161	0.163	0.166	0.168	0.171
60	0.157	0.154	0.152	0.150	0.150	0.149	0.149	0.150	0.150	0.151	0.152	0.153	0.155	0.156	0.158	0.160
55	0.159	0.155	0.152	0.150	0.149	0.148	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.148	0.149	0.150	0.151	0.152
50	0.161	0.157	0.153	0.151	0.148	0.147	0.146	0.145	0.144	0.144	0.144	0.144	0.145	0.145	0.146	0.147
45	0.163	0.158	0.154	0.151	0.148	0.147	0.145	0.144	0.143	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.142	0.143
40	0.165	0.159	0.155	0.152	0.149	0.146	0.144	0.143	0.142	0.141	0.140	0.140	0.139	0.139	0.139	0.139
35	0.166	0.160	0.156	0.152	0.149	0.146	0.144	0.142	0.141	0.139	0.139	0.138	0.137	0.137	0.137	0.137
30	0.167	0.161	0.156	0.152	0.148	0.146	0.143	0.141	0.140	0.138	0.137	0.136	0.136	0.135	0.135	0.135
25	0.167	0.161	0.156	0.151	0.148	0.145	0.142	0.140	0.138	0.137	0.136	0.135	0.134	0.133	0.133	0.132
20	0.166	0.160	0.155	0.151	0.147	0.144	0.141	0.139	0.137	0.135	0.134	0.133	0.132	0.131	0.131	0.130
15	0.165	0.159	0.154	0.149	0.146	0.142	0.140	0.137	0.135	0.134	0.132	0.131	0.130	0.129	0.129	0.128
10	0.163	0.157	0.152	0.148	0.144	0.141	0.138	0.136	0.134	0.132	0.131	0.129	0.128	0.127	0.127	0.126
5	0.161	0.155	0.150	0.146	0.142	0.139	0.136	0.134	0.132	0.130	0.128	0.127	0.126	0.125	0.125	0.124
0	0.158	0.152	0.147	0.143	0.139	0.136	0.134	0.131	0.129	0.128	0.126	0.125	0.124	0.123	0.122	0.122

Tabla B.3.- UVB-1 de Yes #010904. Ubicación habitual: Denia (Alicante).

O_3 (DU) / θ (º)	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
90	0.178	0.184	0.191	0.199	0.207	0.216	0.225	0.234	0.244	0.254	0.264	0.275	0.285	0.296	0.307	0.319
85	0.156	0.161	0.167	0.173	0.179	0.186	0.193	0.200	0.207	0.215	0.223	0.231	0.240	0.248	0.257	0.266
80	0.140	0.143	0.146	0.149	0.153	0.158	0.162	0.167	0.172	0.177	0.183	0.189	0.194	0.200	0.206	0.212
75	0.133	0.134	0.135	0.137	0.139	0.142	0.145	0.148	0.151	0.155	0.158	0.162	0.166	0.170	0.175	0.179
70	0.131	0.130	0.130	0.131	0.132	0.133	0.135	0.137	0.139	0.141	0.144	0.146	0.149	0.152	0.155	0.158
65	0.131	0.129	0.129	0.128	0.128	0.129	0.129	0.130	0.131	0.133	0.134	0.136	0.138	0.140	0.142	0.144
60	0.132	0.130	0.128	0.127	0.126	0.126	0.126	0.126	0.127	0.128	0.128	0.129	0.131	0.132	0.133	0.135
55	0.134	0.131	0.129	0.127	0.126	0.125	0.124	0.124	0.124	0.124	0.124	0.125	0.126	0.127	0.127	0.129
50	0.136	0.132	0.129	0.127	0.125	0.124	0.123	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.122	0.123	0.123	0.124
45	0.138	0.134	0.130	0.128	0.125	0.124	0.122	0.121	0.121	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120
40	0.139	0.135	0.131	0.128	0.126	0.124	0.122	0.121	0.120	0.119	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118
35	0.140	0.135	0.131	0.128	0.126	0.123	0.121	0.120	0.119	0.118	0.117	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116
30	0.141	0.136	0.132	0.128	0.125	0.123	0.121	0.119	0.118	0.117	0.116	0.115	0.114	0.114	0.114	0.114
25	0.141	0.136	0.131	0.128	0.125	0.122	0.120	0.118	0.117	0.116	0.115	0.114	0.113	0.113	0.112	0.112
20	0.140	0.135	0.131	0.127	0.124	0.121	0.119	0.117	0.116	0.114	0.113	0.112	0.112	0.111	0.110	0.110
15	0.139	0.134	0.130	0.126	0.123	0.120	0.118	0.116	0.114	0.113	0.112	0.111	0.110	0.109	0.109	0.108
10	0.138	0.133	0.128	0.125	0.122	0.119	0.117	0.115	0.113	0.111	0.110	0.109	0.108	0.108	0.107	0.107
5	0.136	0.131	0.127	0.123	0.120	0.117	0.115	0.113	0.111	0.110	0.108	0.107	0.107	0.106	0.105	0.105
0	0.134	0.129	0.124	0.121	0.118	0.115	0.113	0.111	0.109	0.108	0.107	0.106	0.105	0.104	0.103	0.103

Tabla B.4.- UVB-1 de Yes #010905. Ubicación habitual: Prat de Cabanes (Valencia).

O_3 (DU) / θ (º)	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
90	0.189	0.196	0.204	0.212	0.221	0.230	0.239	0.249	0.260	0.270	0.281	0.292	0.304	0.315	0.327	0.339
85	0.166	0.172	0.177	0.184	0.190	0.198	0.205	0.213	0.221	0.229	0.237	0.246	0.255	0.264	0.273	0.282
80	0.149	0.152	0.155	0.159	0.163	0.168	0.173	0.178	0.183	0.189	0.195	0.201	0.207	0.213	0.219	0.226
75	0.142	0.142	0.144	0.146	0.148	0.151	0.154	0.157	0.161	0.165	0.169	0.173	0.177	0.181	0.186	0.190
70	0.139	0.139	0.139	0.139	0.140	0.142	0.144	0.146	0.148	0.150	0.153	0.156	0.159	0.162	0.165	0.168
65	0.139	0.138	0.137	0.136	0.136	0.137	0.138	0.139	0.140	0.141	0.143	0.145	0.147	0.149	0.151	0.153
60	0.141	0.138	0.136	0.135	0.134	0.134	0.134	0.134	0.135	0.136	0.137	0.138	0.139	0.140	0.142	0.144
55	0.143	0.139	0.137	0.135	0.134	0.133	0.132	0.132	0.132	0.132	0.132	0.133	0.134	0.135	0.136	0.137
50	0.145	0.141	0.138	0.135	0.133	0.132	0.131	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.131	0.131	0.132
45	0.146	0.142	0.139	0.136	0.133	0.132	0.130	0.129	0.128	0.128	0.127	0.127	0.127	0.127	0.128	0.128
40	0.148	0.143	0.139	0.136	0.134	0.131	0.130	0.128	0.127	0.126	0.126	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
35	0.149	0.144	0.140	0.136	0.134	0.131	0.129	0.128	0.126	0.125	0.124	0.124	0.123	0.123	0.123	0.123
30	0.150	0.144	0.140	0.136	0.133	0.131	0.129	0.127	0.125	0.124	0.123	0.122	0.122	0.121	0.121	0.121
25	0.150	0.144	0.140	0.136	0.133	0.130	0.128	0.126	0.124	0.123	0.122	0.121	0.120	0.120	0.119	0.119
20	0.149	0.144	0.139	0.135	0.132	0.129	0.127	0.125	0.123	0.122	0.120	0.119	0.119	0.118	0.117	0.117
15	0.148	0.143	0.138	0.134	0.131	0.128	0.126	0.123	0.122	0.120	0.119	0.118	0.117	0.116	0.116	0.115
10	0.147	0.141	0.137	0.133	0.129	0.126	0.124	0.122	0.120	0.119	0.117	0.116	0.115	0.114	0.114	0.113
5	0.145	0.139	0.135	0.131	0.127	0.125	0.122	0.120	0.118	0.117	0.115	0.114	0.113	0.113	0.112	0.111
0	0.142	0.137	0.132	0.129	0.125	0.122	0.120	0.118	0.116	0.115	0.113	0.112	0.111	0.111	0.110	0.109

Tabla B.5.- UVB-1 de Yes #010906. Ubicación habitual: Valencia.

O_3 (DU) / θ (º)	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
90	0.190	0.197	0.205	0.213	0.222	0.231	0.241	0.251	0.261	0.272	0.283	0.294	0.306	0.317	0.329	0.341
85	0.168	0.173	0.179	0.185	0.192	0.199	0.206	0.214	0.222	0.231	0.239	0.248	0.257	0.266	0.275	0.284
80	0.150	0.153	0.156	0.160	0.164	0.169	0.174	0.179	0.184	0.190	0.196	0.202	0.208	0.214	0.221	0.227
75	0.143	0.143	0.145	0.147	0.149	0.152	0.155	0.158	0.162	0.166	0.170	0.174	0.178	0.182	0.187	0.192
70	0.140	0.140	0.140	0.140	0.141	0.143	0.145	0.147	0.149	0.151	0.154	0.157	0.160	0.163	0.166	0.169
65	0.140	0.139	0.138	0.137	0.137	0.138	0.138	0.140	0.141	0.142	0.144	0.146	0.148	0.150	0.152	0.154
60	0.142	0.139	0.137	0.136	0.135	0.135	0.135	0.135	0.136	0.137	0.138	0.139	0.140	0.141	0.143	0.145
55	0.144	0.140	0.138	0.136	0.134	0.134	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.134	0.135	0.136	0.137	0.138
50	0.146	0.142	0.139	0.136	0.134	0.133	0.132	0.131	0.131	0.130	0.130	0.131	0.131	0.131	0.132	0.133
45	0.147	0.143	0.139	0.137	0.134	0.133	0.131	0.130	0.129	0.129	0.128	0.128	0.128	0.128	0.129	0.129
40	0.149	0.144	0.140	0.137	0.134	0.132	0.131	0.129	0.128	0.127	0.127	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126
35	0.150	0.145	0.141	0.137	0.134	0.132	0.130	0.129	0.127	0.126	0.125	0.125	0.124	0.124	0.124	0.124
30	0.151	0.145	0.141	0.137	0.134	0.132	0.130	0.128	0.126	0.125	0.124	0.123	0.123	0.122	0.122	0.122
25	0.151	0.145	0.141	0.137	0.134	0.131	0.129	0.127	0.125	0.124	0.123	0.122	0.121	0.121	0.120	0.120
20	0.150	0.145	0.140	0.136	0.133	0.130	0.128	0.126	0.124	0.123	0.121	0.120	0.119	0.119	0.118	0.118
15	0.149	0.144	0.139	0.135	0.132	0.129	0.126	0.124	0.123	0.121	0.120	0.119	0.118	0.117	0.116	0.116
10	0.148	0.142	0.138	0.134	0.130	0.127	0.125	0.123	0.121	0.119	0.118	0.117	0.116	0.115	0.115	0.114
5	0.146	0.140	0.136	0.132	0.128	0.125	0.123	0.121	0.119	0.118	0.116	0.115	0.114	0.113	0.113	0.112
0	0.143	0.138	0.133	0.129	0.126	0.123	0.121	0.119	0.117	0.115	0.114	0.113	0.112	0.111	0.111	0.110

Tabla B.6.- UVB-1 de Yes #010907. Ubicación habitual: Torrevieja (Alicante).

O_3 (DU) / θ (º)	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
90	0.183	0.189	0.197	0.205	0.213	0.222	0.231	0.241	0.251	0.261	0.272	0.282	0.293	0.305	0.316	0.328
85	0.161	0.166	0.171	0.178	0.184	0.191	0.198	0.206	0.213	0.221	0.229	0.238	0.246	0.255	0.264	0.273
80	0.144	0.147	0.150	0.154	0.158	0.162	0.167	0.172	0.177	0.182	0.188	0.194	0.200	0.206	0.212	0.218
75	0.137	0.138	0.139	0.141	0.143	0.146	0.149	0.152	0.156	0.159	0.163	0.167	0.171	0.175	0.180	0.184
70	0.135	0.134	0.134	0.135	0.136	0.137	0.139	0.141	0.143	0.145	0.148	0.150	0.153	0.156	0.159	0.162
65	0.135	0.133	0.132	0.132	0.132	0.132	0.133	0.134	0.135	0.137	0.138	0.140	0.142	0.144	0.146	0.148
60	0.136	0.134	0.132	0.131	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.131	0.132	0.133	0.134	0.136	0.137	0.139
55	0.138	0.135	0.132	0.130	0.129	0.128	0.128	0.127	0.127	0.128	0.128	0.129	0.129	0.130	0.131	0.132
50	0.140	0.136	0.133	0.131	0.129	0.128	0.127	0.126	0.125	0.125	0.125	0.125	0.126	0.126	0.127	0.127
45	0.142	0.137	0.134	0.131	0.129	0.127	0.126	0.125	0.124	0.124	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.124
40	0.143	0.138	0.135	0.132	0.129	0.127	0.125	0.124	0.123	0.122	0.122	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121
35	0.144	0.139	0.135	0.132	0.129	0.127	0.125	0.123	0.122	0.121	0.120	0.120	0.119	0.119	0.119	0.119
30	0.145	0.140	0.135	0.132	0.129	0.126	0.124	0.123	0.121	0.120	0.119	0.118	0.118	0.117	0.117	0.117
25	0.145	0.139	0.135	0.131	0.128	0.126	0.124	0.122	0.120	0.119	0.118	0.117	0.116	0.116	0.115	0.115
20	0.144	0.139	0.134	0.131	0.128	0.125	0.123	0.121	0.119	0.118	0.116	0.116	0.115	0.114	0.114	0.113
15	0.143	0.138	0.133	0.130	0.126	0.124	0.121	0.119	0.118	0.116	0.115	0.114	0.113	0.112	0.112	0.111
10	0.142	0.137	0.132	0.128	0.125	0.122	0.120	0.118	0.116	0.115	0.113	0.112	0.111	0.111	0.110	0.110
5	0.140	0.135	0.130	0.126	0.123	0.120	0.118	0.116	0.114	0.113	0.112	0.110	0.110	0.109	0.108	0.108
0	0.138	0.132	0.128	0.124	0.121	0.118	0.116	0.114	0.112	0.111	0.110	0.108	0.108	0.107	0.106	0.106

Tabla B.7.- UVB-1 de Yes #010910. Ubicación: Burjassot (Valencia). Inclinada en S-O.

O_3 (DU) / θ (º)	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
90	0.199	0.207	0.215	0.223	0.233	0.242	0.253	0.263	0.274	0.285	0.296	0.308	0.320	0.333	0.345	0.358
85	0.176	0.181	0.187	0.194	0.201	0.208	0.216	0.224	0.233	0.242	0.250	0.260	0.269	0.278	0.288	0.298
80	0.157	0.160	0.164	0.168	0.172	0.177	0.182	0.188	0.193	0.199	0.205	0.212	0.218	0.225	0.231	0.238
75	0.149	0.150	0.152	0.154	0.156	0.159	0.163	0.166	0.170	0.174	0.178	0.182	0.187	0.191	0.196	0.201
70	0.147	0.146	0.146	0.147	0.148	0.150	0.151	0.154	0.156	0.158	0.161	0.164	0.167	0.170	0.174	0.177
65	0.147	0.145	0.144	0.144	0.144	0.144	0.145	0.146	0.148	0.149	0.151	0.153	0.155	0.157	0.159	0.162
60	0.149	0.146	0.144	0.143	0.142	0.141	0.141	0.142	0.142	0.143	0.144	0.145	0.147	0.148	0.150	0.151
55	0.151	0.147	0.144	0.142	0.141	0.140	0.139	0.139	0.139	0.139	0.140	0.140	0.141	0.142	0.143	0.144
50	0.153	0.148	0.145	0.143	0.141	0.139	0.138	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137	0.138	0.138	0.139
45	0.155	0.150	0.146	0.143	0.141	0.139	0.137	0.136	0.135	0.135	0.134	0.134	0.134	0.134	0.135	0.135
40	0.156	0.151	0.147	0.144	0.141	0.139	0.137	0.135	0.134	0.133	0.133	0.132	0.132	0.132	0.132	0.132
35	0.157	0.152	0.148	0.144	0.141	0.138	0.136	0.135	0.133	0.132	0.131	0.131	0.130	0.130	0.130	0.130
30	0.158	0.152	0.148	0.144	0.141	0.138	0.136	0.134	0.132	0.131	0.130	0.129	0.128	0.128	0.128	0.127
25	0.158	0.152	0.147	0.143	0.140	0.137	0.135	0.133	0.131	0.130	0.129	0.128	0.127	0.126	0.126	0.125
20	0.157	0.152	0.147	0.143	0.139	0.136	0.134	0.132	0.130	0.128	0.127	0.126	0.125	0.124	0.124	0.124
15	0.156	0.151	0.146	0.142	0.138	0.135	0.132	0.130	0.128	0.127	0.125	0.124	0.123	0.123	0.122	0.122
10	0.155	0.149	0.144	0.140	0.136	0.133	0.131	0.129	0.127	0.125	0.124	0.123	0.122	0.121	0.120	0.120
5	0.153	0.147	0.142	0.138	0.134	0.131	0.129	0.127	0.125	0.123	0.122	0.121	0.120	0.119	0.118	0.118
0	0.150	0.144	0.140	0.136	0.132	0.129	0.127	0.124	0.123	0.121	0.120	0.118	0.117	0.117	0.116	0.115

Tabla B.8.- UVB-1 de Yes #010911. Ubicación: Burjassot (Valencia). Banda de sombra.

O_3 (DU) / θ (º)	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
90	0.213	0.221	0.230	0.239	0.249	0.259	0.270	0.281	0.293	0.305	0.317	0.330	0.343	0.356	0.369	0.383
85	0.188	0.194	0.200	0.207	0.215	0.223	0.231	0.240	0.249	0.258	0.268	0.278	0.288	0.298	0.308	0.319
80	0.168	0.171	0.175	0.179	0.184	0.189	0.195	0.201	0.207	0.213	0.220	0.226	0.233	0.240	0.248	0.255
75	0.160	0.161	0.162	0.165	0.167	0.170	0.174	0.178	0.182	0.186	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215
70	0.157	0.157	0.157	0.157	0.159	0.160	0.162	0.164	0.167	0.170	0.173	0.176	0.179	0.182	0.186	0.190
65	0.157	0.155	0.154	0.154	0.154	0.154	0.155	0.156	0.158	0.160	0.161	0.163	0.166	0.168	0.171	0.173
60	0.159	0.156	0.154	0.153	0.152	0.151	0.151	0.152	0.152	0.153	0.154	0.155	0.157	0.158	0.160	0.162
55	0.161	0.157	0.154	0.152	0.151	0.150	0.149	0.149	0.149	0.149	0.149	0.150	0.151	0.152	0.153	0.154
50	0.163	0.159	0.155	0.153	0.151	0.149	0.148	0.147	0.146	0.146	0.146	0.146	0.147	0.147	0.148	0.149
45	0.165	0.160	0.156	0.153	0.151	0.149	0.147	0.146	0.145	0.144	0.144	0.144	0.144	0.144	0.144	0.145
40	0.167	0.162	0.157	0.154	0.151	0.148	0.146	0.145	0.144	0.143	0.142	0.142	0.141	0.141	0.141	0.141
35	0.168	0.163	0.158	0.154	0.151	0.148	0.146	0.144	0.143	0.141	0.141	0.140	0.139	0.139	0.139	0.139
30	0.169	0.163	0.158	0.154	0.150	0.148	0.145	0.143	0.142	0.140	0.139	0.138	0.137	0.137	0.137	0.136
25	0.169	0.163	0.158	0.153	0.150	0.147	0.144	0.142	0.140	0.139	0.138	0.137	0.136	0.135	0.135	0.134
20	0.168	0.162	0.157	0.153	0.149	0.146	0.143	0.141	0.139	0.137	0.136	0.135	0.134	0.133	0.133	0.132
15	0.167	0.161	0.156	0.151	0.148	0.144	0.142	0.139	0.137	0.136	0.134	0.133	0.132	0.131	0.131	0.130
10	0.166	0.159	0.154	0.150	0.146	0.143	0.140	0.138	0.136	0.134	0.132	0.131	0.130	0.129	0.129	0.128
5	0.163	0.157	0.152	0.148	0.144	0.141	0.138	0.135	0.133	0.132	0.130	0.129	0.128	0.127	0.126	0.126
0	0.161	0.155	0.149	0.145	0.141	0.138	0.135	0.133	0.131	0.129	0.128	0.127	0.126	0.125	0.124	0.123

Tabla B.9.- UVB-1 de Yes #010912. Ubicación: Burjassot (Valencia). Inclinada en N-E.

O_3 (DU) / θ (º)	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
90	0.182	0.189	0.196	0.204	0.213	0.222	0.231	0.240	0.250	0.261	0.271	0.282	0.293	0.304	0.315	0.327
85	0.160	0.165	0.171	0.177	0.184	0.191	0.198	0.205	0.213	0.221	0.229	0.237	0.246	0.255	0.263	0.272
80	0.144	0.146	0.150	0.153	0.157	0.162	0.167	0.171	0.177	0.182	0.188	0.193	0.199	0.205	0.212	0.218
75	0.137	0.137	0.139	0.141	0.143	0.146	0.149	0.152	0.155	0.159	0.163	0.166	0.171	0.175	0.179	0.184
70	0.134	0.134	0.134	0.134	0.135	0.137	0.138	0.140	0.143	0.145	0.147	0.150	0.153	0.156	0.159	0.162
65	0.134	0.133	0.132	0.131	0.132	0.132	0.133	0.134	0.135	0.136	0.138	0.140	0.142	0.144	0.146	0.148
60	0.136	0.133	0.131	0.130	0.130	0.129	0.129	0.130	0.130	0.131	0.132	0.133	0.134	0.135	0.137	0.138
55	0.138	0.134	0.132	0.130	0.129	0.128	0.127	0.127	0.127	0.127	0.128	0.128	0.129	0.130	0.131	0.132
50	0.139	0.136	0.133	0.130	0.129	0.127	0.126	0.126	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.126	0.126	0.127
45	0.141	0.137	0.134	0.131	0.129	0.127	0.126	0.125	0.124	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.124
40	0.143	0.138	0.134	0.131	0.129	0.127	0.125	0.124	0.123	0.122	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121
35	0.144	0.139	0.135	0.132	0.129	0.127	0.125	0.123	0.122	0.121	0.120	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119
30	0.144	0.139	0.135	0.131	0.129	0.126	0.124	0.122	0.121	0.120	0.119	0.118	0.117	0.117	0.117	0.117
25	0.144	0.139	0.135	0.131	0.128	0.125	0.123	0.121	0.120	0.119	0.118	0.117	0.116	0.115	0.115	0.115
20	0.144	0.139	0.134	0.130	0.127	0.125	0.122	0.120	0.119	0.117	0.116	0.115	0.114	0.114	0.113	0.113
15	0.143	0.138	0.133	0.129	0.126	0.123	0.121	0.119	0.117	0.116	0.115	0.114	0.113	0.112	0.112	0.111
10	0.142	0.136	0.132	0.128	0.125	0.122	0.120	0.118	0.116	0.114	0.113	0.112	0.111	0.110	0.110	0.109
5	0.140	0.134	0.130	0.126	0.123	0.120	0.118	0.116	0.114	0.113	0.111	0.110	0.109	0.109	0.108	0.107
0	0.137	0.132	0.128	0.124	0.121	0.118	0.116	0.114	0.112	0.111	0.109	0.108	0.107	0.107	0.106	0.105

Referencias

ACS (2005). Cancer Facts and Figures 2005. Atlanta: *American Cancer Society*.

Alados-Arboledas, L., J. Lorente, J.A. Martínez-Lozano, V. Cachorro, A. Labajo, B. de la Morena, J.P. Díaz, M. Pujadas, H. Horvath, A.M. Silva y G. Pavese (2003). VELETA 2002 field campaign. European Aerosol Conference 2003, *Journal of Aerosol Science (Special Issue)*, **II**, S1035-S1036.

Allaart, M., M. van Weele, P. Fortuin y H. Kelder (2004). An empirical model to predict the UV-Index based on the solar zenith angles and total ozone. *Meteorological Applications*, **11**, 59-65.

Anders, A., H. Altheide, M. Knalmann, H. Tronnier (1995). Action spectrum for erythema in humans investigated with dye lasers. *Photochemistry and Photobiology*, **61**, 200-2005.

Badosa, J. (2005). UV Index. Measurement and Model Agreement: Uncertainties and Limitations. *Ph. D. thesis*, Universitat de Girona, España.

Bais, A., C. Topaloglou, S. Kazadtzis, M. Blumthaler, J. Schreder, A. Schmalwieser, D. Henriques y M. Janouch (2001a). Report of the LAP/COST/WMO Intercomparison of Erythemal Radiometers, Thessaloniki, Greece, 13-23 September 1999. *WMO-GAW report*, No**. 141**, (WHO TD No. 1051), Geneva.

Bais, A.F., B.G. Gardiner, H. Slaper, M. Blumthaler, G. Bernhard, R. McKenzie, A. R. Webb, G. Seckmeyer, B. Kjeldstad, T. Koskela, P.J. Kirsch, J. Gröbner, J.B. Kerr, S. Kazadzis, K. Leszczynski, D. Wardle, C. Brogniez, W. Josefsson, D. Gillotay, H. Reinen, P. Weihs, T. Svenoe, P. Eriksen, F. Kuik y A. Redondas (2001b). SUSPEN intercomparison of ultraviolet spectroradiometers. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 12509-12525.

Batlles, F.J., F.J. Olmo y L. Alados-Arboledas (1995). On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, **54**, 105-114.

Berger, D.S. (1976). The sunburning ultraviolet meter: design and performance. *Photochemistry and Photobiology*, **24**, 587-593.

Berger, D.S. y F. Urbach (1982). A climatology of sunburning ultraviolet radiation. *Photochemistry and Photobiology*, **35**, 187-192.

Bird, R.E., y C. Riordan (1986). Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **25**, 87-97.

Blumthaler, M., W. Ambach y R. Ellinger (1997). Increase in solar UV radiation with altitude. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **39** 130-134.

Burrows, W.R., M. Vallee, D.I. Wardle, J.B. Kerr, L.J. Wilson y D. W. Tarasick (1994). The Canadian operational procedure for forecasting total ozone and UV radiation. *Meteorological Applications*, **1**, 247-265.

Cañada, J., P. Utrillas, F. Tena, A.R. Esteve, **M.J. Marín** y J.A. Martínez-Lozano (2006). Study of erythemal, UV(A+B) and Global radiation in Valencia (Spain). *Atmospheric Environment* (en revisión editorial).

Carreño, V., E. Cuevas, A. Redondas, V. Cachorro y J. P. Díaz (2002). Modelo de predicción del índice ultravioleta del instituto nacional de meteorología: estado actual y nuevas líneas de desarrollo. 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de geodesia y geofísica. *Proceedings*, **II**, 1049-1053.

Cede, A., E. Luccini, L. Nuñez, R.D. Piacentini y M. Blumthaler (2002). Monitoring of erythemal irradiance in the Argentine ultraviolet network. *Journal of Geophysical Research*, **107**, NO. D13, 10.1029/2001JD001206.

CIE (1935). Comptes Rendues de la Commission Internationale de l'éclairage. Berlin: CIE; 9:596-625.

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

CIE (1999). Standardization of the terms UV-A1, UV-A2 and UV-B. Vienna: CIE; Report CIE-134/1.

Davis, A., G.H. Deane y B.L. Diffey (1976). Possible dosimeter for ultraviolet radiation. *Nature,* **261**, 169-170.

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, K. Masson, B. Mayer, H. Plets, A. Redondas, A. Renaud, G. Schauberger, A. Schmalwiesser, H. Schwander y K. Vanicek (2001). Comparison of measured and modelled UV indices for the assessment of health risks. *Meteorological Applications*, **8**, 267-277.

De Cabo, X., E. Campmany, M. Martín y J. Lorente (2004). The first Iberian UV-Visible instruments intercomparison. *Final Report*, Chapter 10, 101-108.

Dichter, B.K., A.F. Beaubien y D.J. Beaubien (1993). Development and Characterization of a New Solar Ultraviolet-B Irradiance Detector. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **10**, 337-344.

Diffey, B.L. (1982). The consistency of studies of ultraviolet erythema in normal human skin. *Physics in Medecine and Biology*, **27**, 715-720.

Diffey, B.L. (1987). Analysis of the risk of skin cancer from sunlight and solaria in subjects living in Northern Europe. *Photodermatology,* **4**, 118-126.

Diffey, B.L. (1990). Human Exposure to Ultraviolet Radiation. *Seminars in Dermatology,* **9**, 2-10.

Diffey, B.L. (1998). Human exposure to ultraviolet radiation. In: Hawk JLM, ed. *Photodermatology.* London: Chapman and Hall.

Drummond, A.J. (1956). On the measurement of sky radiation. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim. B*, **7**, 413-436.

Estellés, V. (2006). Caracterización de los aerosoles atmosféricos en Valencia mediante fotometría solar, *Ph. D. Thesis*, Universitat de València, España.

Esteve, A.R, **M.J. Marín**, J.A. Martínez-Lozano, F. Tena, M.P. Utrillas y J. Cañada (2006). UV Index on tilted surfaces. *Photochemistry and Photobiology,* **82**, 1047-1052.

Farman, J.C., B.G. Gardiner, y J.D. Shanklin (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_X/NO_X interaction. *Nature*, **315**, 207-210.

Fitzpatrick, T.B. (1988). The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Archives of Dermatology*, **124**, 869-871.

Frederick, J.E. y D. Lubin (1988). The budget of biologically active radiation in the earth atmosphere system. *Journal of Geophysical Research*, **93**, 3825-3832.

Gies, P., C. Roy, S. Toomey, R. MacLennan y M. Watson (1998). Solar UVR Exposures of Primary School Children at Three Locations in Queensland. *Photochemistry and Photobiology*, **68**, 78-83.

Gies, P. y J. Wright (2003). Measured Solar Ultraviolet Radiation Exposures of Outdoor Workers in Queensland in the Building and Construction Industry. *Photochemistry and Photobiology*, **78**, 342-348.

Gómez-Amo, J.L., V. Estellés, **M.J. Marín**, J.A. Martínez-Lozano, M.P. Utrillas y R. Pedrós (2006). Influencia de la temperatura instrumental en las medidas de irradiancia espectral. *Óptica Pura y Aplicada*, **39**.

Grainger, R.G., R.E. Basher y R.L. McKenzie (1993). UV-B Robertson-Berger meter characterization and field calibration. *Applied Optics*, **32**, 343-349.

Gueymard, C. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, **71**, 325-346.

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

Horowitz, J.L. (1969). An easily constructed shadow-band for separating direct and diffuse solar radiation. *Solar Energy*, **12**, 543-545.

ICNIRP (1995). Global Solar UV Index. WHO/WMO/INCIRP recommendation. *INCIRP publication* no 1/95, Oberschleissheim.

ICNIRP (2004). Guidelines on limits of exposure of UV radiation. *Health Physics*, **87**, 171-186.

Kazantzidis, A., D.S. Balis, A.F. Bais, S. Kazadsis, E. Galani y E. Kosmidis (2001). Comparison of Model Calculations with Spectral UV Measurements during the SUSPEN Campaign: The Effect of Aerosols. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 1529-1539.

Kelfkens, G., F.R de Grujil y J.C. van der Leun (1990). Ozone depletion and increase in annual carcinogenic ultraviolet dose. *Photochemistry and Photobiology*, **52**, 819-823.

Koepke, P., A. Bais, D. Balis, 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. Shauberger, G. Seckmeyer, P. Seifert, A. Schmalwieser, H. Schwander, K. Vanicek y M. Weber (1998). Comparison of Models Used for UV Index Calculations. *Photochemistry and Photobiology*, **67**, 657-662.

LeBaron, B.A., J.J. Michalsky y R. Pérez (1990). A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. *Solar Energy*, **44**, 249-256.

Lenoble, J. (1993). Atmospheric radiative transfer. *A. Deepak Publishing*.

Leszczynski, K., K. Jokela, L. Ylianttila, R. Visuri y M. Blumthaler (1998). Erythemally weighted radiometers in solar UV monitoring: results from the WMO/STUK intercomparison. *Photochemistry and Photobiol*ogy **67**, 212-221.

Liu, Y.H. y Jordan R.C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, **4**,1-19.

Long, C.S., A.J. Miller, H.Lee, J.D. Wild, R.C. Przywarty, y D. Hufford (1996). Ultraviolet Index Forecasts Issued by the National Weather Service. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77** (4), 729-748.

López, G., T. Muneer y R. Claywell (2004). Assessment of four shadow band correction models using beam normal irradiance date from the United Kingdom and Israel. *Energy Conversión and Management* **45**, 1963-1979.

Lorente, J., X de Cabo, y E. Campmany (2002). Predicción diaria del índice UV a partir de la columna de ozono observada por el TOMS. 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofisica. *Proceedings*, **III,** 1394-1396.

Lorente, J., X. de Cabo, E. Campmany, Y. Sola, J.A. González, J. Calbó, J. Badosa, L. Alados-Arboledas, J.A. Martínez-Lozano, V. Cachorro, A. Labajo, B. de la Morena, A.M. Díaz, M. Pujadas, H. Horvath, A.M. Silva y G. Pavese (2004). Altitude effect on UV Index deduced from the Veleta-2002 Experimental Campaign (Spain). Proceedings, 164-167. *International Radiation Symposium.*

MacKie, R.M. (2000). Effects of ultraviolet radiation on human health. *Radiation Protection Dosimetry*, **91**, 15-18.

Madronich, S. (1987). Photodissociation in the atmosphere. Part 1. Actinic flux and the effect of ground reflections and clouds. *Journal of Geophysical Research*, **92**, 9740-9752.

Madronich, S. y F.R. de Grujil (1993). Skin cancer and UV radiation. *Nature*, **366**, 23-28.

Marín, M.J. (2001). Análisis de los valores experimentales del Índice UV en España durante el año 2000. Memoria presentada para la obtención del DEA (Diploma de Estudios Avanzados).

Marín, M.J., M.P. Utrillas, J.A. Martínez-Lozano, F. Tena, R. Pedrós y J.L. Gómez (2001). Estudio de la radiación solar UVB y de su índice de claridad para Valencia. XXVIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física. *Resúmenes de las Comunicaciones*, **II**, 245-250. Universidad de Sevilla.

Marín, M.J., J.A. Martínez-Lozano, F. Tena y M.P. Utrillas (2003). Evolución del Índice UV en Valencia para el año 2002. Comparación de los valores reales y simulados. *Óptica Pura y Aplicada*, **36**, 39-44.

Marín, M.J., E. Sañudo, M.P. Utrillas, J.A. Martínez-Lozano, F. Tena (2004). UVB and erythemal solar radiation on tilted planes in Valencia-Spain. *Proceedings of SPIE*, **5622**, 1208-1213.

Marín, M.J., Y. Sola, F. Tena, M.P. Utrillas, E. Campmany, X. de Cabo, J. Lorente y J.A. Martínez-Lozano (2005). The UV Index on the Spanish Mediterranean Coast. *Photochemistry and Photobiology*, **81**, 659-665.

Marín, M.J., A.R. Esteve, F. Tena, M.P. Utrillas y J.A. Martínez-Lozano (2006). Dependencia de la predicción del Índice UV con el ozono y la turbiedad. *Óptica Pura y Aplicada* (aceptado).

Martínez-Lozano, J.A., M.P. Utrillas, F. Tena, R. Pedrós, J. Cañada, J.V. Boscá y J. Lorente (2001). Aerosol optical characteristics from Summer campaign in the urban coastal Mediterranean area. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 1573-1585.

Martínez-Lozano, J.A., **M.J. Marín**, F. Tena, M.P. Utrillas, L. Sánchez-Muniosguren, C. González-Frías, E. Cuevas, A. Redondas, J. Lorente, X. de Cabo, V. Cachorro, R. Vergaz, A. de Frutos, J.P. Díaz, F.J. Expósito, B. de la Morena y J.M. Vilaplana (2002a). UV Index Experimental Values During the Years 2000 and 2001 from the Spanish Broadband UV-B Radiometric Network. *Photochemistry and Photobiology*, **76**,181-187.

Martínez-Lozano, J.A., F. Tena, **M.J. Marín**, M.P. Utrillas, J. Lorente, X. de Cabo y C. González-Frías (2002b). Experimental values of the UV Index during 2000 at two locations in Mediterranean Spain. *International Journal of Climatology*, **22**, 501-508.

Mayer, B. y G. Seckmeyer (1996). All weather comparison between spectral and broadband (Robertson-Berger) UV measurements. *Photochemistry Photobiology*. **64**, 792-799.

Mayer, B., G. Seckmeyer y A. Kylling (1997). Systematic long-term comparison of spectral UV measurements and UVSPEC modeling results. *Journal of Geophysical Research*, **102**(7), 8755-8767.

Mayer, B. y A. Kylling (2005). Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations- descripcion and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **5**, 1855-1877.

McKenzie, R.L., K.J. Paulin y M. Kotkamp (1997). Erythemal UV irradiances at Lauder, New Zealand: relationship between horizontal and normal incidence. *Photochemistry and Photobiol*ogy, **66**, 683-689.

McKenzie, R.L. (1998). UV information in New Zealand. In WMO-GAW. Report of the WMO-WHO meeting of experts on standardization of UV Indices and their dissemination to the public. *WMO-GAW report*, No. **127** (WMO TD No. 921), Geneva, 131-133.

McKenzie, R.L., P.V. Johnston, D. Smale, B. Bodhaine y S. Madronich (2001). Altitude effects on UV spectral irradiance deduced from measurements at Lauder, New Zealand, and at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 22845-22860.

McKinlay, A.F. y B.L. Diffey (1987). A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE Journal*, **6** , 17-22.

Mech, M. y P. Koepke (2004). Model for UV irradiance on arbitrarily oriented surfaces. *Theoretical & Applied Climatology*, **77**, 151-158.

Muneer, T. y X. Zhang (2002). A New Method for Correcting Shadow Band Diffuse Irradiance Data. *Journal of Solar Energy Engineering*, **124**, 34-43.

Nakajima, T. y M. Tanaka (1986). Matrix Formulations for the Transfer of Solar Radiation in a Plane-Parallel Scattering Atmosphere. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **35**, 13-21.

Parisi, A.V. y M.G. Kimlin (1999). Horizontal and sun-normal spectral biologically effective ultraviolet irradiances. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biol*ogy, **53**, 70-74.

Parrish, J.A., K.F. Jaenicke y R.R. Anderson (1982). Erythema and melanogenesis action spectra of normal human skin. *Photochemistry and Photobiology*, **36**, 187-191.

Pearson, A.J., S.F. Dean, I.E.S. Clark, J.I. Campbell, K.J. Grainger y C.M.H. Driscoll (2000). NRPB solar ultraviolet radiation measurement network. *Radiation Protection Dosimetry* **91**, 169-172.

Pierluissi, J.H. y C.E. Marogoudakis (1986). Molecular Transmission Band Models for LOWTRAN, AFGL-TR-86-0272, AD A180655.

Renaud, A. (1998). Solar erythemal ultraviolet radiation – analysis of Swiss measurements and modelling, *Ph. D. thesis*, Swiss Fed. Inst. of Technol., Zurich, Suiza.

Ricchiazzi, P., S. Yang, C. Gautier y D. Sowle (1998). SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79** (10), 2101-2114.

Robertson, D.F. (1972). Solar ultraviolet radiation in relation to human sunburn and skin cancer, *Ph. D. thesis*, University of Queensland, Australia.

Rosenthal, F.S., M. Safran y H.R. Taylor (1985). The ocular dose of ultraviolet radiation from sunlight exposure. *Photochemistry and. Photobiology*, **42**, 163-171.

Roy, C.R., H.P. Gies y S. Toomey (1995). The solar UV radiation environment: measurement techniques and results. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **31**, 21-27.

Sabburg, J. y J. Wong (2000). The effect of clouds on enhancing UVB irradiance at the earth's surface: a one year study. *Geophysical Research Letters*, **27**, 3337-3340.

Sánchez, L., B. de la Morena, y E. Cuevas (2004). First Iberian UV-VIS instruments intercomparison. Final Report. *Centro de Publicaciones del Ministerio Medio Ambiente*. Dirección General del Instituto de Meteorología. Madrid.

Schreder, J. (2006). Standard calibration method. CMS-Ing. Dr. Schreder GmbH Company. Kirchbichl, Austria. http://www.schreder-cms.com.

Schmalwieser, A.W. y G. Schauberger (2000). Validation of the Austrian forecast model for solar, biologically effective UV radiation- UV Index for Vienna. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 26661-26667.

Scotto, J. y T.R. Fears (1987). The association of solar ultraviolet and skin melanoma incidence among caucasians in the United States. *Cancer Investigation,* **5**, 275-283.

Scotto, J., G. Cotton, F. Urbach, D. Berger y T. Fears (1988). Biologically effective ultraviolet radiation: surface measurements in the United States. 1974 to 1985. *Science,* **239**, 762-764.

Seckmeyer, G., A. Bais, G. Bernhard, M. Blumthaler, C.R. Booth, K. Lantz y R.L. McKenzie (2001). Instruments to measure solar ultraviolet irradiance. Part 1: spectral instruments, 30 pp, *WMO-GAW report*, No. **125**, (WHO TD No. 1066). Geneva.

Serrano, A., M.L. Cancillo, M. Antón, J.A. García, y J.M. Vaquero (2004). Red regional de medida de radiación solar en Extremadura. 4ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. *Libro de resúmenes*, 235-236.

Shettle, E. P. y R. W. Fenn (1979). Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties. *In Report AFGL-TR-79-0214,* Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom, MA.

Stamnes, K., S.C. Tsay, W. Wiscombe y K. Jayaweera (1988). Numerically stable algorithm for discrete ordinate method radiative transfer in multiple scaterring emitting layered media. *Applied Optics*, **27**, 2502-2509.

Sobolev, V.V. (1963). A Treatise on Radiative Transfer. D. Van Nostrand Company, INC.

Tanre, D., C. Deroo, P. Duhaut, M. Herman, J.J. Morcrette, J. Perbos y P.Y. Deschamps (1990). Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing,* **11**, 659-668.

Tena, F., **M.J. Marín**, J.A. Martínez-Lozano, M.P. Utrillas y J.L. Gómez (2000). Spectral and broad band ultraviolet measurements in Valencia (Spain): A preliminary comparison. *Radiation Protection Dosimetry,* **91**, 119-122.

Tena, F., J. Cañada, M.P. Utrillas, **M.J. Marín**, A.R. Esteve y J.A. Martínez-Lozano (2006). The Erythemal Clearness Index for Valencia (Spain). (en preparación).

Tevini, M. (1994). UV-B effects on terrestrial plants and aquatic organisms. *Progress in Botany*, **55**, 174-190.

Thekeakara, M.P. (1974). Extra-Terrestrial solar spectrum, 3000-6100 A at 1 A intervals. *Applied Optics*, **13**, 518-522.

Utrillas, M.P., J.V. Boscá, J.A. Martínez-Lozano, J. Cañada, F. Tena y J.M. Pinazo (1998). A comparative study of SPCTRAL2 and SMARTS2 parameterised models based on spectral irradiance measurements at Valencia, Spain. *Solar Energy*, **63**, 161-171.

Utrillas, M.P., **M.J. Marín**, A.R. Esteve, F. Tena, J. Cañada y J.A. Martínez-Lozano (2006). Diffuse UVER radiation experimental values. *Agricultural and Forest Meteorology* (en revisión editorial).

Vanicek, K., T. Frei, Z. Litynska y A. Schnalwieser (2000). UV-Index for the public, *COST-713 Action (UV-B Forecasting)*, Brussels, 27 p. En Internet: http://www.lamma.rete.toscana.it/uvweb/index.html.

Webb, A.R. y M.F. Holick (1988). The role of sunlight in the cutaneous production of vitamine D_3. *Annual review of nutrition*, **8**, 375-399.

Webb, A.R., P. Weihs y M. Blumthlaler (1999). Spectral UV Irradiance on Vertical Surfaces: A Case Study. *Photochemistry and Photobiology*, **69**, 464-470.

Weihs, P. y A. R. Webb (1997). Accuracy of spectral UV model calculations 1. Consideration of uncertainties in input parameters. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 1541-1550.

Weihs, P. (2002). Influence of ground reflectivity and topography on erythemal UV radiation on inclined planes. *International Journal of Biometeorology*, **46**, 95-104.

WHO (2003). Índice UV Solar Mundial: Guía Práctica (versión en castellano), 28 pp. Organización Mundial de la Salud (WHO), Organización Meteorológica Mundial (WMO), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP), Ginebra. http://www.who.int/uv.

WMO (1998). Report of the WMO-WHO meeting of experts on standardization of UV indices and their dissemination to the public *WMO-GAW report*, No. **127** (WMO TD No. 921), Geneva.

YES (Yankee Environmental Systems, Inc.) (2000). UVB-1 Ultraviolet Pyranometer. Installation and User Guide, Versión 2.0. Turners Falls, USA.

Zigman, S. (1977). Near UV light and cataracts. *Photochemistry and Photobiology*, **26**, 437-441.